

СЕНТТОО

ХДМА



№ 15

МАТЕРІАЛИ
МІЖНАРОДНОЇ
НАУКОВО-
ПРАКТИЧНОЇ
КОНФЕРЕНЦІЇ

2024

<https://ksma.ks.ua/>

Міністерство освіти і науки України
Херсонська державна морська академія
Одеський національний морський університет
Національний університет «Одеська морська академія»
Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова
Державний університет інфраструктури та технологій
Литовська морська академія (Литовська Республіка)
Akademia Morska w Szczecinie (Республіка Польща)
Batumi State Maritime Academy (Грузія)
University of Plymouth (Велика Британія)
Крюїнгова компанія «Marlow Navigation» (Республіка Кіпр)

МАТЕРІАЛИ

15-ї Міжнародної науково-практичної конференції

***«СУЧАСНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ
УСТАНОВКИ НА ТРАНСПОРТІ,
ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ
ЇХ ОБСЛУГОВУВАННЯ»
(СЕУТТОО-2024)***



Херсон – 2024

Науковий комітет:

Агєєв М.С. – д.т.н., доц., ХДМА;
Білогуб О.В. – д.т.н., проф., НТУ «ХАІ»;
Білоусов Є.В. – д.т.н., проф., ХДМА;
Варбанець Р.А. – д.т.н., проф., ОНМУ;
Грицук І.В. – д.т.н., проф., ХДМА;
Дакі О.А. – д.т.н., доц., ДІВТ;
Єпіфанов С.В. – д.т.н., проф., НТУ «ХАІ»;
Колєгаєв М.О. – к.т.н., проф., НУ «ОМА»;
Кравченко С.О. – д.т.н., с.н.с., НТУ «ХПІ»;
Лещенко А.М. – д.філос.н., проф., ХДМА
Мельник О.В. – к.т.н., доц., ДУІТ;
Наглюк І.С. – д.т.н., проф., ХНАДУ;
Парсаданов І.В. – д.т.н., проф., НТУ«ХПІ»;
Подригало М.А. – д.т.н., проф., ХНАДУ;
Полив'яничук А.П. – д.т.н., проф., ХНУ міського господарства імені О.М. Бекєтова;
Рєва О.М. – д.т.н., проф., НАУ;
Рєдчиць Д.О. – д.ф.-м.н., інститут транспортних систем і технологій НАН України;
Сараєв О.В. – д.т.н., проф., ХНАДУ;

Сєрбін С.І. – д.т.н., проф., НУК;
Сьомін О.А. – к.т.н., доц., ДУІТ;
Тимошевський Б.Г. – д.т.н., проф., НУК;
Тулученко Г.Я. – д.т.н., проф., НТУ «ХПІ»;
Черєдніченко О.К. – д.т.н., доц., НУК;
Шарко О.В. – д.т.н., проф., ХДМА;
Шумило О.М. – к.т.н., проф., ОНМУ;
Klyus Oleh – prof. dr hab. inż, Akademia Morska w Szczecinie (Рєспубліка Польща);
Rima Mickienė – Deputy director for academic affairs at Lithuanian Maritime Academy (Литовська рєспубліка);
Teona Dzeladze – Ph.D, Associate Professor Batumi State Maritime academy (Грузія);
Yong Ming Dai – Ph.D, Senior Lecturer in Marine Technology, Associate Head of School – Mechanical Engineering, University of Plymouth (Вєліка Британія)

Організаційний комітет:

Голова – Василь ЧЕРНЯВСЬКИЙ, в.о. ректора ХДМА.

Заступники голови – Андрій БЕНЬ, прорєктор з НІР ХДМА.

Олександр АКИМОВ, декан факультету суднової енергетики.

Володимир САВЧУК, зав. кафедри експлуатації суднових енергетичних установок.

Вчений секретар конференції – Дмитро ЗІНЧЕНКО, доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок.

Технічний секретар – Дар'я КУРНОСЕНКО, завідувач лабораторії кафедри експлуатації суднових енергетичних установок.

Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. 15-а Міжнародна науково-практична конференція, 13-15 березня 2024 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія.

У матеріалах 15-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування» представлені тези, які присвячені проблемам експлуатації, виробництва та проектування енергетичних установок та устаткування на транспорті, а також підготовці спеціалістів у сфері транспортної енергетики й устаткування.

ЗМІСТ

Слово голови організаційного комітету конференції, ректора Херсонської державної морської академії Чернявського Василя Васильовича.....	9
Секція 1. Проблеми експлуатації енергетичних установок і допоміжного обладнання на транспорті.....	10
Гнатів А.В., Сохін П.А., Ульянець О.А. <i>Спосіб балансування Li-ion акумуляторних батарей під час їх заряду та розряду.....</i>	11
Врублевський Р.Є. <i>Ефективне очищення палива від алюмосилікатів за допомоги PID-регулятора.....</i>	15
Матвеев В.В. <i>Альтернативна заміна фреону R22.....</i>	17
Кульбашна Н.І., Гавришенко С.О. <i>Проведення хронометражних вимірювань на маршруті за допомогою бортового пристрою.....</i>	19
Dmytro Borysiuk. <i>Mathematical model of YaMZ-650 turbocharger as a diagnostic object.....</i>	22
Наговський Д.А., Дощенко Г.Г. <i>Математична модель електрогенераційної суднової установки.....</i>	29
Савчук В.П., Зінченко Д.О., Дзигар А.К., Кочетов Г.А. <i>Дослідження робочих параметрів шатунних підшипників суднового дизельного двигуна MaK 8M32C за різних значень експлуатаційних зазорів.....</i>	33
Шарко О.В., Яненко А.В., Мовчан П.В. <i>Система технічної діагностики визначення поточного стану транспортних пристроїв.....</i>	39
Oleh Kolbasenko, Borys Dymo, Serhii Anastasenko, Oleksiy Stelmakh. <i>Increasing the efficiency of combustion of water fuel emulsions in internal combustion engines.....</i>	42
Савчук В.П., Макарчук Д.В., Пошивай І.Г. Дзигар А.К. <i>Метод оптимізації питомої витрати палива малооборотними двигунами суховантажних суден...</i>	45
Савчук В.П., Курносенко Д.В., Білоусов Є.В. Сатулов А.І. <i>Діагностування несправностей систем змащення високооборотних дизелів.....</i>	49
Горобченко О.М., Заїка Д.О. <i>Дослідження тяго-енергетичних показників маневрового локомотива ЧМЕЗ на різних варіантах підключення тягових електричних двигунів.....</i>	52
Погорлецький Д.С., Грицук І.В., Худяков І.В. <i>Особливості використання та експлуатації водопріснювальної установки зворотнього осмосу.....</i>	55
Залож В.І., Тарасенко Т.В. <i>Огляд існуючих систем моніторингу суднових дизельних двигунів.....</i>	60

Шостак В.П., Личко Б.М. <i>Застосування дросельно-зволожувального пристрою в системах глибокої утилізації теплоти малооборотних двигунів</i>	63
Roman Varbanets, Dmytro Minchev, Iryna Savelieva ¹ , Andriy Rodionov, Tatiana Mazur, Sviatoslav Psariuk. <i>Advanced marine diesel engines diagnostics for IMO decarbonization compliance</i>	66
Коробейнікова Н.В., Чередніченко О.К. <i>Плавучі електростанції на базі енергоефективних технологій як джерела енергопостачання суден в акваторії порту</i>	76
Volodymyr Nerubatskyi, Denys Hordienko. <i>Adaptive multi-phase control system of the rectifier-inverter converter of electric rolling stock</i>	79
Шумило О.М., Кононова О.М. <i>Урахування аналізу ризиків при розробці моделі визначення вартості життєвого циклу судна</i>	83
Тачинін Є.В., Єнчев С.В., Тачиніна О.М. <i>Методологічні основи створення методики забезпечення експлуатаційної технологічності авіоніки на стадії проектування</i>	89
Бігун С.В., Сіманенков А.Л., Лебеденко Ю.О. <i>Задача оптимального керування процесом упорскування циліндрового мастила судових двигунів</i>	93
Булгаков М.П., Кучеренко В.Ю., Волошин Д.О. <i>Інноваційні підходи до оцінки якості баластних вод</i>	95
Кривошапов С.І., Назаров О.І. <i>Система моніторингу та обліку паливно-мастильних матеріалів на підприємствах автомобільного транспорту</i>	99
Секція 2. Проблеми енергозбереження, надійності та безпеки енергетичних установок і допоміжного обладнання на транспорті, нетрадиційні енергетичні системи	103
Воронков О.І., Авраменко А.М., Левтеров А.М. <i>Шляхи зменшення теплового сліду транспортних засобів з ДВЗ</i>	104
Воїнов О. П., Кобалава Г.О., Самохвалов В.С. <i>До питання енергозбереження у сфері тепловикористання</i>	107
Stefan Zaichenko, Andriy Trachuk. <i>Application of the Holt method for building a forecast model of the development of selected structural components of renewable energy industry of Ukraine</i>	110
Скосар В.Ю., Комаров С.В., Бурилов С.В. <i>До питання електромагнітної безпеки користувачів водного транспорту</i>	117
Скосар В.Ю., Бурилова Н.В., Ворошилов О.С., Комаров С.В. <i>Питна вода плюс автономне енергоживлення</i>	120
Скосар В.Ю., Редчиць Д.О., Бурилов С.В., Дзензерський В.О. <i>Вдосконалення мембранного блоку паливного елемента</i>	124

Багач Р.В., Гнатов А.В., Аргун Щ.В. <i>Використання трифазних активних випрямлячів напрути з функцією рекуперації енергії</i>	128
Костиця М.В., Кошель М.Д., Корпач С.В. <i>Дослідження і моделювання динаміки заряд / розрядних процесів Fe/Fe(OH)₂ електродів лужних акумуляторів транспортних засобів</i>	133
Кісетов Ю.В. <i>Деякі питання використання аміаку як паливо на судні</i>	137
Зіпунніков М.М., Котенко А.Л. <i>Аналіз роботи електрохімічного генератора при електроживленні від фотоелектричного перетворювача</i>	141
Грич А.В. <i>Використання абсорбційно-парокомпресорної холодильної машини для охолодження повітря машинного залу автономної теплоелектростанції</i>	144
Грич А.В. <i>Оцінка ефективності двоступеневого охолодження повітря машинної зали газопоршневих двигунів</i>	147
Остапенко О.В. <i>Ежекторно-абсорбційна система трансформації теплоти газового двигуна автономної теплоелектростанції</i>	150
Остапенко О.В. <i>Абсорбційно-адсорбційна холодильна машина з трансформацією скидної теплоти від газових двигунів</i>	153
Шостак В.П., Самохвалов В.С., Єлеонська О.С. <i>Енергозбереження при експлуатації суден</i>	155
Калініченко І.В., Казенов Є.Є. <i>Технології утилізації теплоти судових ДВЗ тепловим насосом</i>	157
Кучма О.С. <i>Специфіка авіаційних перевезень вантажів як фактор міжнародної інтеграції</i>	160
Качмар В.А., Семенов М.М. <i>Дослідження варіантів підвищення економічності газотурбінних установок шляхом зниження температури робочого тіла</i>	163
Сироїжка І.О. <i>Інноваційні рішення для покращення надійності та безпеки сучасних енергетичних установок на авіаційному транспорті</i>	165
Настасенко В.О. <i>Водно-вугільні паливні суміші на транспортному флоті і екологічні проблеми їх використання</i>	169
Halina Kobalava, Dmytro Konovalov. <i>Determining the thermopressor's evaporation chamber size for combustion engine cooling systems</i>	171
Щедролосєв О.В. <i>Безпека експлуатації циркуляційної системи підігріву нафтових вантажів на танкерах</i>	174
Шпілева Т.М., Голдін В.А. <i>Застосування двопаливних двигунів на сучасних судах</i>	178

Volodymyr Nerubatskyi, Denys Hordiienko. <i>Application of the differential power converter in the system of solar power plants</i>	180
Коробко В.В. <i>Утилізація скидної теплоти електрохімічних генераторів в гібридних СЕУ, працюючих на аміаку</i>	184
Кузнецов В.В., Шевцов А.П. <i>Моделювання показників ресурсу суднових енергетичних установок з теплообмінними апаратами</i>	187
Дзигар А.К. <i>Потенціал використання метанолу в якості палива для суднових двигунів</i>	190
Бабій М.В. <i>Резерви підвищення досконалості організації топкового процесу в суднових котлах</i>	193
Слинько О.Г., Бойчук А.С., Козловський С.В., Лавренченко Г.К. <i>Удосконалення термодинамічного циклу простих відкритих газотурбінних установок</i>	197
Беков Б.А., Кузнецова С.А., Шевцов А.П. <i>Ефективність способів охолодження повітря на вході та при стисканні в осьовому компресорі газотурбінного двигуна</i>	204
Кузнецов Г.В., Харитонов Ю.М., Волошин А.Ю. <i>Результати дослідження процесів утилізації скидної теплоти корабельної енергетичної установки теплоакумуючою системою</i>	208
Olena V. Lytosh. <i>Directions in the development of hermetic compressor units of shipboard equipment of air conditioning and refrigeration</i>	212
Беков Б.А. <i>Ефективність та масогабаритні показники газотурбінного двигуна з охолодженням вхідного повітря</i>	214
<hr/>	
Секція 3. Робочі процеси, динаміка та міцність транспортного і технологічного обладнання	217
<hr/>	
Самарін О.Є. <i>Організація робочого процесу суднового малообертового дизеля</i>	218
Ievgenii Gorbatyuk, Oleg Bulavka. <i>Calculation of loads during operation of tower cranes</i>	221
Тарасов С.В., Молотков О.Н. <i>Модель динаміки ротора Дар'є, керованого змінами довжини траверс</i>	223
Будко В.П., Білоусов Є.В., Дзигар А.К., Сатулов А.І. <i>Визначення динамічних характеристик приводу паливного насоса дизеля 9L21/31 виробництва MAN B&W</i>	226
Агеев М.С., Устінцев С.М., Дзигар А.К., Котов А.І. <i>Задача управління дифузійним насиченням ГТН-покриттів в умовах термоциклічного іонного азотування при відновленні робочих поверхонь деталей СТЗ</i>	229

Ткач М.Р., Золотий Ю.Г., Галинкін Ю.М., Монахов А.А. <i>Визначення форм коливань оболонкових деталей методом голографічної спеклінтерферометрії</i>	233
Поліщук В.А., Ніколаєв О.Л. <i>Вдосконалення показників динамічної якості переналагоджуваних верстатних пристосувань</i>	236
Майбородіна Н.В., Герасименко В.П. <i>Динаміка тришарових оболонкових конструкцій</i>	238
Савчук В.П., Марков Н.В., Анікейчик Р.В. <i>Шляхи підвищення надійності підшипників ковзання кривошипно-шатунного механізму сучасних суднових малообертових двигунів</i>	244
Зінченко Д.О., Тулущенко Г.Я., Онацький М.В. <i>Особливості моделювання робочих процесів підшипників кривошипно-шатунного механізму суднових двигунів</i>	247
Секція 4. Проблеми розвитку та особливості проектування і виробництва енергетичних установок і допоміжного обладнання для транспортних систем, його програмне забезпечення	251
Соловей В.В., Зевін Л.І. <i>Планування ефективної черговості відновлення бортової інфраструктури, пошкодженої в результаті старіння, природного, техногенного або військового впливу</i>	252
Латвинський В.Д., Багач Р.В. <i>Аналіз технологій безпілотного електромобільного транспорту</i>	256
Самохвалов В.С., Шостак В.П., Воїнов О.П. <i>Стратегія вдосконалення морських бойових дронів</i>	261
Serhii Savchenko, Vladyslav Polyvoda. <i>Modeling of the ship boiler automated control system</i>	263
Сохацький А.В., Арсенюк М.С. <i>Методика визначення аеродинамічних характеристик наземних транспортних апаратів</i>	266
Maksym Balaka. <i>Transmission parameters calculation of dynamometric laboratory for earth-moving machines testing</i>	270
Верзун О.Ю., Россомаха О.І. <i>Розрахунок викидів CO₂ використаного палива у судовій енергетичній установці при використанні зрідженого природного газу в якості палива</i>	274
Кузьменко А.П. <i>Модернізація системи впуску двигуна МЕМЗ-307 для роботи на зрідженому газі без попереднього випаровування</i>	276
Подригало М.А., Шеїн В.С. <i>Використання масштабного моделювання для встановлення вимог до точності вимірювань при випробуваннях автотракторних двигунів</i>	279

Вінюков-Прощенко А.С. <i>Переваги і недоліки сучасних підходів до прогнозування попиту на пасажирські авіаційні перевезення</i>	282
Лебедь О.М. <i>Режим роботи судових перетворювачів частоти</i>	285
Секція 5. Проблеми підготовки спеціалістів для транспортної галузі	288
Ganna Kalashnyk, Myroslava Kalashnyk-Rybalko. <i>Main measures to reduce the negative environmental impact of the aviation transport complex in the conditions of European integration of Ukraine</i>	289
Матвеев В.В. <i>Автоматизована холодильна установка на комп'ютерному симуляторному комплексі</i>	294
Tatyana Zaytseva, Nataliia Kaminska. <i>Choice of ship management strategy based on data analysis</i>	298
Личко Б.М., Шостак В.П. <i>Теоретична підготовка судового моториста з використанням друкованого робочого зошита</i>	302
Jurii Kisietov. <i>Some features of the training of ship mechanics in the conditions of decarbonization of the fleet</i>	306
Віштак І.В., Майданевич Л.О. <i>Цифрова трансформація: ключ до конкурентоспроможності в сучасному світі</i>	309
Pavlo Nosov. <i>Modeling the impact of irrational ship management on the condition of ship technical systems</i>	312
Yurii Bohdan, Artem Ivanov, Anatoliy Satulov. <i>A brief review of using engine room simulators within STCW and continuing professional development of marine engineers</i>	316
Дудченко С.В., Макарчук Д.В., Литовченко В.І., Ісайчев А.Г., Жмур В.М. <i>Метод оптимізації маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов</i>	320
Нотатки	326

Слово голови організаційного комітету конференції,
в.о. ректора Херсонської державної морської академії
Чернявського Василя Васильовича

Шановні колеги!

Збірка тез XV Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» (СЕУТТОО – 2024) – це результат плідної роботи провідних науковців України та Європи і їх молодих послідовників, які у таких нелегких умовах сьогодення об'єдналися заради спільної мети – розвитку, підтримки та примноження наукового потенціалу нашої країни.

Щорічно Херсонська державна морська академія збирає науковців для обговорення новітніх розробок у сфері проектування, виробництва й експлуатації транспортних енергетичних установок. Цьогорічна конференція не є винятком, адже нам вдалось попри повномасштабне вторгнення і окупаційні дії загарбників об'єднати однопідприємців та створити платформу для вільного обміну думками всіх небайдужих до багатогранної проблематики розвитку транспортної енергетики.

Спільними зусиллями фахівці із різних країн сприяють інтелектуалізації транспортної енергетики, підвищенню екологічності й безпечності енергосистем. Завдяки цьому заходу виражається всебічна підтримка науковців нашої держави, зміцнюється співробітництво між науковими установами й закладами освіти, виникають нові творчі зв'язки.

Від імені оргкомітету конференції висловлюю щире подяку нашим партнерам – консультантам і підприємцям, викладачам вітчизняних та закордонних навчальних закладів – за небайдуже ставлення до проблем транспортної енергетики та активну позицію у пошуку дієвих способів їх подолання!

Впевнений, що тільки в діалозі та співпраці ми разом зможемо створити сучасну систему підготовки та перепідготовки фахівців транспортної галузі, здатних вирішувати надзвичайно складні професійні завдання!

Нація, яка організовує міжнародні наукові заходи під час війни, удосконалює свої знання, ділиться своїми науковими досягненнями на світовому рівні, активно розвиває міжнародне освітнє та наукове співробітництво, ПРИРЕЧЕНА НА ПЕРЕМОГУ!



З повагою,

Василь ЧЕРНЯВСЬКИЙ

СЕКЦІЯ 1

**ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНИХ
УСТАНОВОК І ДОПОМІЖНОГО ОБЛАДНАННЯ
НА ТРАНСПОРТІ**

СПОСІБ БАЛАНСУВАННЯ LI-ІОН АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ ПІД ЧАС ЇХ ЗАРЯДУ ТА РОЗРЯДУ

Гнатів А.В. [✉], Сохін П.А., Ульянець О.А.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Анотація

Ключові слова: Li-іон акумулятори, балансування акумуляторів, заряд акумуляторів, розряд акумуляторів енергоефективні технології.

Li-іон акумулятори з кожним роком набувають все більшого поширення як в автотранспортній сфері так і в сфері побутового використання. Особливості їх роботи вимагають застосувати спеціальні способи їх заряду та балансування. Особливо це стосується сучасних Li-іон АКБ, бо порушення вимог і протоколів заряду та балансування може привести значного зменшення їх ємності, а в гіршому випадку до їх запалювання. Що є небезпечним не тільки до функціонування пристроїв, які від них живляться, а й утворює загрозу для життя людей, що можуть опинитися поряд. Задачею дослідження, є вдосконалення способу роботи зарядно-розрядно-балансуючого пристрою зі спрощеним алгоритмом його реалізації та покращення співвідношення щодо ціни та якості даного пристрою.

Вступ

Li-іон акумулятори останнім часом набули широкої популярності і використовуються, як в електромобілях та їх зарядній інфраструктурі, так і в побутових пристроях і девайсах. Це можуть бути резервні джерела живлення, як EcoFlow чи Powerwall, так і автономні невеликі джерела живлення – PowerBank. Звісно, всі сучасні ноутбуки та смартфони і безліч інших новітніх девайсів також потребують живлення і використовують для цього Li-іон акумулятори. З огляду на надзвичайну вимогливість цих елементів живлення до рівня напруги при заряді, важливо використовувати саме призначені для їх заряду зарядні пристрої. Для того, щоб Li-іон акумуляторні батареї (АКБ) служили максимально довго, необхідно дотримуватися спеціально для них розроблених способів та методів заряду [1-5].

Актуальність досліджень

Сучасні Li-іон АКБ досить сильно відрізняються від раніше використаних всюди кадмієвих або літій-металогідридних елементів живлення, тому змінилися і особливості процесу їх заряду і зберігання. Тому, виникає потреба у розробці та застосуванні нових способів заряду та балансування сучасних Li-іон АКБ, які враховують всі їх особливості та принципи дії [6].

Li-іон АКБ чутливі до глибокого розряду, а також до перезаряду та максимального струму, значення яких не варто перевищувати. Користувачеві досить проблематично дотриматися всіх

умов. Наприклад, якщо акумулятор використовується у резервному джерелі живлення, Li-іон АКБ легко зіпсувати, забувши поставити його на заряд після глибокого розряду. Вкрай чутливі Li-іон АКБ і до кінцевої напруги заряду. Тому майже на всі акумулятори бажано встановлювати електронні плати системи BMS (Battery Management System). Це набір підсистем за допомогою яких забезпечується управління, моніторинг і безпечна експлуатація Li-іон АКБ [7-9].

Саме для ефективної і безпечної роботи системи BMS пропонується розгляданий у даній статті спосіб балансування Li-іон АКБ під час їх заряду та розряду.

Запропонований спосіб стосується методів і засобів обслуговування, перевірки та підтримки справного технічного стану акумуляторних батарей і призначений для застосування на сучасному електричному транспорті та його інфраструктурі, а також в автономних системах живлення та накопичення енергії [10].

Відомий спосіб балансування літій-іонних акумуляторів, який описано у дослідженні Рикованов А.С. (Системи балансу Li-іон акумуляторних батарей // Силова електроніка. 2009. № 19), передбачає включення резистора навантаження паралельно з певною коміркою акумулятора, якщо під час заряду вона досягає максимальної зарядної напруги. Через цей резистор протікають зарядний і розрядний струми для даної комірки. З часом, напруга на цій комірці знижується до рівня, при якому резистор відключається. Такий процес сприяє урівнюванню

напруги на всіх комірках батареї. Недоліком цього способу балансування є значна потужність, яка витрачається на цих резисторах, і зниження ККД процесу заряду.

Аналогом запропонованого способу є «Активне балансування елементів батареї» [11]. В ньому використовуються спеціалізовані мікросхеми Analog Devices, Inc., та передбачає балансування комірок літій-іонних акумуляторів при їх заряді та розрядці. Для забезпечення такого балансування використовуються послідовно включені елементи, при цьому, зарядний струм відключається на тих елементах, на яких напруга досягла гранично допустимого рівня.

Викладення основного матеріалу

Основними недоліками існуючих способів та систем балансування літій-іонних акумуляторних батарей є доволі складний та запутаний алгоритми роботи пристроїв балансування. Це призводить до ускладнення їх технічної реалізації та, як наслідок, до ускладнення конструкції пристроїв, що мають невисоку надійність та ККД роботи і значну собівартість.

Задачею дослідження, є вдосконалення способу роботи зарядно-розрядно-балансуючого пристрою зі спрощеним алгоритмом його реалізації та покращення співвідношення щодо ціни та якості даного пристрою.

Поставлену задачу пропонується вирішувати шляхом удосконалення способу балансування при заряді та розряді Li-ion АКБ, що складаються з послідовно включених комірок Li-ion АКБ. Для цього у спосіб, що описує роботу аналогу [10], введені нові операції, які передбачають проведення заряду АКБ у два етапи. Коли оператор підключає зарядний пристрій, на першій стадії заряду для всіх комірок Li-ion АКБ використовується спільне джерело зарядного струму (ДЗС) з обмеженням загального струму до його номінального значення. Слід вказати, що кожна окрема комірка Li-ion АКБ одночасно отримує заряд від свого індивідуального ДЗС. Цей струм менший за номінальний та утворюється як частина загального зарядного струму. Індивідуальні ДЗС починають обмеження свого зарядного струму, а потім забезпечують стабілізацію граничної зарядної напруги для кожної комірки Li-ion АКБ.

Слід вказати, що на вхід кожного індивідуального ДЗС, яке забезпечує заряд, подається живлення від напруги загального потужного ДЗС, а вихідні затискачі кожного окремого ДЗС гальванічно розв'язані з його входом.

Друга стадія заряду настає у випадку досягнення будь-якою коміркою Li-ion АКБ граничного значення зарядної напруги. На цій стадії

загальний зарядний струм відключається, і всі комірки продовжують заряджатися, використовуючи індивідуальні ДЗС. Під час цього процесу заряду, комірки Li-ion АКБ заряджаються до досягнення граничного значення зарядної напруги. Коли це значення наближається, зарядний струм комірки поступово зменшується. Друга стадія заряду завершується, коли зарядний струм кожної комірки Li-ion АКБ стає менше заданого значення, і тоді всі окремі ДЗС будуть відключені.

Розряд Li-ion батарей також відбувається у дві стадії. Під час першої стадії застосовується загальний розрядний струм. Проте, якщо напруга на будь-якій комірці Li-ion АКБ знижується нижче попередньо встановленого значення, визначеного під час калібрування для даної комірки, вхід його індивідуального ДЗС активується, з'єднуючись із загальною напругою АКБ. Індивідуальне ДЗС розпочинає процес дозаряду цієї комірки від загальної енергії АКБ.

Такий процес відбувається з кожною коміркою Li-ion АКБ, і він триває до тих пір, поки, в процесі розряду, напруга хоча б на одній комірці не опуститься нижче наперед визначеного мінімально допустимого значення. У цьому випадку розрядний струм вимикається, і завершується другий етап розряду.

Під час розряду Li-ion АКБ, коли оператор підключає зарядний пристрій, спочатку відбувається зарядка батареї загальним струмом від потужного ДЗС 2 (рис. 1).

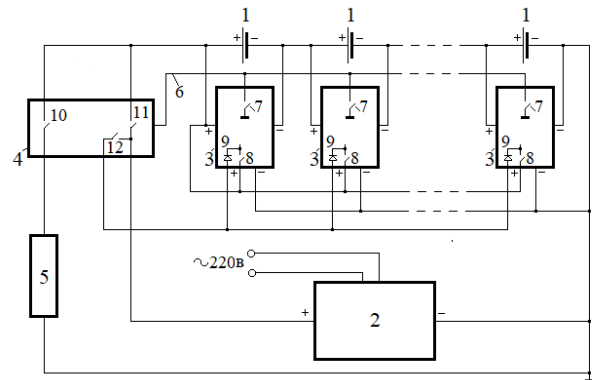


Рисунок 1. *Схема системи активного балансування при заряді – розряді літій-іонних АКБ*

На рис.1 приведено наступні позначення: 1 – комірку Li-ion АКБ; 2 – потужне ДЗС; 3 – індивідуальне ДЗС з блоком контролю та балансування для однієї комірки Li-ion АКБ; 4 – блок управління; 5 – корисне навантаження АКБ; 6 – керуюча шина; 7 – гальванічно розв'язаний замикач; 8 – контакти включення індивідуального джерела зарядного струму, 9 – розв'язуючий діод; 10 – контакти відключення навантаження; 11 – контакти відключення заряду; 12 –

контакти включення режиму заряду для всіх індивідуальних джерел зарядного струму.

Кожна комірка отримує також струм від свого індивідуального ДЗС 3, яке має блок контролю та балансування через контакти включення індивідуального ДЗС 8 та гальванічно розв'язаного діода 9, який з'єднується з контактами включення режиму заряду для всіх індивідуальних ДЗС 12. Цей процес триває до того часу, поки напруга хоча б на одній комірці не досягне граничного значення. Після цього блок контролю та балансування індивідуального ДЗС 3 закриває контакти гальванічно розв'язаного замикача 7. Завдяки блоку управління 4, потужне ДЗС 2 відключається через контакти відключення заряду 11. У той час як загальний струм відключений, комірки Li-ion АКБ, де напруга ще не досягла свого граничного значення, продовжують заряджатися від своїх індивідуальних ДЗС 3, кожне з яких має блок контролю та балансування. Після цього, зарядка кожної комірки Li-ion АКБ триває при малому струмі від блоків контролю та балансування у режимі балансування. Під час розряду батареї, коли оператор натискатиме на педаль акселератора, розрядний струм буде спрямовано на корисне навантаження АКБ 5 через контакти відключення навантаження 10. Балансування може тривати необмежений час, оскільки струм зарядки від невеликих зарядних пристроїв $I_{ЗП}$ визначається [12-15]:

$$I_{ЗП} = \frac{U_{ЗП} - U_{БА}}{R},$$

де $U_{ЗП}$ – гранична стабілізована напруга кожного малопотужного зарядного пристрою, що дорівнює гранично-допустимій зарядній напрузі комірки Li-ion АКБ;

$U_{БА}$ – напруга на банку акумулятора;

R – опір зарядного кола.

В процесі балансування зарядний струм зменшується пропорційно наближенню напруги на комірках Li-ion АКБ до її верхнього гранично допустимого значення. Таким чином, процес балансування продовжується до тих пір, поки зарядний струм комірки Li-ion АКБ не досягне нижнього порогового значення, наприклад, менше 10% від номінального зарядного струму.

Пропонований метод активного балансування під час заряду - розряду Li-ion АКБ, який використовує балансуєчий зарядний пристрій, потребує економічних індивідуальних ДЗС, наприклад, для АКБ ємністю 100 А·год. Потужність цих зарядних пристроїв становить приблизно 5-15 Вт на комірку.

При розряді Li-ion АКБ пропонований спосіб буде працювати аналогічно, як і при їх заряді. Єдина відмінність лише у тому, що схеми

контролю та балансування напруги в індивідуальних ДЗС для кожної комірки Li-ion АКБ стежать за напругою на комірках і видають команду на відключення загального розрядного струму, як тільки напруга на хоча б одній комірці опускається до мінімально допустимого значення.

Висновки

Проведені дослідження щодо ефективного управління та використання Li-ion АКБ дозволяють сформулювати наступні висновки.

Запропоновано спосіб активного балансування при заряді - розряді Li-ion АКБ, приведено його схемну реалізацію, описано конструкцію та принцип роботи запропонованого способу.

Розроблено схему системи активного балансування при заряді - розряді Li-ion АКБ.

Використання запропонованого способу активного балансування під час заряду - розряду Li-ion АКБ дозволяє спростити алгоритм роботи зарядно-розрядно-балансируючого пристрою, поліпшити його схемну та конструктивну реалізацію, підвищити надійність і ККД його роботи, а також покращити співвідношення щодо ціни та якості даного пристрою.

Література

- [1]. Borodenko Y.M., Hnatov A.V., Arhun S.V., Sokhin P.A. (2023) Energy aspects of automobile transport development. *Automobile Transport*, (53). P.37-50. DOI: 10.30977/AT.2219-8342.2023.53.0.05
- [2]. Мигаль, В., Аргун, Ш., Гнатова, А., Гнатова, Г., & Сохін, П. (2022). Інтелектуальне діагностування транспортних засобів. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, (22), 72–80. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2022.22.0.5>
- [3]. Гнатова А.В., Аргун Ш.В., Гнатова Г.А., Сохін П. А. Переобладнання автомобіля з ДВЗ в електромобіль. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. – 2022. – № 21. – С. 22-30. DOI: <https://doi.org/10.30977/VEIT.2022.21.0.1>.
- [4]. Hnatov A.V., Arhun S.V., Hnatova H.A., Sokhin P.A. Technical and economic calculation of a solar-powered charging station for electric vehicles. *Автомобільний транспорт*, Вип. 49, 2021, С. 71-78. DOI: <https://doi.org/10.30977/AT.2019-8342.2021.49.0.05>
- [5]. Borodenko Y., Ribickis L., Zabasta A., Arhun Shch., Kunicina N., Hnatova H., Hnatov A., Patlins A. Konstantins Kunicins. Using the Method of the Spectral Analysis in Diagnostics of Electrical Process of Propulsion Systems Power Supply in

Electric Car. Przegląd Elektrotechniczny. - 2020. - R96. - 10. - P. 47-50. DOI: 10.15199/48.2020.10.08

[6]. S Arhun, Yu Borodenko, A Hnatov, A Popova, H Hnatova, N Kunicina, A Ziravecka, A Zabasta, L Ribickis. Choice of Parameters for the Electrodrive Diagnostic System of Hybrid Vehicle Traction // Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. - 2020. - Т. 57. - №. 4. - С. 3-11. DOI: <https://doi.org/10.2478/lpts-2020-0017>.

[7]. Гнатів А.В., Аргун Ш.В., Дзюбенко О.А., Тарасова В.В., Левенець А.О., Пілявець О.О. Енергозбереження в системах електропостачання. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології: електронне наукове спеціалізоване видання. – Х.: ХНАДУ, 2018. – № 13. – С. 80-89.

[8]. Hnatov, A., Arhun, S., & Ponikarovska, S. (2017). Energy saving technologies for urban bus transport. International journal of automotive and mechanical engineering, 14, 4649-4664. doi: <https://doi.org/10.15282/ijame.14.4.2017.5.0366>.

[9]. Arhun, S., Hnatov, A., Mygal, V., Khodyriev, S., Popova, A., & Hnatova, H. (2020, April). An Integrated System of Alternative Sources of Electricity Generation for Charging Urban Electric Buses. In 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) (pp. 619-624). IEEE.

[10]. Патент на корисну модель 155218 Україна, Н01М 10/44, Н02J 7/00, Н02J 7/02. Балансуючий зарядний пристрій для літій-іонних акумуляторних батарей / Дзюбенко О. А., Двядненко В.Я.; заявник та патентовласник Харківський нац. автом. дорожн. ун-т.— № а202302281; заявл. 15.05.2023; опубл. 31.01.2024, Бюл. №5.

[11]. Scott, K., & Nork, S. (2019). Active battery cell balancing. Analogue Devices. Analog Devices (pp. 1-4).

[12]. Hnatov, A., & Arhun, S. (2022). Electric vehicles and energy-saving technologies – master’s degree program under the Erasmus project Cybphys. Automobile Transport, (51), 85–95. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2022.51.0.09>

[13]. Гнатів А. В., Аргун Ш. В., Багач Р. В., Гнатова Г.А., Тарасова В. В., Ручка О. О. Аналіз найбільш поширених методів визначення стійкості енергетичних систем. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології: електронне наукове спеціалізоване видання. Х.: ХНАДУ, 2021. № 20. – С. 17-26. DOI: <https://doi.org/10.30977/VEIT.2021.20.0.02>

[14]. Hnatov A., Arhun Shch., Bagach R., Nechaus A. Tarasova V., Ruchka O., Don A., Patlins A. Electrical power unit of the transformer oil centrifugal cleaning unit. Автомобільний

транспорт. – Х.: ХНАДУ. – 2021. – Вип. 48. – С. 101-112. DOI: 10.30977/AT.2219-8342.2021.48.0.101

[15]. Dziubenko O., Arhun Shch., Hnatov A., Ponikarovska S. Choosing the method for determining angular motions of motor vehicle electromechanical subassemblies, EAI Endorsed Transactions on Energy Web. 2021. Vol. 8(32). e7. P. 1-8. <https://eudl.eu/doi/10.4108/eai.1-7-2020.165999>

Відомості про авторів

Андрій Гнатів, д.т.н, професор, завідувач кафедри автомобільної електроніки, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, [ORCID ID: 0000-0003-0932-8849](https://orcid.org/0000-0003-0932-8849)



Павло Сохін, аспірант, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-2823-2239](https://orcid.org/0000-0002-2823-2239).



Ольга Ульянець, асистентка кафедри автомобільної електроніки, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-9384-4557](https://orcid.org/0000-0002-9384-4557).



ЕФЕКТИВНЕ ОЧИЩЕННЯ ПАЛИВА ВІД АЛЮМОСИЛІКАТІВ ЗА ДОПОМОГИ PID-РЕГУЛЯТОРУ

Врублевський Р.Є. 

Херсонська державна морська академія, Україна

Анотація

Ключові слова: PID-регулятор, очистка палива, сепаратор, алюмосилікати.

У даній роботі розглянуті можливості удосконалення системи очищення палива від алюмосилікатів за допомоги впровадження системи оптимізації очищення палива на основі PID-регулятора. Управління сепаратором дозволить оптимізувати ефективність сепаратора шляхом управління потоком і температурою подачі в залежності від витрати з сервісного бака. Витрата вимірюється постійним потоком в переливній труби назад в відстійник. В якості альтернативи, рівень в сервісному резервуарі використовується для вимірювання витрати для управління сепаратором. Коли вміст твердих домішок в паливі, яке знаходиться в бункері, перевищує допустимі норми, буде паралельно використовуватися два сепаратори, щоб зменшити витрату та підвищити ефективність очищення палива. Якщо зменшення потоку неможливе, керування сепараторами буде здійснюватися послідовно.

Вступ

Алюмосилікати використовуються в установках каталітичного крекінгу в якості каталізаторів. Розмір гранул каталізатора має порядок 40...160 мкм, але в процесі крекінгу утворюються найбільш небезпечні для двигунів частки розміром 10...20 мкм, що осідають у залишкових фракціях (slurry oil), які в процесі приготування залишкових палив у ряді випадків підмішуються до них. Каталізаторний пил в основному складається з окису алюмінію Al_2O_3 і двоокису кремнію SiO_2 , іноді в ньому присутній силікат алюмінію Al_2SiO_3 . Ці сполуки представляють собою дуже тверді речовини й тому виступають, по суті, «пречудовим» абразивом. Попадання їх разом із паливом у двигун призводить до збільшення швидкості зносу в 100 й більше разів [1-3].

Мета. Розробити ефективну систему управління оптимізацією очищення палива на основі PID регулятора.

Викладення основного матеріалу

Система очищення розроблена для оптимальної роботи як при високих, так і при низьких витратах при стабільно високих температурах. Занадто низька температура і занадто високий потік через сепаратори під час очищення палива призведе до недостатнього видалення води, абразивних часток, шламу та інших забруднень. Слід дотримуватися рекомендацій щодо фактичної експлуатації від виробників сепараторів.

Температуру у сепараторах завжди слід підтримувати якомога вище. Чим вище температура, тим краще очищення.

Щоб температура була правильною і стабільною, пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор (PID-контролер) (рис. 1) повинен бути встановлений на підігрівачі до сепаратора.

Якщо встановлено лише функціональний регулятор P, він, швидше за все, спричинить надмірні перепади температури і, отже, занадто низька або занадто висока температура палива на вході в сепаратор. Якщо температура на вході занадто висока, це може спричинити закипання контрольної води в сепараторі.

Управління сепаратором дозволить оптимізувати ефективність сепаратора шляхом управління потоком і температурою подачі в залежності від витрати з сервісного бака. Витрата можна виміряти постійним потоком в переливній труби назад в відстійник. В якості альтернативи, рівень в сервісному резервуарі може використовуватися для вимірювання витрати для управління сепаратором.

В'язкість дистилатів, нових видів палива з вмістом менш як 0,1 % сірки (ULSFO) і важкого палива (HFO) дуже різна. Тому важливо звернути увагу на рекомендовану температуру для різних типів палива під час процесу очищення. Якщо паливо нагрівається занадто високо, в'язкість палива може стати занадто низькою. В'язкість на вході в двигун завжди повинна бути вище 2 cSt.

Чим нижчий потік через сепаратор, тим довше паливо залишається в сепараторі, і тим краще очищується паливо. Зазвичай паливний сепаратор має схему для споживання палива на 100% навантаження двигуна плюс постійні значення для різних запасів. Щоб мати можливість

очистити паливо до відповідного рівня, сепаратор повинен мати можливість обробляти приблизно таку кількість палива: 0,23 л/кВт по відношенню до CFR (сертифікована витрата). CFR повинен бути наданий відповідно до CEN CWA 15375 або подібного.

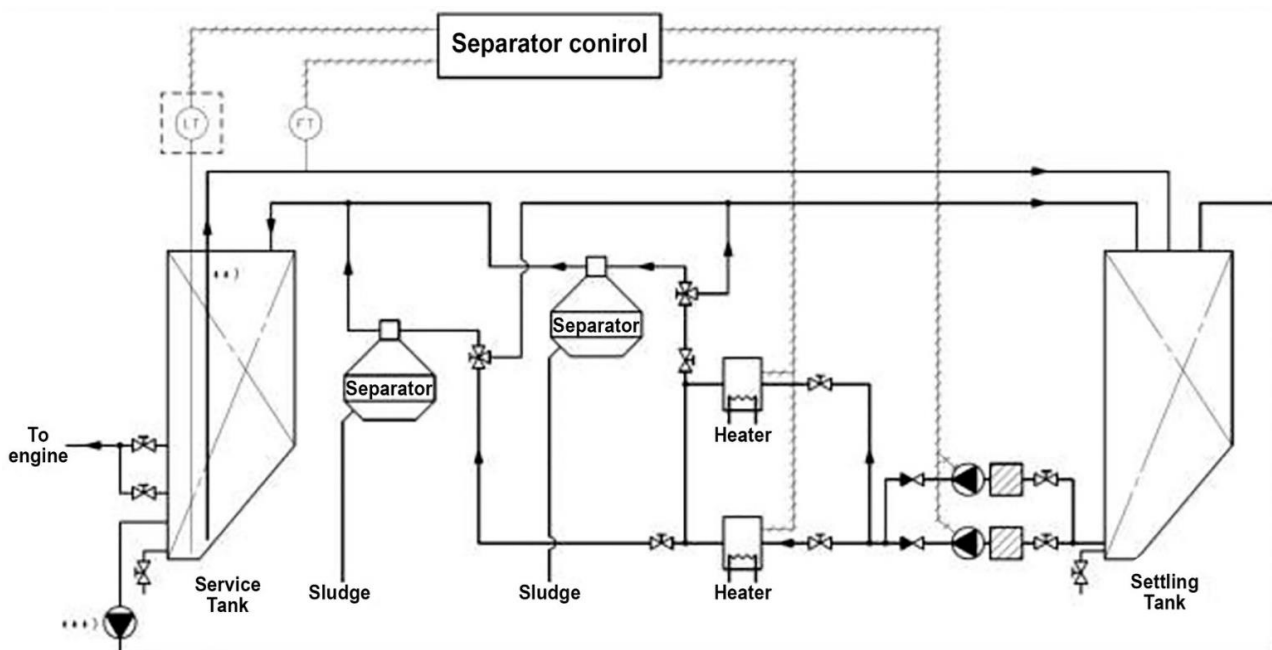


Рисунок 2. Система оптимізації очищення палива на основі PID регулятора

Висновки

Оскільки двигун рідко працює при 100 % навантаженні, існує великий потенціал для підвищення ефективності розділення за допомогою автоматичного регулювання потоку щодо фактичного споживання палива (PID регулятор). Крім того, коли вміст твердих домішок в паливі, яке знаходиться в бункері, перевищує 25 ppm Al + Si, буде паралельно використовуватися два сепаратори, щоб зменшити витрату та підвищити ефективність очищення палива. Якщо зменшення потоку неможливе, керування сепараторами буде здійснюватися послідовно.

Література

[1]. Калугин В.Н., Логишев И.В. Использование морских топлив на судах: учеб. пособие. – Одесса: ОНМА, 2010. – 191с.

[2]. Логишев И.В., Голіков О.О., Зав'ялов О.А. Технології використання палив у суднових енергетичних установках: навчальний посібник. – Одесса: ОНМА, 2011. – 135 с.

[3]. Rolsted, H., Charlotte, R., Mats, É.B., & Ab, T. (2013). Onboard Fuel Oil Cleaning, the ever neglected process How to restrain increasing Cat-fine damages in two-stroke Marine Engines.

Відомості про авторів

Роман Врублевський, к.т.н, доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-8686-3488](https://orcid.org/0000-0001-8686-3488).



АЛЬТЕРНАТИВНА ЗАМІНА ФРЕОНУ R22

Матвеев В.В. 

Херсонська державна морська академія, Україна

	Анотація
Ключові слова: RGas, заміна, теплоємність, холодопродуктивність, модифікований, змішаний, гідрофторвуглець, Монреальській протокол	<i>Проаналізовано актуальність заміни фреону R22 в холодильній техніці. Робота висвітлює можливості заміни обладнання або пошуку альтернативного холодоагента з мінімальними витратами. Описуються різні гідрофторвуглецеві холодоагенти, доступні для заміни R22, з особливим акцентом на продукт RGas22 та його переваги. Порівняння заміників R22 допомагає зрозуміти, що заміна на RGas22 може бути ефективним і економічно вигідним рішенням для підвищення терміну служби обладнання та зменшення витрат енергії. Загалом, робота підкреслює, що заміна на сучасний холодоагент є пріоритетним методом зменшення витрат у машинобудуванні, а RGas22 може бути найкращою альтернативою.</i>

Вступ

2019 рік став переломним для холодильної галузі. Згідно з набранням чинності Кігалійської поправкою до Монреальського протоколу, з 1 січня 2019 року вводиться заборона на промислове використання фреону R 22. Це змушує власників обладнання, що працює на цьому холодоагенті, і виробників фреону R 22 шукати альтернативи.

Актуальність досліджень

Альтернативі заміни фреону R22 як що вдуматися, не так вже й багато.

Перше, що можна зробити, це замінити обладнання на нове, яке працює на сучасних гідрофторвуглецевих холодоагентах. Звичайно, це спричинить за собою серйозні витрати.

Другий варіант - знайти заміну R22 і переобладнати на нього свою техніку з мінімальними витратами.

І третій варіант (з порушенням поправки до Монреальського протоколу) - просто дочекатися кінця року і продовжувати купувати R22 за складними, сірими схемами за величезні гроші.

Викладення основного матеріалу

На сьогоднішній день розроблено достатню кількість гідрофторвуглецевих холодоагентів для заміни R22. Потрібно лише вибрати виріб, який максимально відповідає специфіці вашого обладнання.

Серед сучасних холодоагентів ГФУ четвертого покоління можна виділити фреони R 417 (A, B, C, D), R422D, R438A і R458A. Компанії провідні

дистриб'ютори холодоагентів також запропонували своє рішення по заміні R22 – продукту RGas22, який є ефективним і продуктивним, а також позитивно впливає на навколишнє середовище.

Основними перевагами RGas22 є:

- сумісність як з синтетичними, так і з мінеральними маслами, що значно оптимізує процес модернізації;
- Більш висока теплоємність і теплота пароутворення, ніж R22
- Практично ідентична холодопродуктивності R22 ($\pm 3,0\%$), тобто при заміні R22 на RGas не відбувається втрати холодопродуктивності вашого обладнання;
- Можливість роботи при більш низьких температурах і тисках в системі компресора і впорскування газу
- зниження механічних коливань в компресорі, згладжування пульсацій електричного струму в обмотках;
- Більша енергоефективність у порівнянні з R22 (використання RGas22 знижує енергоспоживання холодильної системи на 7...24 %);
- Більш високий коефіцієнт охолодження, ніж R22 (ваше обладнання буде виробляти більше холоду з меншою кількістю енергії).

Перераховані вище переваги знижують витрати і збільшують термін служби вашого обладнання.

Для більшої наочності наведемо порівняльну таблицю RGas22 і двох основних заміників R22.

Таблиця 1. Властивості холодоагентів подібних R22

R417A	RGas 22	R422A
Склад		
Модифікований змішаний гідрофторвуглець (HFC) холодоагент, що складається з R134a (50%), R125 (46,6 %) і R600 (3,4%)	Модифікований змішаний гідрофторвуглець (HFC) холодоагент, що складається з R32 (20,5%), R125 (4%), R134a (61,4%), R227ea (13,5%), R236fa (0,6%) і добавка, що забезпечує змішувальність з мінеральним маслом	Модифікований змішаний гідрофторвуглець (HFC) холодоагент, що складається з R125 (85,1 %), R134a (11,5%) і R600a (3,4%)
Масла, сумісні з холодоагентом		
Мінеральні, алкілбензолні, синтетичні масла	Мінеральні, синтетичні масла	Мінеральні, алкілбензолні, синтетичні масла
Холодильні системи		
Середньотемпературні системи	Високо- і середньотемпературні системи	Низько- і середньотемпературні системи
Сфера застосування		
Промислові та комерційні холодильні системи, системи кондиціонування повітря, комерційні та промислові чилери, комерційне обладнання, теплові насоси, льодогенератори		
Озоноруйнівний потенціал		
0		
Клас небезпеки за ASHRAE (Американське товариство інженерів з опалення, охолодження та кондиціонування повітря)		
A1		

Висновки

З вищевикладеного можна зробити висновок, що напрям заміни старих звичайних холодоагентів в холодильній техніці, є одним з пріоритетних методів для найменших витрат у машинобудуванні. Заміна на холодоагент RGas є найліпшою альтернативою.

Література

- [1]. <https://todayshomeowner.com/hvac/guides/r22-replacement/>
- [2]. <https://jewellmechanical.com/3-options-for-r22-freon-replacement/>
- [3]. <https://www.freon.com/en/products/refrigerants/mo29>
- [4]. <https://hdsupplysolutions.com/s/R22-alternatives>
- [5]. <https://legacyac.com/things-to-be-aware-of-when-considering-r-22-replacement-refrigerants/>

[6]. <https://www.petro.com/cooling/r22-refrigerant-replacement>

[7]. <https://www.monarchhomeexperts.com/blog/2023/april/what-are-the-latest-alternatives-to-freon/>

[8]. <https://www.quora.com/What-is-the-replacement-refrigerant-of-R-22>

[9]. <https://www.trane.com/residential/en/resources/glossary/what-is-r22/>

Відомості про авторів

Віктор Матвеев, механік I-го розряду, старший викладач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-3826-7996](https://orcid.org/0000-0002-3826-7996)



ПРОВЕДЕННЯ ХРОНОМЕТРАЖНИХ ВИМІРЮВАНЬ НА МАРШРУТІ ЗА ДОПОМОГОЮ БОРТОВОГО ПРИСТРОЮ

Кульбашна Н.І. [✉], Гавришченко С.О.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

Анотація

Ключові слова: оборотний рейс, складники рейсу, хронометражні вимірювання, бортовий пристрій.

Запропоновано автоматизувати процес проведення хронометражних вимірювань часу оборотного рейсу на маршрутах міського електротранспорту із застосуванням бортового пристрою, який зчитує інформацію про режими руху транспортного засобу. За допомогою відповідних блоків створюється підрахунок швидкості і часу руху у різних режимах: розгоні, вібрування і гальмування, а також фіксація часу стоянки, для чого в систему введено додатковий блок, що підраховує затримку на зупиночному пункті під час відкриття-закриття дверей.

Вступ

Підприємства міського електротранспорту забезпечують обслуговування пасажирів в умовах максимального використання матеріальних ресурсів і існуючих обмежень на перевізний процес. Ці обмеження віддзеркалюються у встановленні значень оборотного рейсу і експлуатаційної швидкості на маршрутах, зменшення якої призводить до використання більшої кількості рухомого складу. З цього погляду трамвайно-тролейбусні підприємства мають замислюватися про мінімізацію витрат, пов'язаних з часом обороту рухомого складу на маршрутах.

Актуальність досліджень

Визначення часу оборотного рейсу по маршруту є однією з найважливіших завдань служби руху. Правильно встановлена його тривалість не тільки визначає можливу експлуатаційну швидкість, а й забезпечує регулярність перевезень, безпеку руху рухомого складу [1, 2]. З іншого боку час рейсу є головною техніко-експлуатаційною характеристикою для розробки і складання маршрутних розкладів [3].

Зазвичай загальну тривалість оборотного рейсу оцінюють за інформацією виконаного руху із зведень системи диспетчерського контролю. Проте визначення тривалості складників оборотного рейсу, як необхідних факторів пошуку резервів, не можливе. Також GPS-навігація через похибки алгоритму розрахунку швидкості, виконує вимірювання із певним запізненням, що знижує точність.

Виходячи з потреби пошуку резервів експлуатації трамвайно-тролейбусні підприємства організовують проведення хронометражних

вимірювань з метою отримання тривалості складників оборотного рейсу, а саме: часу руху та стоянок на зупиночних пунктах, кінцевих станціях, затримок на перехрестях і світлофорних об'єктах, які фіксують відповідно місць їхнього розташування. Однак проведення хронометражних вимірювань на маршрутах вимагає залучення значної кількості обліковців, що має певні труднощі і, до того ж, хронометражні вимірювання характерні тільки на момент обстеження, що знижує повноту інформації у разі змінювання умов руху на маршруті. Тому автоматизація процесу хронометражних вимірювань на маршрутах міського електротранспорту із застосуванням бортового пристрою, що надає змогу розширити можливості раціонального використання ресурсів трамвайно-тролейбусних підприємств, є актуальним питанням на сьогодні.

Викладення основного матеріалу

На деяких видах транспорту використовують пристрої, що можуть бути пристосовані для автоматизації хронометражних вимірювань. Наприклад, на маршрутних автобусах використовують тахографи, на які записують швидкість транспортного засобу, місця і час зупинок та зупинок, пов'язаних із режимом відпочинку водія. Проте використання тахографа не дає можливості співставити карту маршруту із затримками і зупинками протягом рейсу, що потребує додатково використання відеокамери або програмного забезпечення [4]. На автомобільному транспорті застосовують пристрій Racelogic для запису параметрів руху, які за допомогою GPS-трекеру можуть передаватися в реальному часі до пристроїв аналізу даних диспетчерського пункту: змінювання швидкості руху, положення і прискорення транспортного засобу уздовж маршруту

і детально аналізуватися. Однак на сьогодні Racelogic використовують для оцінки режимів руху автомобілів [4].

У роботі для вимірювання складових оборотного рейсу пропонується використовувати пристрій, який описується у патенті [5]. У цьому пристрої для підрахунку довжини, часу руху і часу стоянки застосовані датчики швидкості, які розташовують на колесах рухомого складу. Спосіб заснований на обчисленні кутової швидкості і прискорення коліс, вимірюванні лінійного прискорення і обчисленні швидкості його руху в різних режимах. Пристрій містить блок

формування сигналу режиму руху транспортного засобу, блок визначення максимальної і мінімальної швидкостей коліс, блоки обчислення швидкості і прискорення транспортного засобу. За допомогою відповідних блоків створюється підрахунок часу руху у режимах розгону, вибігу, гальмування і стоянки. Пристосування цього пристрою для можливості проведення хронометражних вимірювань за складниками оборотного рейсу і виокремлення зупинок на зупиночному пункті потребує введення додаткового пристрою, пов'язаного з системою відкриття і закриття дверей рухомого складу. Запропонований пристрій представлений на рисунку 1.

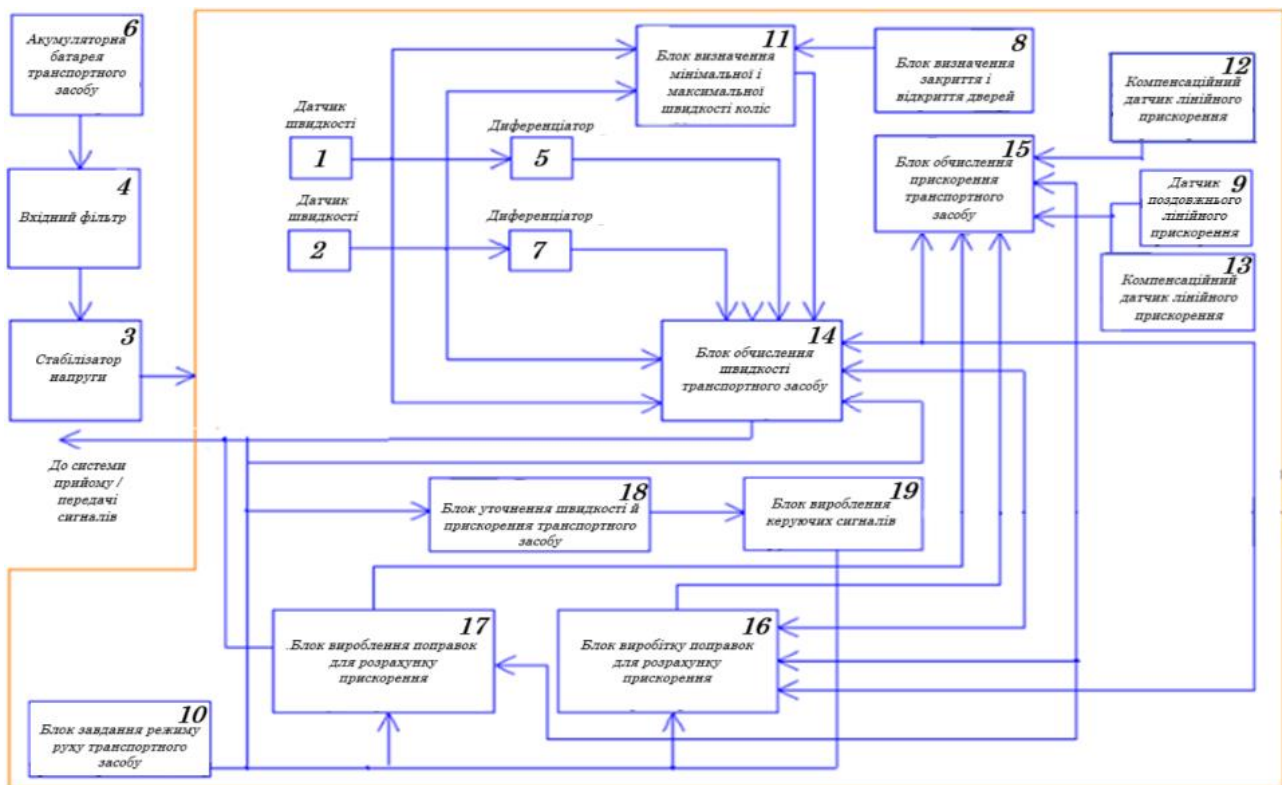


Рисунок 1. Пристрій для зчитування інформації про режими руху транспортного засобу

Пристрій (рис. 1) містить два датчики швидкості колеса 1 і 2, виходи яких з'єднані з відповідними входами двох диференціаторів 5 і 7, датчик поздовжнього лінійного прискорення 9, блок завдання режиму руху транспортного засобу 10, блок визначення мінімальної й максимальної швидкостей коліс 11, два компенсаційних датчики лінійних прискорень 12 і 13, блоки обчислення швидкості 14 і прискорення 15 транспортного засобу, два блоки виробітку поправок для розрахунку прискорення транспортного засобу 16 і 17, блок вибору моменту уточнення швидкості й прискорення транспортного засобу 18, блок вироблення керуючих сигналів 19. Для забезпечення живлення пристрою на борту рухомого складу запропоновано схему доповнити системою живлення, яка буде здійснюватися від акумуляторної батареї 6 рухомого складу через

вхідний фільтр 4, що виключає вплив імпульсних перешкод, які виникають у ланцюгах керування рухомого складу в моменти пуску й гальмування, і стабілізатор напруги 3, а також блок визначення закриття-відкриття дверей 8. Додатковий блок 8, який запропоновано ввести до пристрою для визначення часу затримок на зупиночних пунктах, працює так. На зупинках по маршруту під час відкриття дверей у салоні рухомої одиниці водій користується тумблером. Індикація положення виконавчих пристроїв відкриття й закриття дверей здійснюється в салоні за допомогою світлодіодних ламп, встановлених на пульті керування водія. По завершенню виходу й посадки пасажирів, водій вмикає тумблер закриття дверей. Передача сигналу на бортовий комп'ютер виробляється протягом нетривалого часу, регульованого в інтервалі від

2 до 12 с до початку руху рухомої одиниці. Після цього система керування дверми автоматично відмикається й переходить у режим очікування, до надходження сигналу закриття дверей на наступному зупиночному пункті. Для вірогідності шкали відліку програма дешифрування даних вимагає на початку вимірів записати тональний сигнал «нуль стану» об'єкта контролю. Тобто перед виконанням вимірювань на маршруті водій повинен хоча б один раз відкрити й закрити двері рухомого складу, для фіксації на комп'ютері сигналу відліку, що у тональному кодуванні відповідає стану початку руху з кінцевої станції.

Передача повідомлень про рух, час стоянки надходить до бортового комп'ютера, а фіксація пройдених відрізків шляху здійснюється через систему позиціонування рухомих одиниць автоматизованої системи диспетчерського керування. Завдяки цій системі сигнали про рух і стоянку впродовж всього маршруту можуть передаватися до центрального диспетчерського пункту. Рекомендується застосовувати найбільш прогресивні автоматизовані системи диспетчерського керування, в яких використовують GNSS-трекери. У разі передачі інформації на сервер моніторингу, отримані дані обробляються і реєструються у базі даних. Інформація може бути проаналізована системою підтримки і прийняття рішення, яка надає інженерові служби руху відповідні рекомендації щодо можливості зменшення часу руху на маршруті.

Висновки

З метою підвищення повноти і достовірності хронометражних вимірювань на маршрутах міського електротранспорту пропонується бортовий пристрій, який в автоматичному режимі уможливіть визначення тривалості складників оборотного рейсу, а саме часу руху, стоянки на зупиночних пунктах і кінцевих станціях. Розглядається можливість накопичення інформації про рух на бортовому комп'ютері з передачею інформації до центрального диспетчерського пункту з обробкою, аналізом даних і прийняття рішення щодо можливих варіантів зменшення оборотного рейсу. Перспективою подальших досліджень є розробка алгоритму обробки і аналізу отриманих даних.

Література

- [1]. Кульбашна Н.І. Дослідження, що пов'язані з підвищенням експлуатаційної швидкості на маршруті. *Проблеми, перспективи та нормативно-правове забезпечення енерго-, ресурсозбереження в житлово-комунальному господарстві* (10-14 червня 2013 р.). Алушта: ХНАМГ, 2013. С. 168–170.
- [2]. Кульбашна Н.І. Горбуля С.М., Карачича А.І. Виявлення резервів організації експлуатації при роботі міського електротранспорту на лініях. *Проблеми, перспективи та нормативно-правове забезпечення енерго-, ресурсозбереження в житлово-комунальному господарстві* (13-17 червня 2011 р.) Алушта, АР Крим: ХНАМГ, 2011. С. 200–201.
- [3]. Давідич Ю.О. Розробка розкладу руху транспортних засобів при організації пасажирських перевезень: навч. посіб. Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. Харків : ХНАМГ, 2010. 345 с.
- [4]. Кульбашна Н.І. Концепція бортового пристрою для хронометражних вимірювань на маршрутах міського електротранспорту. *Стан та перспективи розвитку електричного транспорту* (23-25 листопада 2022 р.) Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. С. 127-129.
- [5]. Пат. 51110 А Україна, МПК7 G08G1/00. Пристрій для вимірювання швидкості автомобіля / Серіков С.А., Алексієв В.О., Костюченко С.М.; заявник та патентовласник Харківський національний автомобільно-дорожній університет. – № 2002010132; заявл. 03.01.2002 ; опубл. 15.11.2002. Бюл. №11.

Відомості про авторів

Надія Кульбашна, к.т.н., доцент, доцент кафедри електричного транспорту, Харківського національного університету міського господарства імені О.М.Бекетова, Харків, Україна, [ORCID ID: 0000-0003-1551-1500](https://orcid.org/0000-0003-1551-1500).



Святослав Гавришенко, магістрант спеціальності Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна.



MATHEMATICAL MODEL OF YaMZ-650 TURBOCHARGER AS A DIAGNOSTIC OBJECT

Dmytro Borysiuk 

Vinnitsia National Technical University, Ukraine

Abstract

Keywords:

mathematical model, diagnostics, internal combustion engine, turbocharger, diagnostics matrix, block diagram, failure, failure symptom, Boolean function.

Concept of modern automobile transport development provides the increase of the engine power with the reduction of fuel consumption and emissions of the combustion products. To achieve the set goals the internal combustion engines are equipped with turbochargers, boost intercoolers, electric power storage systems of the fuel supply and electronic control elements. Nowadays in greater part of cases faults of the boosting systems of the internal combustion engines are detected by the external features. It is also possible to improve the quality of the engines boosting systems diagnostics by means of developing new mathematical models of their functioning. Turbocharger YaMZ-650, which is the part of the boosting system of diesel engines YAMZ-650.10, YaMZ-6501.10 and YaMZ-6502.10 are selected as the object of the diagnostics. For turbocharger YaMZ-650 diagnostic matrix is composed, it comprises the list of failures and features of failures. By means of the developed mathematical model it is possible to perform efficient diagnostics of the turbocharger YaMZ-650. In the process of mathematical model development, it was taken into consideration that the inverse transform of the amount of the failure symptoms into the amount of the structural parameters (failures) of the object was single-valued.

Introduction

Considerable growth of the number of transport vehicles, increase of the brands and models, frequently of foreign production, complication of their construction and adaption of the requirements of the normative documentation, regarding the technical state of the transport vehicles to world standards needs the development of modern methods and tools for the diagnostics of their blocks and parts [1].

Trends of modern automobile building branch are directed on constant improvement of the automobile transport operation efficiency, in particular – improvement of the characteristics of the engine power and reduction of the fuel consumption and harmful substances emissions with the exhaust gases [2, 3]. One of the design solutions, enabling to improve considerably these parameters is the usage of the turbochargers.

Relevance of research

Turbocharging system of motor-transport diesel engines in its classic realization consists of the engine, turbine and compressor. There is a

mechanical coupling between the turbine and compressor, there exists gas coupling between the turbine and engine. Although the construction arrangement is rather simple and operation principle of turbocharger is not complex, determination of its technical state in the process of operation is not an easy task. Failures of any of its element which are progressively developing in the process of operation and are not visible, are revealed at certain operation modes and may cause failure of the turbocharger or engine on the whole.

Complexity of the turbocharger diagnostics is determined by numerous reasons. First, indices of the operation efficiency of turbocharger depend both on technical and mode characteristics of the engine and turbocharger itself. Secondly, nowadays, there are no reliable tools for the control of the technical state of the turbocharger in the process of operation. Determination of the most informational functional parameters of the turbocharger, determination of the limiting values, elaboration of the methods and means for their control is the primary target of the technical service of the internal combustion engines.

In spite of the fact that numerous scientific studies are devoted to the problems of turbochargers

reliability and their operation conditions [4 – 9], complexity of the construction, low quality of manufacture and application of operational materials, incorrect operation causes premature failures, worsening technical-operational qualities of the engine – greatly decreases the power and increase fuel consumption and hazardous substances emission with the exhausted gases.

Statistics of failures of separate blocks and units of the automotive internal combustion engines shows that 45% of all failures are the failures of the fuel and air supply system [10]. Thus, the studies, aimed at improvement of the methods and means of air supply systems of automotive engines with turbine inflate diagnostics in the process of technical maintenance is urgent scientific engineering problem.

Presentation of the main material

Each turbocharged engine is characterized by a certain noise level. That is why, many failures can

be detected when the normal noise changes. If the noise becomes sharper, the cause of the failure may be air leakage (between the turbocharger and inlet manifold) or exhaust gases, also it may be the fault of the rotating axle. Intermittent noise can be explained by the pollution of the turbocharger or operation at very low mode relatively the loading. Emergence of the vibrations may indicate the damage of the rotation axle. Sharp decrease of the noise level, accompanied by the emergence the black or dove smoke at the exhaust shows the total breakdown of the compressor. In all similar cases the engine must be stopped to avoid more serious damage of the engine or turbocharger.

Due to the automation of the logic process of the diagnosis statement the above-mentioned faults of turbocharger can be avoided.

Solution of the problem of automation of the logic process of the diagnosis establishment requires the development of the models of turbocharger elements as the objects of the diagnosis, describing on one mathematical level the connections between the infinite sets of possible faults and values of diagnostic parameters.

Replacement of the object of diagnosis by the model is connected with the allocation of basic, important for diagnosis establishment elements and properties, connected with the task of determining of the real technical state of the objects. Certain number of elements and connections of the object, very important from the point of view of its functioning as a device, designed for execution of certain work, become second rate and in the process of development the model of technical device, as the object of diagnostics, may be excluded.

Replacement of the real technical devices by their idealized models enables to use various mathematical models. Under mathematical model of the object of diagnostics, numerous analytical, logic, statistical graphic and any qualitative relation, connecting output parameters of the object with its input and internal parameters are meant.

Most universal model of the object of diagnostics is its representation in the form of the «black box», input and output parameters of which have finite set of values. It is supposed that all possible states of the object form finite set of states. In this case the object is a «black box» not because its internal structure and parameters are not completely known, but because the ban is imposed on the access to the structure and parameters, and the state of the object can be determined only studying its output parameters (without dismantling).

For the presentation of the object of diagnostics in the form of the «black box» it is necessary to set (Fig. 1):

- number of all input actions Y from stimulating devices and external environment;
- quantity of all output features of failures S ;
- quantity of all failures o of diagnostics X ;
- operator A , which converts quantities X and Y into quantity S

$$S = A\{Y, X\}. \tag{1}$$

Taking into account the fact, that in the process of diagnostics, elements of the quantity Y are stabilized (or change according to the set law), the expression (1) is converted into the form:

$$S = A\{X\}. \tag{2}$$

In other words, any output parameter of the object of diagnostics is the function of its technical state at this state of inputs.

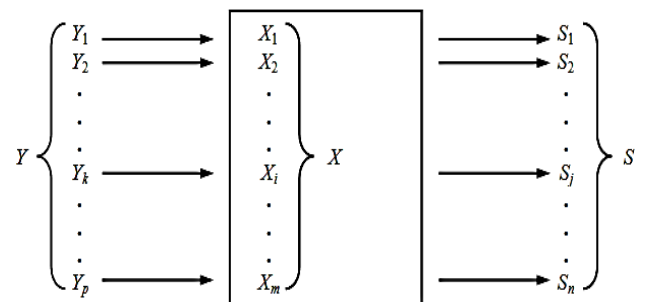


Figure 1. Presentation of the object in the form of the «black box»

If the failure of the object of diagnostic $\{X_j\}$ is referred to the output parameters of the automated

system, then the diagnostic problem is formed in the following way: by the known features of the fault $\{S_j\}$ determine the unknown failures of the object of diagnostics $\{X_j\}$.

For the solution of this problem, it is necessary to know the type of operator A , in other words, it is necessary to have the complete description of the connections between all output parameters and all possible states (failures) of the object.

A number of models of the diagnostic objects, which differ one from another by different forms of the description of those connections is described below.

If analytical model of the object of diagnostic is available, the problem the diagnosis establishment in general form is formulated in the following way. By the given features of the fault S_1, S_2, \dots, S_n , obtained as a result of the corresponding measurement, determine the technical state (fault) of the object of diagnostics X_1, X_2, \dots, X_m , if functional dependences between each diagnostic signal and structural parameter are known:

$$\begin{cases} S_1 = \phi_1(x_1, x_2, \dots, x_m); \\ S_2 = \phi_2(x_1, x_2, \dots, x_m); \\ \dots\dots\dots \\ S_j = \phi_j(x_1, x_2, \dots, x_m); \\ \dots\dots\dots \\ S_n = \phi_n(x_1, x_2, \dots, x_m). \end{cases} \quad (3)$$

System of equations is mathematical model of the object of diagnostics, that has m structural parameters and n diagnostic signals (3).

Obvious advantage of the diagnosis establishment, applying analytical model is the possibility of obtaining specific fault of the object of diagnostics, that enables to determine the technical state of the object not only at the moment of diagnostics but, accumulating information, obtained during several diagnostic examinations of the object, analyze the change of the structural parameters in order to forecast its technical state.

However, practical application of such analytical model is limited due to the following reasons:

- type of ϕ_j functions for greater part of nodes and mechanisms has not been determined yet;
- if function ϕ_j does not meet the requirements of the continuousness and differentiation by each of its arguments, that usually occurs in real models, then the solution of the system of equations (3) is connected with great mathematical difficulties;
- greater part of diagnostic parameters cannot be expressed in the form of the analytical functions of structural parameters.

In a number of papers, devoted to the problems of technical diagnostics of the machines and mechanisms, possible technical states (faults) of the units and systems, features of these faults are described in the form of the so-called diagnostic matrices [9 – 16].

From the experience of many years’ service of the engines *YaMZ*-650.10, *YaMZ*-6501.10 and *YaMZ*-6502.10 matrix of turbocharger *YaMZ*-650 diagnostics, these engines are equipped with, is presented in Table 1 [10].

Table 1. Matrix of turbocharger *YaMZ*-650 diagnostics

<i>Fault of turbocharger YaMZ-650</i>	<i>Feature of turbocharger YaMZ-650 fault</i>							
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8
x_1	+	+	-	+	+	+	+	-
x_2	+	-	-	-	-	-	-	-
x_3	+	+	+	+	+	+	+	-
x_4	-	+	-	+	-	-	-	-
x_5	+	-	-	+	-	-	-	-
x_6	+	+	-	-	-	-	-	-
x_7	+	+	-	+	-	-	-	-
x_8	+	+	+	+	+	-	+	+
x_9	+	+	+	+	+	-	+	-
x_{10}	+	+	+	+	-	-	-	-
x_{11}	-	-	+	-	+	-	+	+
x_{12}	-	-	+	-	-	-	-	-
x_{13}	-	-	+	-	+	+	-	-
x_{14}	-	-	-	+	+	+	+	-
x_{15}	-	+	-	-	-	-	-	-
x_{16}	-	-	-	+	+	-	-	-
x_{17}	-	-	-	-	+	-	+	+

In diagnostics matrix the following faults of turbocharger *YaMZ*-650 will be indicated: x_1 – clogging of the air filter; x_2 – faulty charge air cooler (plugged pipes); x_3 – plugged or pinched air intake manifolds (between the air filter and turbocharger); x_4 – plugged or pinched intake manifolds of air charge (between the turbocharger and engine); x_5 – intrusion of foreign objects between the air filter and turbocharger; x_6 – plugging in gas exhaust system; x_7 – air leakage or exhaust fumes leakage between the turbocharger and engine; x_8 –

damaged or plugged turbine nozzle box; x_9 – damaged impeller blades of turbocharger; x_{10} – incorrect operation of the pressure regulation system of turbocharger; x_{11} – plugging of the engine breather; x_{12} – oil consumption; x_{13} – faulty pneumocompressor; x_{14} – insufficient leakproofness of the connection between air filter and turbocharger; x_{15} – plugged or pinched exhaust system; x_{16} – insufficient lubrication of turbocharger; x_{17} – plugged or pinched oil out line.

Features of the above-mentioned faults of turbocharger YaMZ-650 are also input in the diagnostic matrix: S_1 – decrease of the engine power; S_2 – exhaust fumes are of black color; S_3 – exhaust fumes are of grey color; S_4 – noise in turbocharger; S_5 – excessive oil consumption; S_6 – oil presence in air intake pipes of turbocharger; S_7 – oil presence in air pipes after turbocharger; S_8 – oil presence of exhaust manifolds after turbocharger.

As it is seen from the Table 1, each fault is characterized by a certain combination of its features values, which may take two conventional values: «-» or «+».

At the intersection of the i^{th} row and j^{th} column «+» is put, if in case of the i^{th} fault the domain error is observed, otherwise «-» is put.

For the synthesis of such matrix, it is necessary to replace the infinite number of technical states of the object by the finite set of technical states, each of them is connected with certain fault (or their combination) or with the serviceable state (Fig. 2).

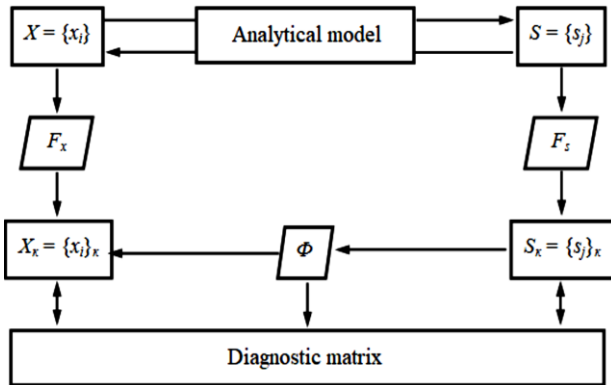


Figure 2. Block diagram of the synthesis of the diagnostic matrix of turbocharger YaMZ-650:

$X = \{x_i\}$ – is infinite number of technical states of the object; $X_k = \{x_i\}_k$ – is finite number of technical states; $S = \{s_j\}$ – is infinite set of the features of the technical states of the object; $S_k = \{s_j\}_k$ – is finite set of the features of the technical states of the object; F_x – is operator, converting quantity $\{x_i\}$ into quantity $\{x_i\}_k$; F_s – is operator, converting quantity $\{s_j\}$ into quantity $\{s_j\}_k$; Φ – is operator, converting the quantity of the technical states of the object into the quantity of the diagnostic parameters

Such transformation can be written in the form:

$$\{x_i\}_k = F_x \{x_i\}, \quad (4)$$

where $\{x_i\}$ – is the set of the features of technical states of the object of diagnostic, each of them may take in general case infinite amount of values; $\{x_i\}_k$ – is finite set of features of technical states of the object of diagnostics each of them may take only two conventional values «-» and «+», which correspond to the absence and presence of the i^{th} fault; $i = 1, 2, \dots, m$; F_x – is operator which converts the quantity $\{x_i\}$ into quantity $\{x_i\}_k$ in the following way: for any i^{th} parameter x_i the value «-» is assigned if the value is in the domain of the admissible values, otherwise the value «+» is assigned.

Transformation of the infinite amount of parameters values of the output processes into the finite amount of diagnostic parameters values can be written in the form:

$$\{s_j\}_k = F_s \{s_j\}, \quad (5)$$

where $\{s_j\}$ – is the amount of features of the output processes, each of them may take in general infinite quantity of values in certain interval; $\{s_j\}_k$ – is finite amount of diagnostic features, each of them may take only two conventional values: «-» or «+»; $j = 1, 2, \dots, n$; F_s – is operator converting quantity $\{s_j\}$ into quantity $\{s_j\}_k$ in the following way: any j^{th} feature s_j is assigned conventional value «-», if the value is in the values domain, which correspond to operation conditions of the object under test, otherwise value «+» is assigned.

As a result of the transformations, carried out, two finite values $\{x_i\}_k$ and $\{s_j\}_k$, are obtained, their elements are connected in a definite way with one another.

In general form this connection can be expressed as:

$$\{s_j\}_k = \Phi \{x_i\}_k, \quad (6)$$

where Φ is operator, converting the amount of the technical states of the object into the amount of diagnostic parameters.

Transformation (6) reflects the functioning of any engineering object as the transformer of the quantity of the structural parameters into the quantity of the diagnostic parameters and is the modification of the model (1).

Transformation (6) can be expanded by means of the system (3).

System of the equation (3) connects each feature of the fault S_j with all structural parameters of the object under the test that reflects the connections between structural parameters and diagnostics signals.

Diagnostic matrix as the model of the objects under the test, shows that it is a tabular form of the equations system recording (1).

Parameter S_1 in the diagnostic matrix can be considered as double-valued Boolean function which depends on the argument x_1 . Boolean function depends on the argument x_1 , if the relation takes place:

$$\begin{aligned} \phi(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_m) \neq \\ \neq \phi(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_m). \end{aligned} \tag{7}$$

As it follows from this definition and Table 1, S_1 essentially depends only on $x_1, x_2, x_3, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9$ and x_{10} .

Dependence $S_1 = \varphi_1(x_1, x_2, x_3, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10})$ is expressed in this case in the form of the logical addition function (disjunction):

$$S_1 = x_1 + x_2 + x_3 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10}.$$

Corresponding analysis of other features of faults enables to write down the system of equations (3) for this matrix of turbocharger *YaMZ-650* diagnostics in the following form:

$$\begin{cases} S_1 = x_1 + x_2 + x_3 + x_5 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10}; \\ S_2 = x_1 + x_3 + x_4 + x_6 + x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{15}; \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ S_7 = x_1 + x_3 + x_8 + x_9 + x_{11} + x_{14} + x_{17}; \\ S_8 = x_8 + x_{11} + x_{17}. \end{cases} \tag{7}$$

All the sequential transformations, leading to the synthesis of the model of the object under the test in the form of the diagnostic matrix, are presented in block-diagram (see Fig. 2). In the case when the model of the object under the test is presented in the form of the diagnostic matrix, diagnostic problem is formulated in the following way.

By the features of faults S_1, S_2, \dots, S_n obtained as a result of diagnostic examination, it is necessary to determine the faults x_1, x_2, \dots, x_m at the moment of examination, if functional dependence between the diagnostic parameters and all the structural parameters, set in the form of the diagnostic matrix or system of equations of the type (7), are known. Each structural parameter and each diagnostic parameter takes only two values: «-» or «+».

It is obvious that for the solution of the diagnostic problem the reverse transformation of the quantity of diagnostic parameters into the quantity of structural parameters is needed, because while making the diagnosis the values of diagnostic parameters are known.

In general form the reverse transformation can be presented by the expression

$$\{x_i\}_k = \Phi^{-1} \{s_j\}_k,$$

or in the expanded form

$$\begin{cases} x_1 = f_1(S_1, S_2, \dots, S_n); \\ x_2 = f_2(S_1, S_2, \dots, S_n); \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ x_m = f_m(S_1, S_2, \dots, S_n). \end{cases} \tag{8}$$

Type of f_m functions can be easily established in each case on the base of the following considerations.

In the diagnostic matrix one of the columns, for instance the first one, will be considered. It is seen from the matrix, that the available fault x_1 causes the simultaneous exit of the features S_1, S_2, S_4, S_5, S_6 and S_7 from their values domain. Values of other diagnostic parameters if only fault x_1 is available remain within the limits of the norm. Thus, x_1 is Boolean function, in this case the conjunction (or function of logical multiplication):

$$\begin{cases} x_1 = S_1 \cdot S_2 \cdot S_4 \cdot S_5 \cdot S_6 \cdot S_7; \\ x_2 = S_1; \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ x_{16} = S_4 \cdot S_5; \\ x_{17} = S_5 \cdot S_7 \cdot S_8. \end{cases} \tag{9}$$

As it is seen from this example, the process of making the diagnosis on the base of the model of the object under the test, expressed by the diagnostic matrix, consists of the following stages:

- by means of the corresponding measurements and transformations (5) features of all faults S_1, S_2, \dots, S_n are defined;
- values of diagnostic parameters are substituted in the system of Boolean functions (8);
- values of all Boolean functions of the faults $x_i (i = 1, 2, \dots, m)$ are calculated, if $x_i = 1$, then i^{th} fault is in the object.

Proceeding from the fact that the object under the test is serviceable only in case when all the faults are missing, the function of its serviceability takes the form:

$$F_p = \overline{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_{17}}. \quad (10)$$

Turning to the block-diagram of the diagnostic matrix synthesis (see Fig. 3) the condition of diagnosis establishing can be formulated in general form: for establishing the diagnosis it is sufficient that the inverse transformation of the quantity of faults features into the quantity of the structural parameters (faults) of the object was single-valued.

If in the process of synthesis of diagnostic matrix this condition is not realized and in the system (8) there are two or more equal functions, then the list of diagnostic parameters should be completed with new parameter, which would enter as the additional argument only in one of the considered equal functions.

Conclusions

1. Turbocharger YaMZ-650, as the object under the test, is presented in the form of the «black box», its input and output parameters have finite set of values.

2. For turbocharger YaMZ-650 diagnostic matrix is composed, the matrix includes the list of faults and features of faults. Diagnostic matrix, as the model of the object under the test, shows that it is a tabular form of the recording of the mathematical model of the object under the test.

3. By means of the developed mathematical model it is possible to carry out efficient diagnostics of turbocharger YaMZ-650. In the process of the mathematical model development it is taken into consideration that the inverse transformation of the quantity of the faults features into the quantity of the structural parameters (faults) of the object was single-valued.

4. Studies of the suggested mathematical model of turbocharger YaMZ-650 diagnostics will enable to reveal faults of its units and parts, depending on their features, this will considerably increase the term of the fault-free operation both of turbocharger and engines YaMZ-650.10, YaMZ-6501.10 and YaMZ-6502.10.

References

[1]. Коваленко В.М., Щуріхін В.К. Діагностика і технологія ремонту автомобілів. Київ : Літера ЛТД, 2017. 224 с.

[2]. Кисликов В.Ф., Луцик В.В. Будова й експлуатація автомобілів. Київ : Либідь, 2018. 400 с.

[3]. Борисюк Д.В., Яцковський В.І. Методи та засоби діагностування тракторів. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*. 2015. № 1 (89). т. 2. С. 16-20.

[4]. Serrano J.R., Olmeda P., Tiseira A. et al. Theoretical and experimental study of mechanical losses in automotive turbochargers. *Energy*. 2013. Vol. 55. P. 888-898.

[5]. Forsthoffer B., Santos I.F. Turbocompressor performance condition monitoring. *Forsthoffer's rotating equipment handbooks*. 2005. Vol. 3. P. 279-287.

[6]. Harnoy A. Bearing design in machinery: engineering tribology and lubrication. New York: Marcel Dekker, 2003. 440 p.

[7]. Li X.K., Gwynllwy D.Rh., Davies A.R., Phillips T.N. On the influence of lubricant on dynamics of two-dimensional journal bearings. *J. Non-Newtonian Fluid Mech*. 2000. Vol. 93. P. 29-59.

[8]. Борисюк Д.В., Зелінський В.Й., Спірін А.В., Твердохліб І.В. Причинно-наслідковий зв'язок параметрів основних ресурсних груп двигунів ЯМЗ-236/238. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. №4 (119). С. 16-23.

[9]. Барановський В.М., Спірін А.В., Зелінський В.Й., Наляжний В.С. Математична модель діагностування системи уприскування палива «Mono-Jetronic». *Вісник машинобудування та транспорту*. 2018. Вип. 1 (7). С. 10-17.

[10]. Борисюк Д.В. Математична модель процесу діагностування турбокомпресора ЯМЗ-650.1118011. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету* [Електронний ресурс]. 2021. Вип. 2 (13). Режим доступу до журн.: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/634/596>

[11]. Borysiuk D., Spirin A., Trukhanska O., Shvets L., Zelinsky V. Mathematical model of a wheeled tractor steering axle as an object of diagnostics. *ТЕКА. Commission of motorization and energetics in agriculture*. 2017. Vol. 17, No.1. P. 41-47.

[12]. Борисюк Д.В., Біліченко В.В., Зелінський В.Й. Математична модель ударно-спускового механізму автомата Калашникова як об'єкта діагностування. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2018. Вип. 2 (8). С. 4-14.

[13]. Борисюк Д.В., Біліченко В.В., Зелінський В.Й. Математична модель ударно-спускового механізму пістолета Макарова як об'єкта діагностування. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2019. Вип. 1 (9). С. 15-26.

[14]. Борисюк Д.В. Математична модель зчеплення автомобіля Volkswagen Polo Sedan як об'єкта діагностування. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2021. Випуск 1 (13). С. 23-32.

[15]. Борисюк Д.В. Математична модель короби перемикачів передач типу ЯМЗ-239 як об'єкта діагностування. *Вісник Вінницького*

політехнічного інституту. 2021. Випуск 3 (156). С. 93-104.

[16]. Борисюк Д.В. Вибір та обґрунтування параметрів вібродіагностування керованих мостів колісних тракторів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.22.20 / Державний університет «Житомирська політехніка». Житомир, 2020. 21 с.

Authors' Information

Dmytro Borysiuk, Candidate of Technical Science, Associate Professor, senior lecturer of the Department of Automobiles and Transport Management (Faculty of Mechanical Engineering and Transport), Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, [ORCID ID: 0000-0001-8572-6959](https://orcid.org/0000-0001-8572-6959).



МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАЦІЙНОЇ СУДНОВОЇ УСТАНОВКИ

Наговський Д.А., Дощенко Г.Г. ✉

Херсонська державна морська академія, Україна

Анотація

Ключові слова: паралельна робота, електротехнічний комплекс, колювання потужності, математична модель, синхронний генератор, дизель-генераторний агрегат.

Сучасні суднові електротехнічні комплекси мають різну конфігурацію і складаються з великої кількості елементів, для кожного з них існують математичні описи. Для проведення досліджень, спрямованих на усунення обмінних колювань потужності між паралельно працюючими дизель-генераторними агрегатами необхідно об'єднати наявну інформацію та отримати математичну модель реального суднового електротехнічного комплексу. У математичній моделі необхідно відобразити існування не лінійності «люфт» у контурі керування частотою обертання дизеля з метою виявлення причин виникнення обмінних колювань потужності. При математичному моделюванні паралельної роботи дизель-генераторних агрегатів у складі комплексу суднового електроустаткування використано дані про автономну дизель-генераторну електростанцію змінного струму. Для простоти моделювання суднового електроустаткування вимикачі генераторів представлені активними опорами.

Вступ

Суднові електротехнічні комплекси сучасних суден характеризуються високою встановленою потужністю споживачів та генераторів, високою ступеню автоматизації управління, широким впровадженням напівпровідникової техніки, використанням сучасних мікроконтролерів та відповідного програмного забезпечення в системах управління, контролю та діагностики.

Зміна характеру споживачів суднової електричної енергії призвело до загострення проблеми якості електричної енергії та вимагає більш обґрунтованого вибору параметрів елементів суднових систем на ранніх стадіях проектування.

Організація ефективної паралельної роботи генераторних агрегатів є важливим питанням для будь-якої електрогенераційної установки, а особливо для морського судна при сумірності потужностей джерел і споживачів. Тут можна виділити два аспекти, які пояснюють важливість цієї проблеми. В першу чергу, це забезпечення безпеки судна та людей, що знаходяться на ньому, оскільки порушення паралельної роботи може привести до розвалу енергосистеми, знеструмлення судна, втрати керованості і, як результату, катастрофи. По-друге, важливою є економічна складова експлуатації будь-якого судна. Низька якість виробленої електроенергії призводить до підвищеного витрати палива, збільшення

рейсового часу, появи додаткових витрат, пов'язаних з ремонтом обладнання тощо.

Актуальність досліджень

На морських суднах застосовується найбільш раціональна з технічного та економічного боку схема виробництва електричної енергії з паралельною роботою кількох дизель-генераторних агрегатів [1].

Кількість електричних генераторів на морському транспортному судні становить від двох до семи, тому моделі багато генераторної установки стикається з великою кількістю конфігурацій мережі включених та відключених електроагрегатів.

Синхронні генератори видаються рівняннями Парка-Горева [2] в нерухомих щодо ротора d і q координатах:

$$\frac{d\psi_{sd}}{d\tau} = \psi_{sq}\omega_r - r_s i_{sd} - u_{sd}, \quad (1)$$

$$\frac{d\psi_{sd}}{d\tau} = -\psi_{sd}\omega_r - r_s i_{sq} - u_{sq}, \quad (2)$$

$$\frac{d\psi_f}{d\tau} = u_f - r_f i_f, \quad (3)$$

де $\psi_{sd}, u_{sd}, i_{sd}$ – проекції векторів потокозчеплення, напруги та струму статора на вісь d ;
 $\psi_{sq}, u_{sq}, i_{sq}$ – проекції векторів потокозчеплення, напруги та струму статора на вісь q ;
 r_s – опір обмотки статора генератора;
 ψ_f – потокозчеплення генераторної обмотки збудження;
 i_f – струм генераторної обмотки збудження;
 u_f – напруга генераторної обмотки збудження;
 r_f – опір генераторної обмотки збудження;
 τ – тривалість процесу.

Кількість станів l генераторних автоматичних вимикачів з урахуванням живлення з берега становить 2^{n+1} . Модель кожної конфігурації суднової мережі має рівняння для струмів та напруги кожного ввімкненого генератора та навантаження. Для спрощення моделювання багато генераторної установки пропонується представляти стани генераторних вимикачів активними з опорами R_{ki} (див. рис. 1).

Рівняння, що описують процеси включення генераторів на паралельну роботу, складаються спільно з рівняннями ключів, що з'єднують генератори між собою або з мережею.

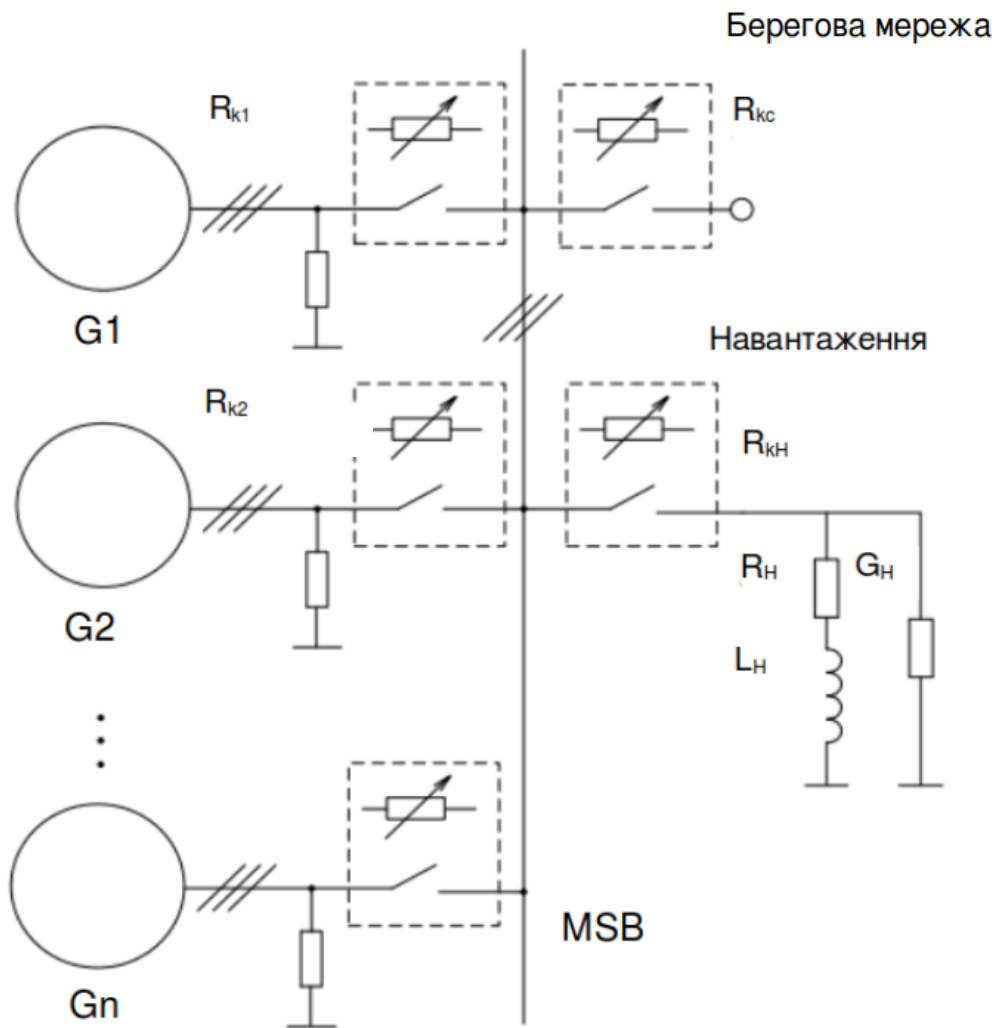


Рисунок 1. Типова схема суднової електростанції

Постановка задачі. Головною метою дослідження є аналіз причин існуючих проблем у паралельній роботі дизель-генераторних агрегатів (ДГА) та пошук методів їх усунення. Необхідно провести дослідження з використанням математичної моделі з метою виявлення впливу обмінних коливань потужності на сталу паралельну роботу ДГА та якість електроенергії, а також встановити залежність стійкості роботи електрогенераційної суднової установки від значень та

співвідношення коефіцієнтів посилення частотних регуляторів.

Викладення основного матеріалу

Для проведення досліджень паралельної роботи дизель-генераторних агрегатів на базі синхронних генераторів у складі електроенергетичної системи обмеженої потужності, аналізу причин існуючих проблем та пошуку методів їх

усунення використана математична модель з рівняннями, що описують роботу наступних елементів: синхронних генераторів; систем збудження та регуляторів напруги генераторів; дизелів як теплоенергетичних приводів ДГА; систем управління та стабілізації частоти обертання ДГА; активного та реактивного електричних навантажень електростанції; пристроїв комутації та розподілу навантаження.

Математичний опис всіх елементів реальної електростанції (значення або діапазони зміни параметрів) дало можливість скласти математичну модель суднового електротехнічного комплексу [3, 4] і, реалізувавши її в комп'ютерній програмі, отримати графіки миттєвих значень моментів M_{g1} , M_{g2} , струмів I_{a1} , I_{a2} , частот обертання роторів r_1 , r_2 , кутів навантаження T_{et1} , T_{et2} паралельно працюючих генераторів (рис. 2).

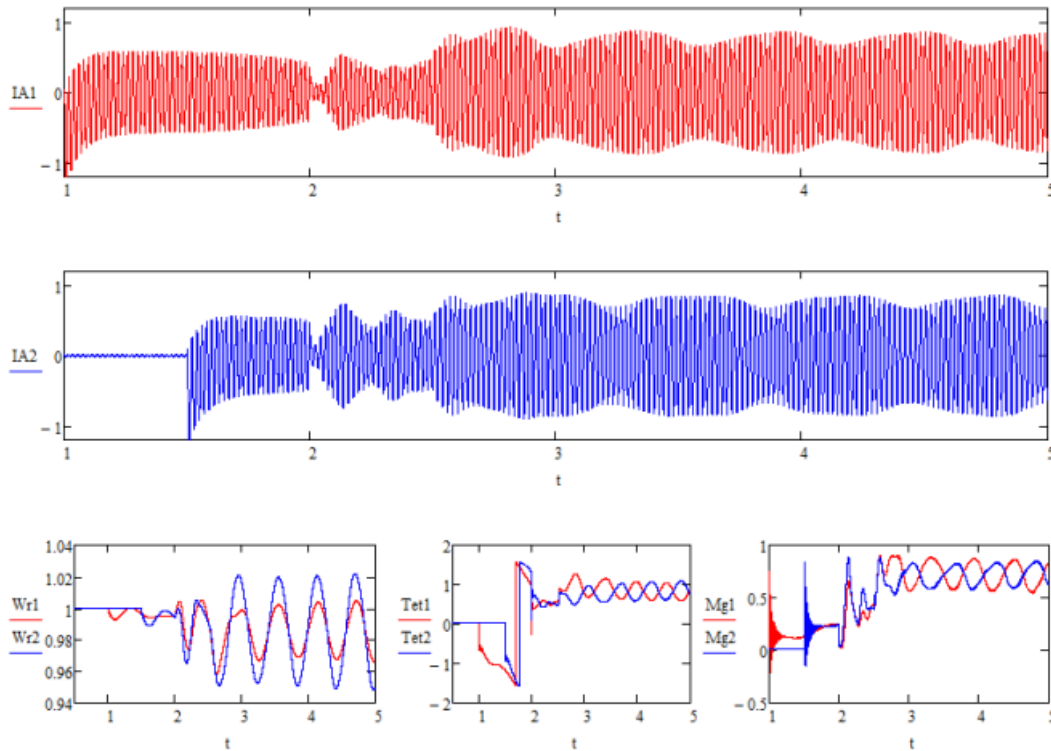


Рисунок 2. Результати математичного моделювання при $D_{n1} = 0,002$, $D_{n2} = 0,02$, $K_{\omega1} = 50$, $K_{\omega2} = 50$, $\omega_{r01} = 1$, $\omega_{r02} = 1$

На рис. 2 видно коливання потужності в електроенергетичній системі при паралельній роботі ДГА, коли максимуму струму одного генератора відповідає мінімуму струму іншого, і навпаки.

Обмінні коливання – явище своєрідного переходу потужності від одного ДГ до іншого з частотою, що вимірюється кількома герцами. Через виникнення обмінних коливань потужності між паралельно працюючими ДГА змінного струму має місце проблема забезпечення сталої паралельної роботи та необхідної якості електроенергії. Дослідження, проведені з використанням отриманої математичної моделі, показали, що обмінні коливання з'являються після введення проміжків люфта D_{n1} , D_{n2} .

Висновки

Проведені дослідження продемонстрували залежність стійкості роботи електрогенераційної суднової установки із зустрічно-паралельним включенням на шини головного розподільного щита дизель-генераторних агрегатів від значень

та співвідношення коефіцієнтів посилення частотних регуляторів. Запропонована математична модель електрогенераційної суднової установки дозволяє досліджувати різні режими роботи автономної дизель-генераторної електростанції змінного струму і виявляти причини виникнення обмінних коливань потужності.

Література

- [1]. Geertsma R.D., Visser K., Negenborn R.R. Adaptive pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion. *Applied Energy*, 2018, 228, P. 2490-2509. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.07.080.
- [2]. M. Godoy Simões, Felix A. Farret Modeling and analysis with induction generators, 3rd edition, 2018, 468 p. – ISBN-13: 978-1-4822-4469-4.
- [3]. Ruofa Cheng*, Wenlong Zhao, Hongfeng Deng and Xiaozhou Jiang Modeling and Optimization Control for Aircraft AC Generator Brushless Excitation System Based on Improved Adaptive

PSO. *The Open Automation and Control Systems Journal*, 2015, 7, p. 21-30.

[4]. Surya Santoso, Wayne Beaty. *Standard Handbook for Electrical Engineers*, 17th Edition, 2018, 1648 p. – ISBN: 9781259642586.

Відомості про авторів

Дмитро Наговський, к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматичної, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-6920-0324](#).



Галина Доценко, к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматичної, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-1004-4934](#).



ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ ШАТУННИХ ПІДШИПНИКІВ СУДНОВОГО ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА MaK 8M32C ЗА РІЗНИХ ЗНАЧЕНЬ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ЗАЗОРІВ

Савчук В.П., Зінченко Д.О.[✉], Дзигар А.К., Кочетов Г.А.

Херсонська державна морська академія, Україна

Анотація

Ключові слова: системне моделювання, кривошипно-шатунний механізм, підшипник, колінчастий вал, мащення, індекс в'язкості, момент тертя, судновий дизельний двигун.

Системне моделювання та аналіз стану підшипників кривошипно-шатунного механізму може значно поліпшити розуміння механізму контактної взаємодії робочих поверхонь, пов'язаного з динамічними характеристиками, і є ефективним методом для визначення граничних значень експлуатаційних показників підшипників колінчастого валу. Дана робота присвячена дослідженню робочих параметрів шатунних підшипників дизельного двигуна MaK 8M32C при його експлуатації за різних значень експлуатаційних зазорів, що складають 0,4, 0,6, 0,8 та 1,0 мм.

Вступ

Кривошипно-шатунний механізм (КШМ) є важливою частиною двигуна, яка впливає на його довговічність, економічність, безпеку та робочі характеристики. Заміна колінчастого валу і підшипників становить 20...25 % вартості двигуна. Знос призводить до значного зростання втрат на тертя. Зусилля щодо зниження цих втрат і підвищення довговічності та надійності набувають все більшої важливості для промисловості. Системне моделювання та аналіз стану підшипників КШМ можуть значно покращити розуміння процесу контактної взаємодії робочих поверхонь, а також допомагають переконатися у безпеці робочого стану підшипника колінчастого валу для конструкції двигуна [1-3].

Актуальність досліджень

На сьогодні опубліковано безліч матеріалів, присвячених дослідженню трибодинамічних властивостей КШМ. Ці публікації, на відміну від раніше проведених досліджень, ставлять на перший план питання аналізу трибодинамічних характеристик системи, які виникають між колінчастим валом і корінним підшипником при запуску двигуна, зміни процесів змащення підшипників колінчастого валу під час прогрівання, аналізу факторів, які впливають на змащення підшипників колінчастого валу, оптимізації процесу змащення підшипників колінчастого валу, аналізу змащення корінного підшипника суднового двигуна в типових умовах експлуатації [4-10].

З огляду на те, що робочий стан двигуна постійно змінюється при його фактичному використанні, виникає необхідність вивчення показників працездатності шатунних підшипників дизельного двигуна MaK 8M32C в програмному середовищі GT-Suite за різних значень зазорів. Це допоможе вдосконалити теорію аналізу змащення підшипників двигуна і може забезпечити більш повну довідкову базу для проектування шатунів та підшипників.

Постановка задачі. Ціллю проведеного моделювання є визначення показників працездатності шатунного підшипника дизельного двигуна MaK 8M32C при різних значеннях зазорів. Такими показниками є товщина змащувального шару, момент тертя в оливі, втрати потужності в підшипнику, витрати оливи.

Викладення основного матеріалу

Аналіз та обґрунтування параметрів математичної моделі шатунних підшипників в системі GT-Suite. Тиск в циліндрах двигуна може бути застосовано до моделі КШМ, побудованої з шаблонів «CrankAnalysis», «CrankPin», «CrankWeb», «Journal», «Flywheel», «ConnectingRod» та «Piston». Це робиться шляхом подальшого підключення об'єктів «EngCylPres» до елементів «Piston» в моделі КШМ, як показано на рис. 1. Порт 1 (поверхня поршня) елементів «Piston» з'єднаний з об'єктами «EngCylPres» за допомогою з'єднань «PressureConn2D». Об'єкт «EngCylPres» визначає зміну тиску в циліндрах, як правило, через посилання на опорний об'єкт «ProfileAngleSelf», який використовується для

введення в таблицю залежності тиску в циліндрі від кута повороту колінчастого валу.

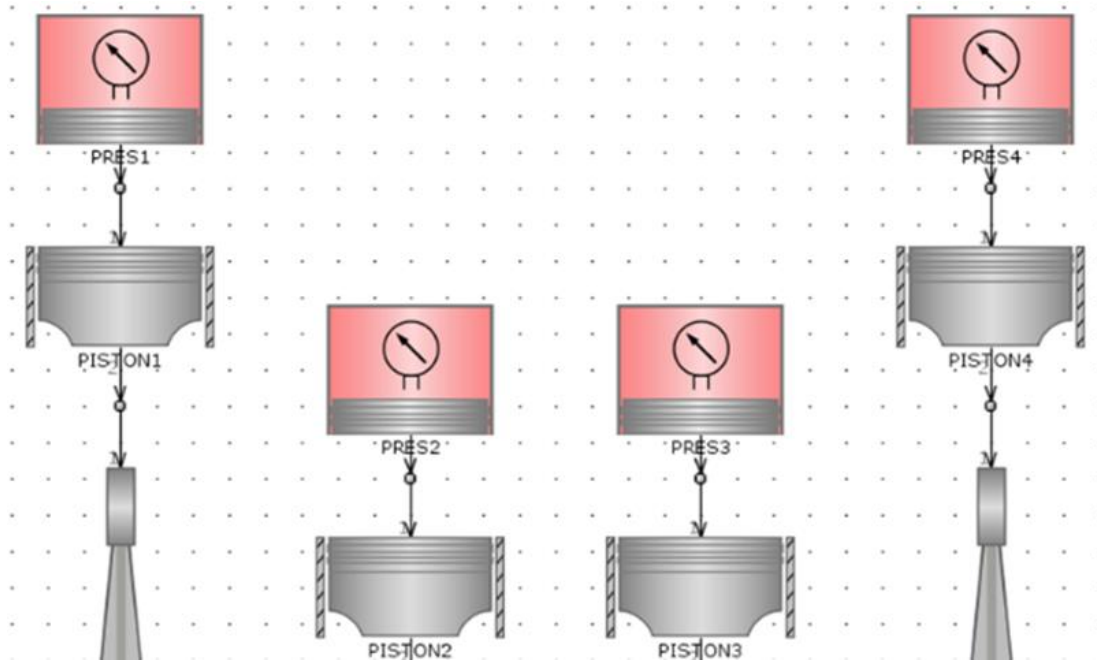


Рисунок 1. Моделювання тиску газів у циліндрах двигуна

Шаблон «EngCylPres» також дозволяє користувачам GT-SUITE Cranktrain визначати, чи опорний кут «0 deg» в поданій таблиці слід інтерпретувати як:

- кут спалаху ВМТ першого циліндру або;
- кут спалаху ВМТ локального циліндра, представлено окремих елементом «EngCylPres».

Перший варіант корисний при передачі даних (для кожного циліндра) з програмного забезпечення для моделювання двигуна, такого як GT-POWER, який прогнозує значення тиску у циліндрі. Другий корисніший при введенні одного (прогнозованого або вимірюваного) профілю тиску в циліндрі, який слід використовувати для всіх циліндрів.

Для здійснення налаштування параметрів тиску в циліндрі двигуна вибираємо шаблон «EngCylPres» та створюємо об'єкт «CylPressM32C», головними атрибутами якого є **довідковий профіль тиску (Pressure Profile Reference)**, який пропонує вибір одного із наступних варіантів:

- **cylinder-1-TDC** який означає, запалювання для кожного циліндра буде розраховуватись відносно ВМТ такту стискування 1-го циліндра = 0,0 град.
- **local-cylinder-TDC** означає, що профіль тиску для кожного циліндра буде посилатися відносно його власного локального положення в ВМТ = 0,0 град. (0,0 градуса в X-стовпчику профілю буде інтерпретовано як ВМТ такту стискування циліндра, представлено конкретним

елементом «EngCylPres»). **Рекомендується, якщо всі циліндри мають один профіль тиску.**

Приймаємо значення **Pressure Profile Reference – local-cylinder-TDC**.

Наступна характеристика, що визначається для даного атрибуту є об'єкт профілю тиску (**Pressure Profile Object**).

Застосуємо об'єкт «ProfileAngleSelf», який визначає профіль тиску за весь цикл роботи дизеля (720 градусів). Для цього необхідно занести масив даних, що характеризують зміну тиску в циліндрах двигуна в залежності від кута обертання колінчастого валу. Ці результати приймаємо із теплового розрахунку дизельного двигуна.

Додаток GT-SUITE Cranktrain автоматично генерує тиск для кожного циліндра, використовуючи інформацію, що вводиться в об'єкті «CrankAnalysis». Якщо вихідні дані про тиск не використовують «0 deg» як спалах у ВМТ, слід змістити кут (X-координату) до «ProfileAngleSelf» для переміщення даних, щоб спалах у ВМТ був у «0 deg».

Після додавання до моделі даних про тиск у циліндрі, елемент «CrankAnalysis» відобразить загальний крутний момент, включаючи крутний момент від тиску. Аналогічно деталі елементів «Piston», «ConnectingRod» та елементи колінчастого валу повідомлять про передбачувані внутрішні сили (на поршневий палець, шатунну шийку), обертових моментів та навантажень на підшипники колінчастого валу, які сприймають дію тиску.

Результати моделювання показників працездатності шатунних підшипників. При моделюванні показників працездатності мотилевих підшипників нами розроблялась усереднена модель роботи підшипників, що не враховує особливості подачі оливи до підшипників:

- продуктивність насосу;
- втрати на теплообмін в системі мащення;
- гідравлічні втрати в системі в залежності від характеру та довжини оливних каналів;
- гідравлічні втрати на оливних фільтрах та теплообмінниках.

При моделюванні підшипників обов'язковою умовою є призначення характеристик системи мащення. Такі параметри задаються за допомогою об'єктів EndEnvironment: HiPress-1, що визначає параметри напірної магістралі, та OutFlow-1, що визначає параметри лінії зливу. При моделюванні використовувались наступні параметри (рис. 2):



Рисунок 2. 1D модель шатунного підшипника

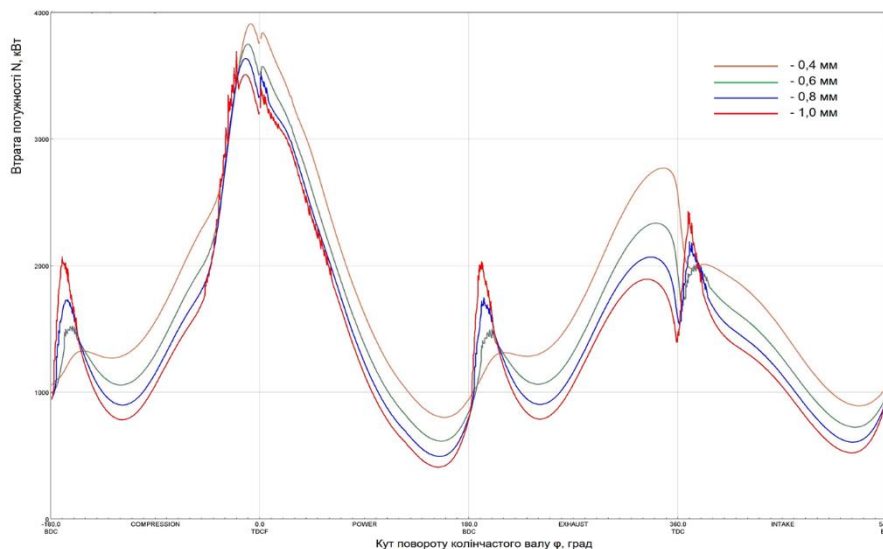


Рисунок 3. Графіки втрати потужності в підшипнику в залежності від кута повороту колінчастого валу

- температура оливи 60 °С;
- тиск оливи 0,48 МПа;
- олива за класифікацією SAE 40 (в'язкість 13 сСт при температурі 100 °С).

Інші показники програми встановлено за замовчуванням, що призведе до їх автоматичного розрахунку на підставі введених даних від параметрів робочого процесу, характеристики КШМ та параметрів моторної оливи.

Результати розрахунку втрати потужності в підшипнику, гідродинамічного тиску на підшипник, товщини змащувального шару, температури та витрати оливи за один цикл двигуна представлено на рис. 3-7.

Для кращого розуміння впливу досліджуваного параметру на показники працездатності шатунного підшипника, приведемо отримані дані у вигляді табл. 1.

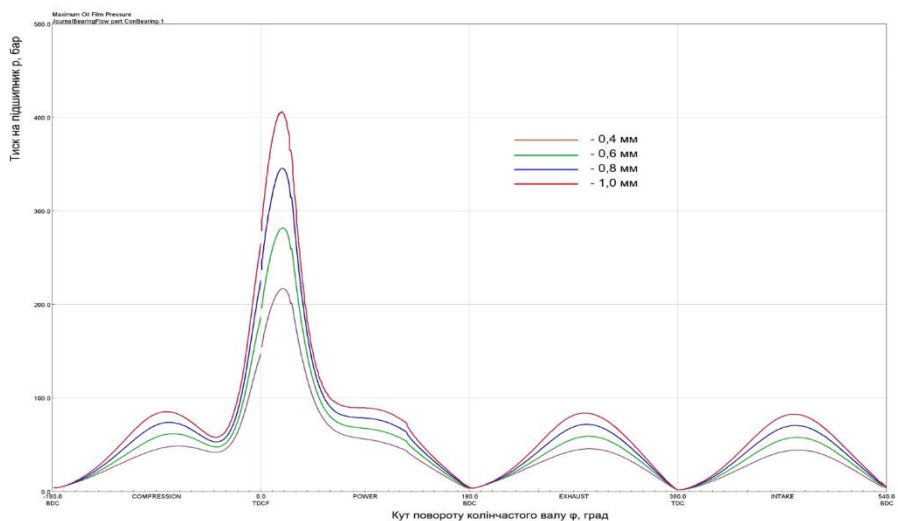


Рисунок 4. Графіки гідродинамічного тиску в підшипнику в залежності від кута повороту колінчастого валу

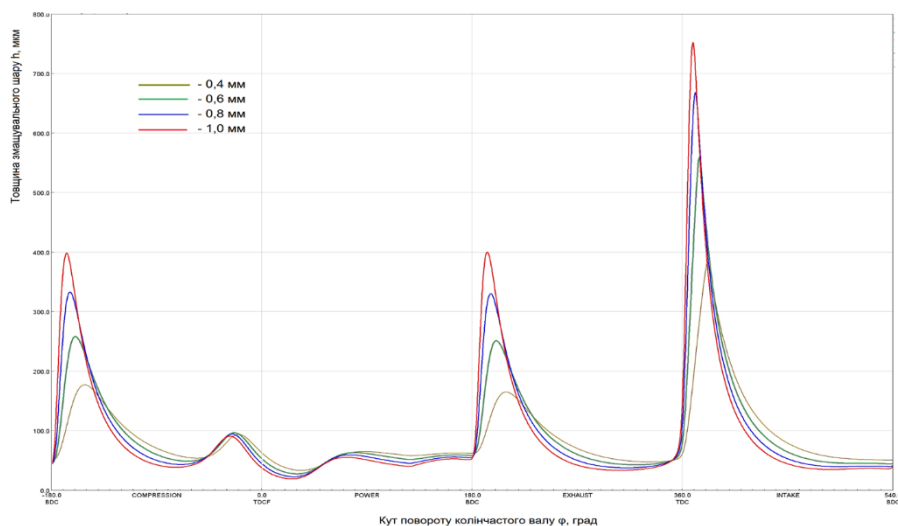


Рисунок 5. Графіки зміни товщини змащувального шару в підшипнику в залежності від кута повороту колінчастого валу

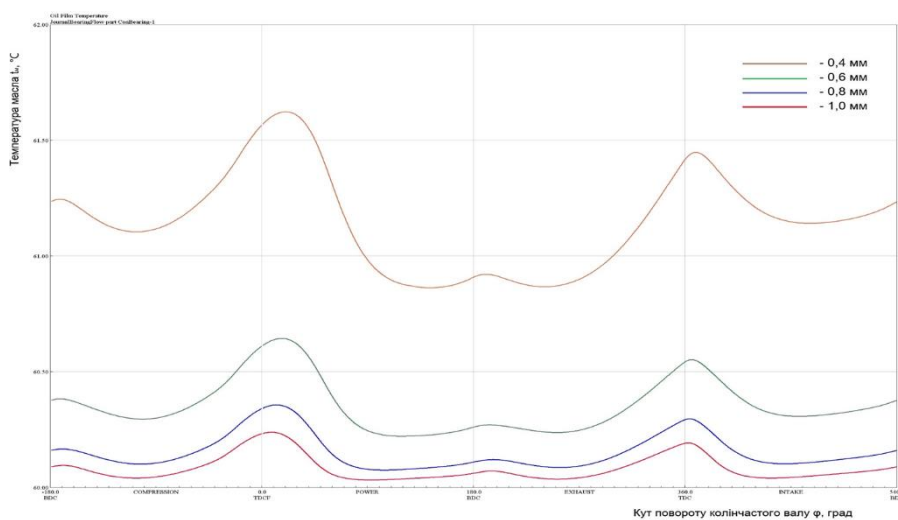


Рисунок 6. Графіки зміни температури оливи в підшипнику в залежності від кута повороту колінчастого валу

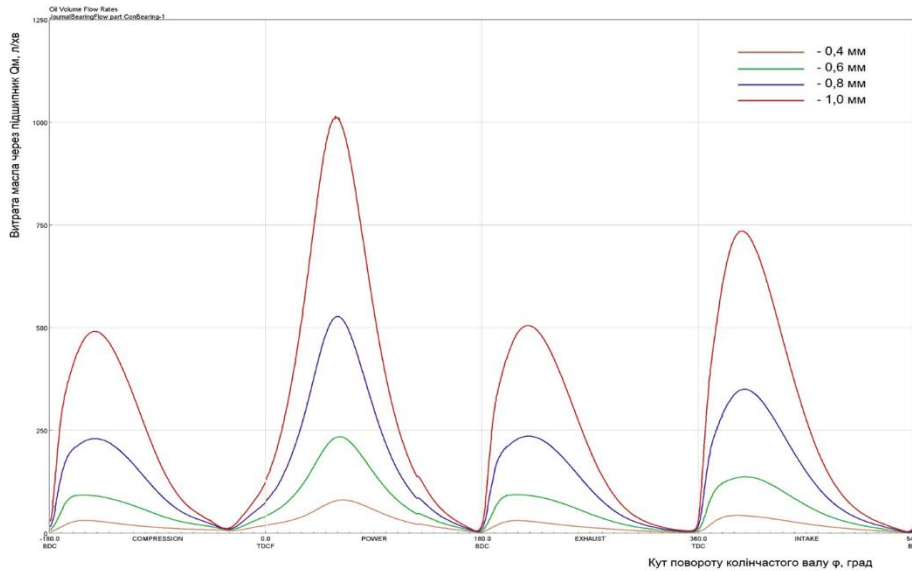


Рисунок 7. Графіки зміни витрати оливи в підшипнику в залежності від кута повороту колінчастого валу

Таблиця 1. Результати розрахунку експлуатаційних показників мотилевого підшипника

Параметр	Експлуатаційний зазор, мм			
	0,4	0,6	0,8	1,0
Мінімальна товщина змащувального шару, мкм	33,17	27,08	22,33	18,85
Максимальне / середнє значення тиску оливи, МПа	21,67 / 4,27	28,18 / 4,90	34,55 / 5,81	40,59 / 7,62
Максимальна / середня температура оливи в підшипнику, °С	61,6 / 61,2	60,6 / 60,4	60,4 / 60,2	60,2 / 60,1
Максимальна / середня витрата оливи через підшипник л/хв	80,5 / 22,0	234,4 / 65,6	527,1 / 145,6	1014,6 / 268,8
Максимальне / середнє значення втрати потужності в підшипнику, кВт	3,91 / 1,78	3,75 / 1,60	3,64 / 1,52	3,69 / 1,60

Висновки

Дослідження працездатності мотилевих підшипників колінчастого валу проводились на прикладі дизельного двигуна МаК 8М32С.

Дослідження проводились для різних варіантів експлуатаційних (діаметральних) зазорів, що складають 0,4, 0,6, 0,8 та 1,0 мм

При моделюванні застосовувались характеристики моторної оливи класу в'язкості SAE40 (кінематична в'язкість 13 сСт при температурі 100 °С), температура оливи 60 °С та тиск оливи 0,48 МПа.

За показником мінімальної товщини змащувального шару ($h_{min} = 6,4$ мкм). Та температурою змащувального шару всі варіанти можуть відповідати даним вимогам. Аналізуючи показники температури необхідно враховувати, що у більш зношених варіантів підшипників витрата оливи значно зростає, що незмінно буде впливати на тиск моторної оливи. На двигунові встановлено начеплений насос продуктивністю 75 м³/год

(1,25 м³/хв), то продуктивність через підшипник не повинна перевищувати 40...45 л/хв. Цьому критерію відповідає тільки підшипник, що має експлуатаційний зазор 0,4 мм. Всі інші показники для приведених варіантів підшипників не виходять за рамки припустимих параметрів.

Література

[1]. Zhenpeng He, Junhong Zhang, Guichang Zhang, Zhouyu Li, Weisong Xie. Crankshaft-bearing evolution indexes investigation and asperity contact identification based on neural network. *Applied Mathematical Modelling*, 2014. 38(2). 506–523.

[2]. Савчук В.П., Зінченко Д.О., Кочетов Г.А., Дзигар А.К. Аналіз працездатності підшипників шатна середньообертового двигуна Hyundai HiMSEN H25/33 при експлуатації з допустимими значеннями зазорів без ремонту. *Водний транспорт*, 2023, 2(38), 115-127. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.13

[3]. Савчук В.П. Методи дослідження впливу експлуатаційних показників на працездатність підшипників ковзання двигунів внутрішнього згорання. *Матеріали 10-ї міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування»*, 2019, 208-211.

[4]. Савчук В.П., Зінченко Д.О., Котов А.І., Дзигар А.К. Моделювання робочих параметрів мотилевих підшипників малообертового суднового дизельного двигуна. *Матеріали III-ї Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету «MPP&O-2021 (Marine Power Plants and Operation)»*. 2021. 65-68.

[5]. Савчук В.П., Курносенко Д.В., Літусенко С.О. Моделювання показників працездатності головних підшипників малообертового двигуна MAN B&W 12K98MC. *Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Strategiczne pytania światowej nauki – 2021»*, 07-15.02.2021. 44-50.

[6]. Francisco A., Lavie T., Fatu A. et al. Meta-model-assisted optimization of connecting rod big-end bearings. *Journal of Tribology*, 2013, 135, 0417041–04170410.
<https://doi.org/10.1115/1.4024555>

[7]. Tabrizi A. and Kakaei A. Different Simulation Models of Connecting Rod Hydrodynamic Bearing. *SAE Technical Paper*, 2009, 2009-01-1863.
<https://doi.org/10.4271/2009-01-1863>

[8]. Wei L., Wei H., Duan S. et al. An EHD-mixed lubrication analysis of main bearings for diesel engine based on coupling between flexible whole engine block and crankshaft. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2015, 67(2), 150–158.
<https://doi.org/10.1108/ILT-08-2013-0088>

[9]. Sun J., Li B., Zhu S. et al. Lubrication Performance of Connecting Rod and Main Bearing in Different Engine Operating Conditions. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 32, 23–34.
<https://doi.org/10.1186/s10033-019-0335-9>

[10]. Zhenpeng He, Junhong Zhang, Guichang Zhang, Zhouyu Li, Weisong Xie. Crankshaft-bearing evolution indexes investigation and asperity contact identification based on neural network. *Applied Mathematical Modelling*, 2014, 38(2), 506–523.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.06.042>

Відомості про авторів

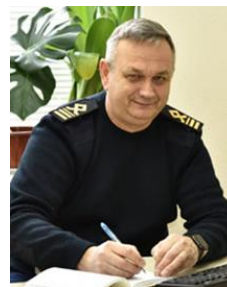
Володимир Савчук, к.т.н, доцент, завідувач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-5266-850X](https://orcid.org/0000-0002-5266-850X).



Дмитро Зінченко, к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-7333-7347](https://orcid.org/0000-0002-7333-7347).



Анатолій Дзигар, механік I розряду, старший викладач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-5947-6263](https://orcid.org/0000-0001-5947-6263).



Геннадій Кочетов, механік III розряду, аспірант кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна.



СИСТЕМА ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ПОТОЧНОГО СТАНУ ТРАНСПОРТНИХ ПРИСТРОЇВ

Шарко О.В. ✉, Яненко А.В., Мовчан П.В.

Херсонська державна морська академія, Україна

Анотація

Ключові слова: моніторинг, діагностика, енергетичні установки, транспорт.

Розглянуто сучасні системи технічного діагностування транспортних засобів у напрямках ідентифікації та прогнозування механічних властивостей матеріалів, визначено їх основні недоліки. Надано заходи щодо оцінки залишкового ресурсу. Складено засоби придбання діагностичної інформації та виконано їх структурування. Наведено основні аспекти підвищення ефективності моніторингу експлуатаційних властивостей, забезпечення діагностики та прогнозування залишкового ресурсу.

Вступ

Фрахтовий ринок що визначає вартість вантажоперевезень морського транспорту динамічно розвивається. Ситуація, в якій ринок терміново потребує додаткової кількості нових судів не можуть бути вирішені оперативно внаслідок тривалого будівництва судів. Для покриття попиту все рідше списуються старі судна та купуються уживані. За цих умов проблема діагностування та моніторингу властивостей елементів СЕУ стає гострою та своєчасною [1, 2].

Актуальність досліджень

Недоліки існуючих комплексів технічної діагностики пов'язані із зупинкою обладнання для проведення ремонтних та профілактичних робіт, необхідністю врахування великої кількості різноманітних показників, низької якості прогнозних оцінок та продуктивності діагностики. Виходячи з цього важливим питанням є створення моделей методів та способів діагностики на основі нових інформаційних параметрів та перетворення аналогів даних про результати діагностики на цифрову формулу. Це надає можливість як фіксації діагностики руйнації, а також визначення початкової стадії зміни структури матеріалів.

Сучасні системи технічної діагностики відносяться до складних об'єктів, що володіють при їх використанні високими показниками ризику та невизначеності, внаслідок сильного впливу навколишнього середовища. Тому підвищення надійності і достовірності висновків використовують цілий комплекс вимірів.

Технічне діагностування згідно з нормативними документами є визначенням технічного

стану об'єктів. Це вищий рівень оцінки залишкового ресурсу проти методами неруйнівного контролю та дефектоскопії. Термін «технічна діагностика» означає область знань щодо встановлення технічного стану об'єкта. До її завдань входить пошук місць та причин несправностей із прогнозуванням поточного стану. Моніторинг полягає в спостереженні та перевірці якості обладнання з обов'язковим наданням звітності та оповіщення.

Як показує досвід експлуатації суднового енергетичного обладнання в процесі його експлуатації до основних заходів щодо оцінки залишкового ресурсу слід відносити:

- аналіз вхідної інформації щодо умов експлуатації;
- вибір контрольованих параметрів;
- використовувані методи;
- експлуатаційні фактори;
- засоби візуального огляду;
- дефектоскопії;
- розрахунки на повзучість та втомну міцність.

На основі наукових результатів щодо вирішення допоміжних завдань взаємозв'язку фізичних та механічних властивостей матеріалів та узагальнення досвіду експлуатації елементів суднових транспортних засобів, розроблено систему технічної експлуатації суднових транспортних засобів (рис.1).

Представлено структурування придбання діагностичної інформації пов'язану зі способами визначення залишкового ресурсу за групами, виділено сутність, методологію, переваги та недоліки

використовуваних груп та методів. Визначено призначення до сфери застосування та перспективи їх використання у транспортних технологіях.

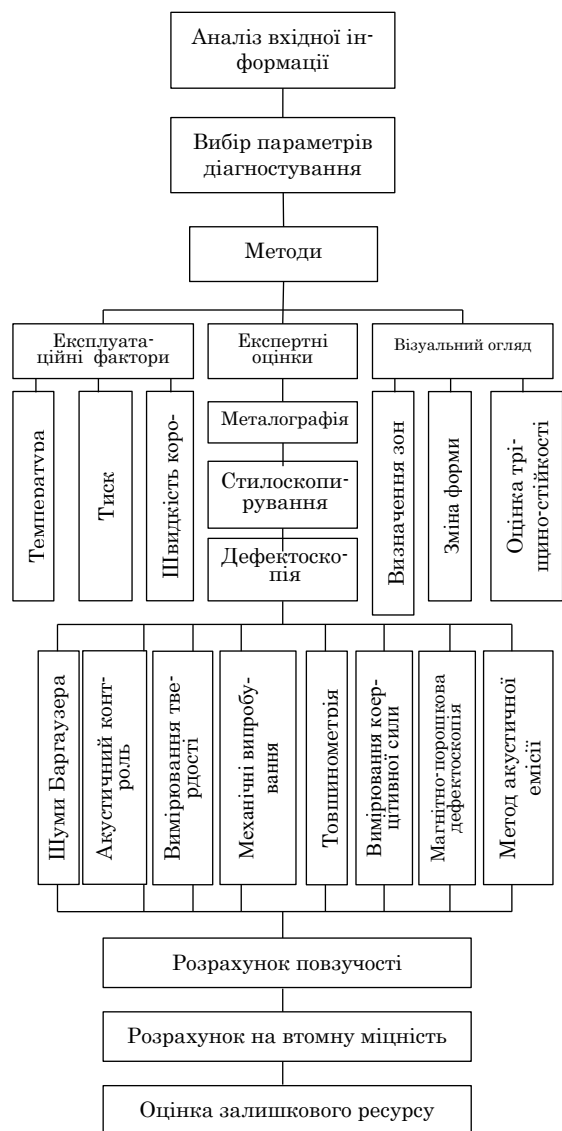


Рисунок 1. Система моніторингу технічної експлуатації суднових транспортних засобів

У процесі діагностування можна виділити такі етапи:

- виявлення аномалій та несправностей в експлуатації;
- локалізація несправностей;
- діагноз виявлення причин несправностей;
- прогнозування розвитку несправностей;
- оцінка залишкового ресурсу устаткування.

Головне призначення діагностування полягає у своєчасному виявленні відхилень контрольованих параметрів від нормативних значень, ідентифікації та локалізації дефектів, вироблення стратегій подальших дій, прогнозуванні умов

використання ресурсів. Якщо результати діагностування показують, що об'єкт наближається до аварійної ситуації, то має бути ухвалено рішення про припинення його експлуатації або перехід на полегшений режим. Раннє виявлення несправностей дозволяє коригувати програми технічного обслуговування та ремонту.

Наявну інформацію про проблему оцінки технічного стану устаткування процесі його експлуатації можна умовно розділити на групи:

- методики розрахунку, засновані на чисельних методах механіки руйнувань;
- методики, що ґрунтуються на результатах неруйнівного контролю та дефектоскопії;
- методики, що використовують нормативні документи та різні стандарти;
- методики, засновані на моделюванні та інформаційній підтримці прийняття рішень.

Особливості першої групи є локальність контролю, невизначеність впливу структурних неоднорідностей, аналіз інформації лише про поверхневі шари матеріалів. Рівень чутливості другої групи методів дозволяє ідентифікувати зони майбутніх руйнувань. Існуючі нормативні документи та стандарти мають обмежене застосування для обладнання, що перебуває в експлуатації. Над розвитком напряму моделювання інформаційної підтримки нині працюють усі діагностичні центри світу. Поєднуючи суб'єктивні експертні та оцінки з методами математичного моделювання можна отримати надійний спосіб моніторингу устаткування, що тривало працює, в процесі його експлуатації.

Висновки

В результаті виконаної роботи отримали подальший розвиток засоби придбання діагностичної інформації, що стосується залишкового ресурсу транспортних об'єктів при їх експлуатації, в яких на відміну від існуючих додатково включені операції структуризації інформації по групах, пов'язаних зі способами визначення діагностичних параметрів. Це дозволяє кожній групі окремо визначити труднощі впровадження й можливості подальшого використання моніторингу експлуатації транспортних засобів.

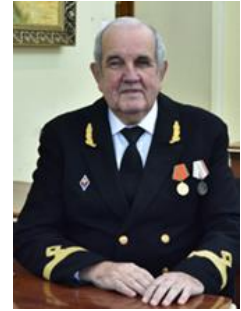
Література

- [1]. Sharko O., Yanenko A. Modeling of intelligent software for the diagnosis and monitoring of ship power plant components using Markov chains. *Science-Based Technologies*, 2023, 59(3), 251-261. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.59.17946>
- [2]. Aleksenko V.L., Sharko A.V., Stepanchikov D.M., Yurenin K.Yu. Identification of

structural features of deformation mechanisms during bending by the acoustic emission method. *Technical diagnostics and non-destructive testing*, 2019, 1, 32-39. DOI:[10.15407/tdnk2019.01.04](https://doi.org/10.15407/tdnk2019.01.04)

Відомості про авторів

Олександр Шарко, д.т.н, професор, професор кафедри транспортних технологій та механічної інженерії, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-9025-7990](https://orcid.org/0000-0001-9025-7990).



Артем Яненко, аспірант кафедри транспортних технологій і механічної інженерії, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0009-0004-7992-8369](https://orcid.org/0009-0004-7992-8369).



Петро Мовчан, аспірант кафедри транспортних технологій і механічної інженерії, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0009-0003-1004-6651](https://orcid.org/0009-0003-1004-6651).



INCREASING THE EFFICIENCY OF COMBUSTION OF WATER FUEL EMULSIONS IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Oleh Kolbasenko¹, Borys Dymo², Serhii Anastasenko^{2✉}, Oleksiy Stelmakh²

¹ National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Ukraine

² Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ukraine

Abstract

Key words: water-fuel emulsion (WFE), internal combustion engine (ICE), cavitation preparation of water-fuel emulsion, intensification, cold plasma.

The physical and chemical nature of increasing fuel combustion efficiency in internal combustion engines when using water-fuel emulsions (WFE) has been analyzed. It has been established that the transition to water-fuel emulsions improves all the main indicators of mixture formation, but according to the authors, the most positive role is played by micro-explosions, as well as a local increase in the value of the excess air coefficient. The presence of water-fuel emulsions leads to qualitative and quantitative changes in the process, in particular, the oxidation of hydrogen ions in cavitation-activated water. It has been shown that the use of water-fuel emulsions initiates an intensification of up to 8% during combustion in an internal combustion engine also due to an additional increase in the internal energy of the working body.

Introduction

The environmental and economic efficiency of combustion of water-fuel emulsions (WFE) in diesel engines has been represented in numerous publications. Analyzing the literature data, it can be concluded that the improvement of the quality of the diesel engine's operating process during the combustion of WFE has a complex physical and chemical nature, in particular the process of volumetric mixture formation. A significant disadvantage of jet mixture formation in diesel engines is the over-enrichment of the central part of the air-fuel torch with fuel. At many points in this jet volume, the excess air ratio is less than 0.1. It is here that favourable conditions at high temperatures in the diesel cylinder are created for the thermal decomposition of fuel, accompanied by intense release of free carbon (soot). The soot reacts with oxygen insufficiently, so the combustion process is delayed, and the heat output is suboptimal.

Relevance of research

The transition to WFE improves all the main indicators of mixture formation. However, according to the authors of [1], microexplosions and the increase in local values of the excess air coefficient play the most positive role in the diesel engine's operation. Micro-explosions break up the asphalt resinous residues of the droplet and thereby reduce the size of the resulting coke particles, which contributes to their faster combustion in contact with the oxidizer, and also accelerates the gasification process. Micro-explosions also play an important role in the elimination of large drops. An increase in local excess air coefficients leads to an increase

in combustion speed and a reduction in soot formation.

Presentation of the main material

The processes and results characterizing the chemical activation of fuel combustion by water molecules have been investigated and presented. To determine the degree of participation of water oxygen in the processes of hydrocarbon oxidation occurring in the combustion chamber of a high-speed diesel engine, the study has been conducted on the one cylinder, four-stroke supercharged engine 18/20 (18 – the diameter of the cylinder, cm; 20 – the piston stroke, cm). 40% of WFE was used as fuel. Distilled water enriched with the oxygen isotope O18 was used to prepare the sample. To assess the efficiency of water participation in the chemical reactions of hydrocarbon oxidation, a mass spectrometric analysis of carbon monoxide and carbon dioxide was performed using a special method for estimating the content of the ¹⁸O isotope. The results of the analysis using standard methods used in mass spectrometry showed that the share of oxygen from water of WFE involved in the oxidation of fuel hydrocarbons was 60%. Academician E. Chudakov first showed the participation of water additives in the combustion process of internal combustion engines. For this, heavy oxygen water H₂O¹⁸ was injected into the engine cylinder along with the working mixture. The analysis of exhaust gases showed that 45...60% of the total amount of the injected ¹⁸O isotope was combined with carbon. However, the conditions of preparation and quality indicators of WFE before combustion, which are of great importance, are not specified.

During the rigid cavitation circulation preparation of WFE (cavitation index about 1, or cavitation number of ≥ 0.2), a certain amount of H^+ , OH^- ions (up to 0.3 mmol/dm³), accumulates in water bubbles and in the water itself when air bubbles collapse. H_2O_2 (up to 0.05 mmol/dm³), O_3 (up to 0.0001 mmol/dm³) as a result of hydrogen bonds breaking, the destruction of the water frame, which occur under the influence of electron impacts in the vapor-gas mixture of cavitation bubbles in water in accordance with the Margulies theory at pressures of 100 MPa and temperatures up to 10000°C. Thus, even before the process of splitting the WFE stream into drops in the combustion chamber, they already have a sufficient amount of ions for ignition, to which the same ions and products of thermal decomposition of fuel oil hydrocarbons are then added. Therefore, self-ignition of WFE occurs more easily and earlier compared to the combustion mode of anhydrous fuel oil. Moreover, due to the primary accumulation of H^+ , OH^- , H_2O_2 when atomic hydrogen burns with recombination, the heat of this reaction is released at the level of 216000...335000 kJ/kg (cold plasma), while the combustion of molecular hydrogen releases 120000 kJ/kg. When the water content in WFE is up to 20...25%, there is a saving of pure oil product in WFE up to 20...25% in boilers and up to 8% in ICEs with a corresponding increase in WFE consumption.

After the microexplosion of the WFE droplet in the shock wave behind the front, the gas is strongly ionised and therefore the ion and electron temperatures do not coincide. In a compaction jump, only heavy particles are heated, but not electrons, and the energy exchange between ions and electrons occurs slowly due to the large difference in their masses. Relaxation is associated with temperature equalisation. In addition, during the propagation of the shock wave in the plasma, an important role is played by electronic thermal conductivity, which is much greater than ion conductivity and due to which electrons heat up before the condensation jump.

Thus, during the combustion of WFE, there is a simultaneous impact on the combustion processes of electrochemical reactions and shock waves, which create an appropriate acoustic field not only in the combustion chamber, but also in the convective flue.

In the zone of maximum reaction temperatures of most modern combustion chambers, fuel components are always in a partially excited state. However, a further increase in the proportion of excited particles leads to a significant change in the nature of most reactions. According to [1], electric discharge, both due to the high effective temperature (up to 12000 K) and the high energy of free electrons, contributes significantly to the excitation of

radicals and molecules. In the main discharge zone, the reactions of direct ionisation of particles by electron impact prevail due to the very high energy of free electrons. The same processes should occur during microexplosions of cavitation WFE drops.

In [2], the effect of the degree of initial ionization of a plasma inclusion has been considered and the dependence of the increase in mole fractions of the corresponding substances on the degree of inclusion ionisation, the initial diameter of the inclusion, and the initial temperature of the medium have been presented. In all cases, an increase in the initial degree of ionisation predictably leads to a general increase in the concentration of active particles (as well as in their production and decay rates). This is important in terms of taking into account the influence of the WFE pretreatment regime before combustion and determining the degree of initial ionisation of the WFE.

For an inert air environment, the peak instantaneous concentrations of atomic oxygen increase monotonically with increasing initial temperature, while during methane combustion, a monotonic increase is observed only at minimal inclusion ionisation ($\lambda_0 = 0,05$). At higher degrees of ionisation, a minimum of atomic O concentrations has been observed at an effective average temperature of the medium in the range from 1800 to 2000K.

The minimum of the peak mole fractions has been observed for hydroxyl radicals, the concentrations of which increase slightly at the flame zone temperature from 1200 to 1400 K (corresponding to the initial areas of ignition and the mixing zone), followed by a monotonous decrease at 1800 - 2000 K, after which a jump-like increase in OH generation has been noticed, clearly interdependent with the dissociation of water molecules, which are quickly formed in the high-temperature zone, as well as with the intensification of shock splitting of hydrocarbon residues by the excited plasma inclusion particles, which should be taken into account when considering the impact of microexplosions during the combustion of WFE. In the course of research [2], a non-linear relationship between the initial diameter of the inclusion and the output of active substances has also been established. Both when increasing and decreasing the initial diameter of the plasma zone in the range from 1 to 6 mm, there is a splitting of the effect of initial ionization on the production of hydroxyls and atomic oxygen. Obviously, the nature of scattering of excited particles (both diffusion-convective and recharging mechanisms) and the rate of decrease of the average degree of excitation is related to the surface area of the initial zone and the concentration of characteristic reagents in the main flow.

Experimental studies show that when burning in the boiler furnace and in the combustion chamber (CC) of the experimental installation of the

Kherson Educational and Scientific Institute of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, while ensuring a constant temperature of gases at the outlet of the furnace (CC), the clean fuel saving reaches 25% when burning WFE with a water content of 25%. According to the analysis of data [3], when burning WFE (called environmentally friendly fuel produced by the Kremenchuk Oil Refinery) with the same water content of 25% in high-speed internal combustion engines, the clean fuel savings amounted to $\sim 8\%$ at a constant power value.

A comparison of the relative values of WFE consumption to pure fuel consumption at the same water content values in the range from 5 to 30% in the boiler and in the combustion chamber and the high-speed engine showed that they have practically the same values. From our point of view, this is explained by the fact that only a part of the supplied heat is spent on work in the internal combustion engine. Thus, according to the first law of thermodynamics (the analytical expression $dq = d\bar{x} + d$), which can be represented as $d\bar{x} / dq + dl / dq = 1$, it is possible to determine the fraction of the total heat dq that is supplied to the gas and converted into work: $dl / dq = 1 - d\bar{x} / dq$. Since for an ideal gas in the process $p = const$, the values $du = cvdt$ and $dq = cpdt$, $dl / dq = 1 - cvdt / cpdt$, then taking $k = 1.4$, we obtain $dl / dq = 1 - 1 / 1.4 = 0.285$. Thus, in the isobaric process, only 28.5% of the heat supplied to the gas is converted into work. All the rest of the heat, i.e. 71.5% is used to increase the internal energy.

Conclusions

The analysis of literature data and the obtained research results allow us to conclude that the processes of fuel combustion in diesel engines using highly concentrated emulsions are largely determined by the laws of chemical kinetics of the interaction of hydrocarbons and their radicals with molecules and products of water dissociation. These conclusions allow us to believe that WFE, are not simply products of the physical mixing of hydrocarbon fuel with a chemically inert liquid, but a very special type of fuel, which both qualitatively and quantitatively changes the processes that characterize the fuel combustion in the combustion chamber of a diesel engine, because the indicated level of fuel economy can be achieved due to the oxidation of hydrogen ions and molecules contained in the water activated by hard cavitation of the WFE.

References

[1]. Dolmatov, D., Kukuruz, A., & Khadzhivand, M. (2012). Chemical kinetics of excited particles

reactions at weak ionization of the medium. Aerospace Engineering and Technologies, 8 (95).

[2]. Dolmatov, D. (2013). Generation of hydroxides and atomic oxygen near small plasma inclusions. Aerospace Engineering and Technologies, 8 (105).

[3]. Parsadanov, I., Teplitskiy, A., Karyagin, I., Solodovnikov, V., Kravchenko, S. (2011). Application of water-fuel emulsion in automotive tractor diesel engine. Energy and economic indicators. Internal Combustion Engines, 2 (2).

Authors' Information

Oleh Kolbasenko, PhD Graduate Student, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, [ORCID ID: 0000-0001-9460-4558](#)



Borys Dymo, Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technical Thermodynamics and Ship Steam Generating Plants, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, [ORCID ID: 0000-0001-5162-4559](#).



Serhii Anastasenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Thermal Power Engineering and Mechanical Engineering Technologies, Pervomaisk Educational and Scientific Institute of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Pervomaisk, Ukraine, [ORCID ID: 0000-0002-5201-5146](#).



Oleksiy Stelmakh, Master's student, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine.



МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ ПИТОМОЇ ВИТРАТИ ПАЛИВА МАЛООБЕРТОВИМИ ДВИГУНАМИ СУХОВАНТАЖНИХ СУДЕН

Савчук В.П. [✉], Макарчук Д.В., Пошивай І.Г. Дзигар А.К.

Херсонська державна морська академія, Україна

Анотація

Ключові слова: оптимізація, малообертотвий двигун, питома витрата палива, індекс енергоефективності, пропульсивний комплекс

Робота присвячена методу оптимізації питомої витрати палива малообертотвими двигунами суховантажних суден з урахуванням сучасних вимог щодо енергоефективності судноплавства. Зменшення впливу викидів парникового газу та споживання палива є важливою метою у морській галузі, зокрема застосуванням індексу енергетичної ефективності для нових суден (EEDI). Робота розглядає методику визначення потужності пропульсивної системи, вплив факторів на питому витрату палива, а також розрахунки на основі конкретного прикладу. Результати досліджень вказують на можливість підвищення економічності дизельних двигунів у діапазоні навантажень до 7800 кВт.

Вступ

Однією із цілей у морській галузі сьогодні є зменшення впливу викидів суднами парникового газу CO₂ та, відповідно, максимально можливого зменшення споживання палива. Це також означає, що індекс енергетичної ефективності для нових суден (Energy Efficiency Design Index, EEDI), буде зменшуватися. EEDI регламентує кількість CO₂, що викидається суднами у відношенні до перевезеного вантажу, і вимірюється в грамах CO₂ на DW на морську милю. Значення EEDI розраховується на основі максимальної вантажопідйомності (поки що 70 % для контейнерних суден), потужності пропульсивної системи, швидкості судна, SFOC (питомої витрати палива) та типу палива. Для головного двигуна застосовується 75 % від встановленої максимально тривалої потужності (Specified Maximum Continuous Rating SMCR) для розрахунку показника EEDI, в якому також враховуються викиди CO₂ від допоміжних двигунів. Також застосовуються певні коригування, що враховують, наприклад, наявність систем утилізації тепла. Згідно з правилами, остаточно визначеними 15 липня 2011 року, EEDI зводиться до визначення певного фактору в порівнянні з контрольним значенням. Таким чином, судно, контракт на виготовлення якого буде укладено після 1 січня 2025 року, повинно мати на 30 % нижче значення EEDI, ніж референтний показник 2013 року [1].

Актуальність досліджень

Актуальність дослідження полягає у зростаючій увазі до енергоефективності та екологічної

сталості у судноплавстві. Зменшення викидів парникових газів та оптимізація витрати палива стають ключовими завданнями у галузі морського транспорту, особливо з урахуванням строгих нормативних вимог щодо викидів та енергоефективності, встановлених міжнародними організаціями. Розробка методів оптимізації використання палива та визначення потужності пропульсивних систем стає необхідною для судноплавства, щоб забезпечити високу конкурентоспроможність, зменшити витрати та мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище. Такі дослідження є важливим кроком у напрямку створення більш ефективних та екологічно чистих морських транспортних засобів.

Викладення основного матеріалу

Довідковий індекс для конкретного типу судна розраховується на основі даних суден, побудованих у період з 2000 по 2010 рік. Відповідно до керівних принципів EEDI, запроваджених 1 січня 2013 року, необхідне значення EEDI для нових суден зменшується у три фази. Це призводить до остаточного зниження EEDI на 30% (фаза 3) порівняно з еталонним значенням для судна, побудованого після 2025 року (рис. 1).

Для балкерів референтний та досягнутий EEDI обчислюється на основі 100 % SMCR. Базова швидкість повинна відповідати такому навантаженню судна на рівні 75 % режиму SMCR та корпусу в такому стані, як при ходових випробуваннях [2].

На питому витрату палива SFOC двигуна впливають різні фактори, які можуть підвищити його ефективність і ефективність силової

установки. На термодинамічну ефективність двигуна впливає відношення максимального тиску згоряння до середнього ефективного тиску p_z/p_e , при цьому вище його значення призводить до зниження SFOC. Вибір двигуна з вищим значенням SMCR, ніж вимагається для судна, і зниження його до потужності, яка відповідає

проектним характеристикам судна призведе до того, що скориговане значення потужності розвиватиметься при нижчому середньому ефективному тиску. Це дозволяє оптимізувати процес згоряння, а не максимізувати вихідну потужність, тим самим покращуючи паливну ефективність.

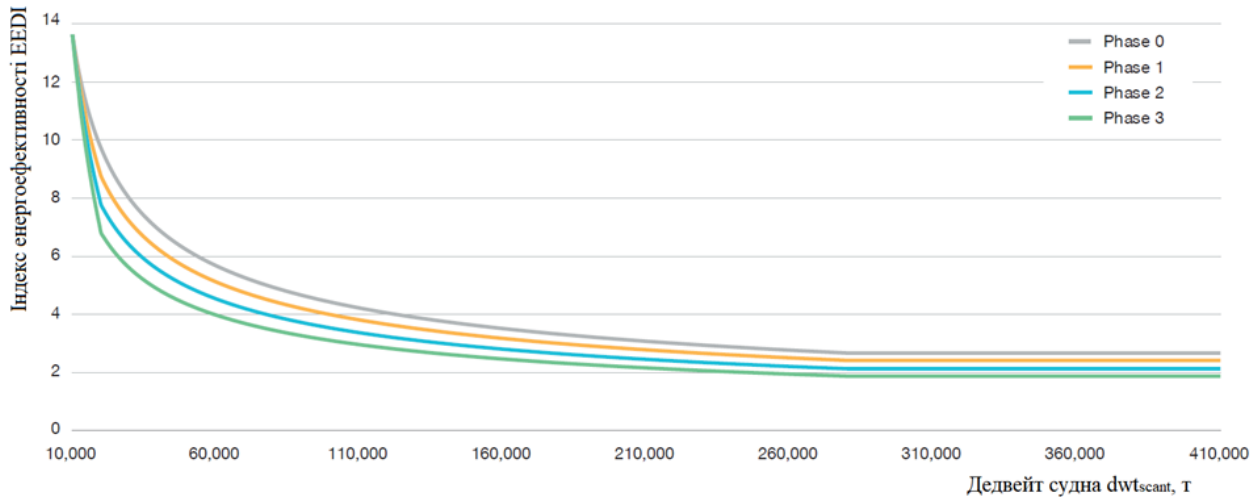


Рисунок 1. Вимоги до індексу енергоефективності EEDI балкерів [1]

Мінімальна потужність пропульсивного комплексу. Хоча зниження встановленої потужності судна визнано методом отримання нижчого значення EEDI, воно також викликало занепокоєння тим, що це може призвести до недостатньої потужності суден зі зниженою маневреністю у важку погоду. В результаті цього ІМО опублікувала метод оцінки для визначення мінімальної рушійної потужності, необхідної для підтримки безпечної маневреності суден у несприятливих умовах. Слід зазначити, що цей метод оцінки в даний час діє для фаз 0 та фази 1 EEDI. Очікується, що він також буде включений до фази 2 EEDI, яка буде діяти з 1 січня 2020 року.

Мінімальна необхідна потужність рушія може бути визначена за оцінкою рівня 1 або 2. Рівень оцінки 1 дозволяє розрахувати мінімальне значення потужності, необхідне на основі типу судна та дедвейту. Згідно вимог ІМО для балкерів мінімальна пропульсивна потужність визначається за виразами [3]:

- для суден, дедвейт яких не перевищує 145 тис. т.

$$N = 0,0763 \cdot DW + 3374,3;$$

- для суден, дедвейт яких більше 145 тис. т.

$$N = 0,0490 \cdot DW + 7329,0.$$

Для аналізу методу призначення показника SMCR із зменшеним значенням середнього ефективного тиску на величину SFOC було прийнято судно балкер «CSL Tarantau», номер ІМО 9600982, що має дедвейт 71900 тон. В якості головного двигуна на балкері встановлений дизель виробництва MAN B&W моделі 5S65ME-C. Головний двигун має номінальну ефективну потужність 10430 кВт при частоті обертання колінчатого валу 81 хв⁻¹. Виробником судна було закладено додатково резерв потужності головного двигуна 800 кВт на реалізацію потреб валогенератору та запас на зміну технічного стану головного двигуна 670 кВт (6,4 %), то пропонуване нове значення режиму SMCR становить:

$$N_{ен} = N'_{ен} + N_{вр} + N_{д} = 8150 + 800 + 670 = 9620 \text{ кВт},$$

де $N'_{ен}$ – необхідна пропульсивна потужність головного двигуна для забезпечення швидкості судна 13,5 вузлів, $N'_{ен} = 8150$ кВт. Отримане значення потужності не виходить за межу мінімально допустимого його значення згідно рекомендацій ІМО для даного типу суден 8860 кВт.

Враховуючи той факт, що головний двигун працює за швидкісною (гвинтовою) характеристикою, то оновлене значення встановленої (специфікаційної) частоти обертання складе:

$$V_{сн} = \sqrt[3]{\frac{N_{ен}}{k_{2н} \cdot c_3}} = \sqrt[3]{\frac{9620}{0,029 \cdot 145826,3}} = 78,8 \text{ мВ}^{-1},$$

де $k_{2н}$ – коефіцієнт моменту гребного гвинта на режимі SMCR;

c_3 – коефіцієнт, що для даного судна становить $c_3 = 145826,3$.

Обмежувальні та гвинтові характеристики для вибраного режиму навантаження представлено

на рис. 2, з якого видно, що вибраний режим SMCR не менше мінімального значення середнього ефективного тиску.

Використання математичного апарату додатку [4] дозволило отримати розрахунки питомої витрати палива для обох варіантів налаштування головного двигуна судна (рис. 3). Отримані результати вказують на можливість підвищення економічності дизеля до 2,3 г/(кВт·год) в діапазоні потужностей до 7800 кВт.

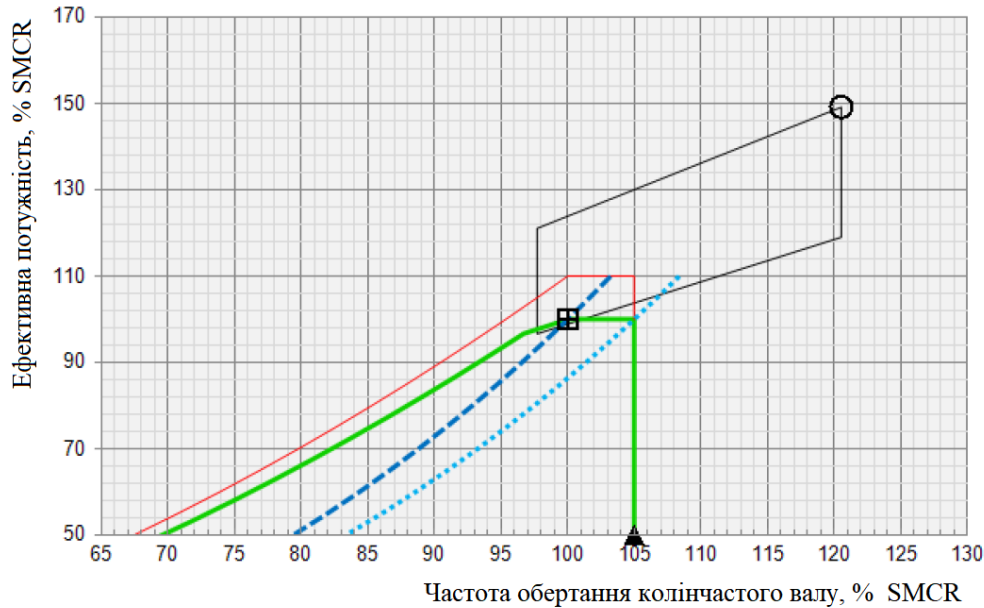


Рисунок 2. Обмежувальні та гвинтові характеристики головного двигуна: — обмежувальні характеристики для тривалого режиму навантаження; — обмежувальні характеристики для короточасного режиму навантаження; — номінальна гвинтова характеристика; — характеристика «легкого» гвинта

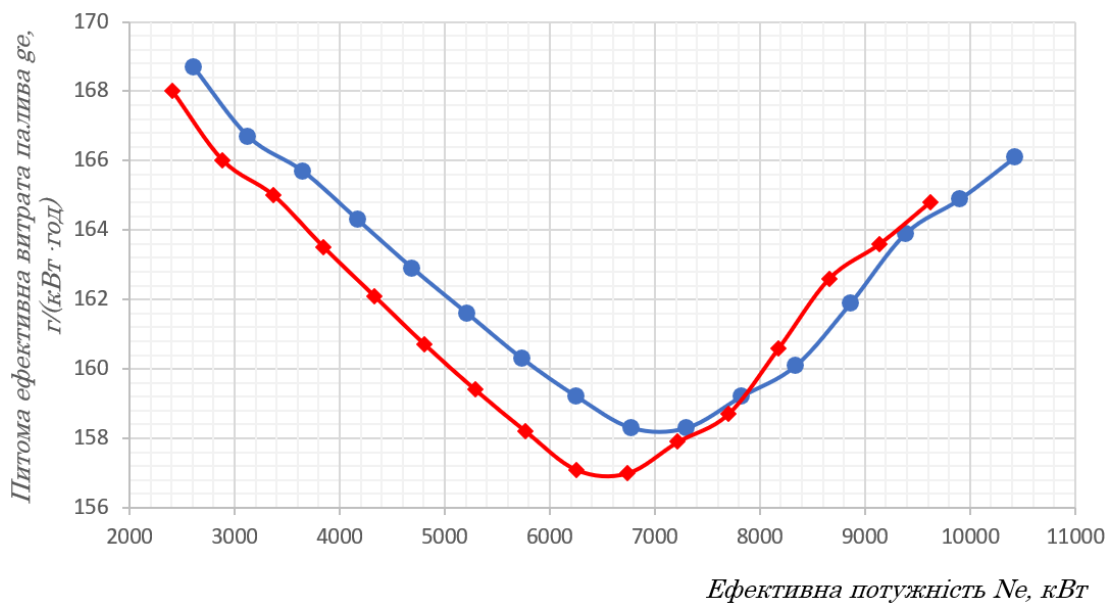


Рисунок 3. Залежність питомої витрати палива для базового та пропонованого варіантів налаштування головного двигуна: ● – базовий варіант; ◆ – варіант налаштування до часткових навантажень

Висновки

У роботі розглянуто методіку оптимізації питомої витрати палива малообертовими двигунами суховантажних суден, що стає актуальним у контексті зростаючої уваги до енергоефективності та екологічної сталості у судноплаванні.

Розробка методів оптимізації використання палива та визначення потужності пропульсивних систем стає необхідною для забезпечення високої конкурентоспроможності та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище у сфері морського транспорту.

Дослідження показало можливість підвищення економічності дизельних двигунів у діапазоні навантажень до 7800 кВт, що є важливим кроком у напрямку створення більш ефективних та екологічно чистих морських транспортних засобів.

Оптимізація питомої витрати палива та визначення потужності пропульсивних систем є ключовими аспектами розвитку енергоефективного судноплавання, що відповідає сучасним екологічним та економічним вимогам у сфері морського транспорту.

Література

[1]. Propulsion Trends in Bulk Carriers. Contributor, MAN Energy Solution, 2022, 28 p.

[2]. Annex 9. Resolution MEPC.364(79) 2022 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships.

[3]. 2013 Interim guidelines for determining minimum propulsion power to maintain the manoeuvrability of ships in adverse conditions, as amended (Resolution MEPC.232(65), as amended by resolutions MEPC.255(67) and MEPC.262(68). IMO, 2015.

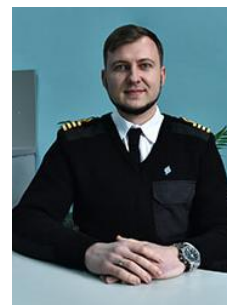
[4]. <https://www.man-es.com/marine/products/planning-tools-and-downloads/ceas-engine-calculations>

Відомості про авторів

Володимир Савчук, к.т.н., доцент, завідувач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-5266-850X](https://orcid.org/0000-0002-5266-850X).



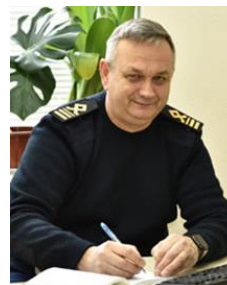
Дмитро Макарчук, к.т.н., доцент кафедри, в.о. завідувача кафедри судноводіння, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-4299-6614](https://orcid.org/0000-0002-4299-6614).



Іван Попивай, аспірант кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна.



Анатолій Дзигар, механік I розряду, старший викладач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-5947-6263](https://orcid.org/0000-0001-5947-6263).



ДІАГНОСТУВАННЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ СИСТЕМ ЗМАЩЕННЯ ВИСОКООБЕРТОВИХ ДИЗЕЛІВ

Савчук В.П.[✉], Курносенко Д.В., Білоусов Є.В. Сатулов А.І.

Херсонська державна морська академія, Україна

Анотація

Ключові слова: діагностика, високообертвий двигун, моторна олива, несправність, змащення.

Робота присвячена діагностиці несправностей систем змащення високооберткових дизелів внутрішнього згорання. Вказуються обмежені можливості визначення динаміки зміни технічного стану цих систем, особливо їх елементів, що викликає проблеми з контролем за їх працездатністю. Мета дослідження полягає у запобіганні пошкодженню підшипників колінчастого валу шляхом встановлення відповідних систем діагностики. Для цього важливо встановити зв'язок між параметрами системи змащення та її функціональним станом. Розглянуто різні види несправностей, які можна діагностувати, і проведено стендові експерименти для аналізу їх впливу на характеристики системи змащення.

Вступ

Зазвичай високооберткові двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ), що мають систему змащування (СЗ) із «мокрим» картером, мають обмежені можливості визначення динаміки зміни технічного стану її елементів, оскільки безперервно можуть контролюватись тільки значення температури та тиску моторної оливи в центральній масляній магістралі, які дають можливість оцінити працездатність системи в цілому або констатувати існуючу відмову її критичних елементів, що викликають причини падіння тиску моторної оливи та її перегріву.

Актуальність досліджень

Ефективна робота високооберткових ДВЗ залежить від надійності та функціональності систем змащення. Однак, існуючі методи діагностики не завжди забезпечують достатньої інформації про стан цих систем, що може призводити до появи серйозних несправностей та витрат на ремонт. Тому важливо проводити дослідження, спрямовані на розробку більш ефективних методів діагностики та контролю за системами змащення. Результати таких досліджень можуть бути корисними для підвищення надійності та продуктивності цих двигунів, а також економії витрат на їх обслуговування та ремонт.

Мета дослідження. Попередити пошкодження підшипників колінчастого валу через порушення функціонування елементів СЗ чи характеристик моторної оливи можливо шляхом оснащення двигунів відповідними системами діагностування. Для функціонування таких систем

необхідно встановити кореляційні зв'язки між структурними та функціональними параметрами СЗ високооберткових ДВЗ та аналіз достатності використання наявного діагностичного обладнання для моніторингу та діагностування найбільш розповсюджених варіантів порушення працездатності складових елементів СЗ.

Викладення основного матеріалу

Показниками, що можуть використовуватися для визначення зміни технічного стану елементів СЗ та в'язкості моторної оливи від допустимих заводом виробником, є тиск, витрата та температура моторної оливи. Також необхідно враховувати особливості компонування СЗ та конструктивні особливості її елементів та вузлів.

Виділимо основні несправності, що можна діагностувати непрямыми методами:

- забруднення сітки оливоприймача;
- знос деталей насоса оливи;
- заклинювання золотника запобіжного клапану;
- інтенсивне забруднення фільтра оливи;
- відхилення температури моторної оливи від нормативної;
- відхилення в'язкості моторної оливи від встановленого діапазону заводом-виробником.

Наведені несправності не враховують зміни технічного стану підшипникових вузлів, хоча не виключають можливості їх узагальненого діагностування. Дане питання потребує проведення окремих досліджень, зокрема в напрямку

визначення впливу зносу підшипникових вузлів на характер пульсацій тиску моторної оливи.

Нами проведено ряд стендових експериментальних досліджень впливу порушень працездатності елементів СЗ дизеля Д246.4 на її характеристики. Дослідження проводились для наступних варіантів технічного стану СЗ:

Варіант 1. Дослідження характеристик СЗ, що не має відхилень експлуатаційних показників від нормативних.

Варіант 2. Дослідження характеристик СЗ при підвищеній витраті моторної оливи через головну оливну магістраль. Здійснювалось шляхом збільшення площі прохідного перерізу стендового дроселю в напірній лінії.

Варіант 3 (За). Дослідження характеристик СЗ при підвищеному значенні опору на лінії всмоктування моторної оливи. Здійснювалось шляхом

зменшення площі прохідного перерізу стендового дроселю на лінії всмоктування.

Варіант 4. Виконувалось дослідження характеристик СЗ при підвищеному значенні опору фільтру оливи (експлуатація дизеля із фільтром оливи, що має значне забруднення фільтруючого елементу).

Варіант 5. Виконувалось дослідження характеристик СЗ при фіксованому відкритому положенні золотника клапану.

Графічні залежності тиску при різних значеннях частоти обертання насоса в контурі подачі та очищення моторної оливи СЗ при різних варіантах технічного стану її елементів наведено в рис. 1.

Аналіз отриманих результатів дозволяє встановити кореляційні зв'язки між функціональними та структурними параметрами типових СЗ (табл. 1).

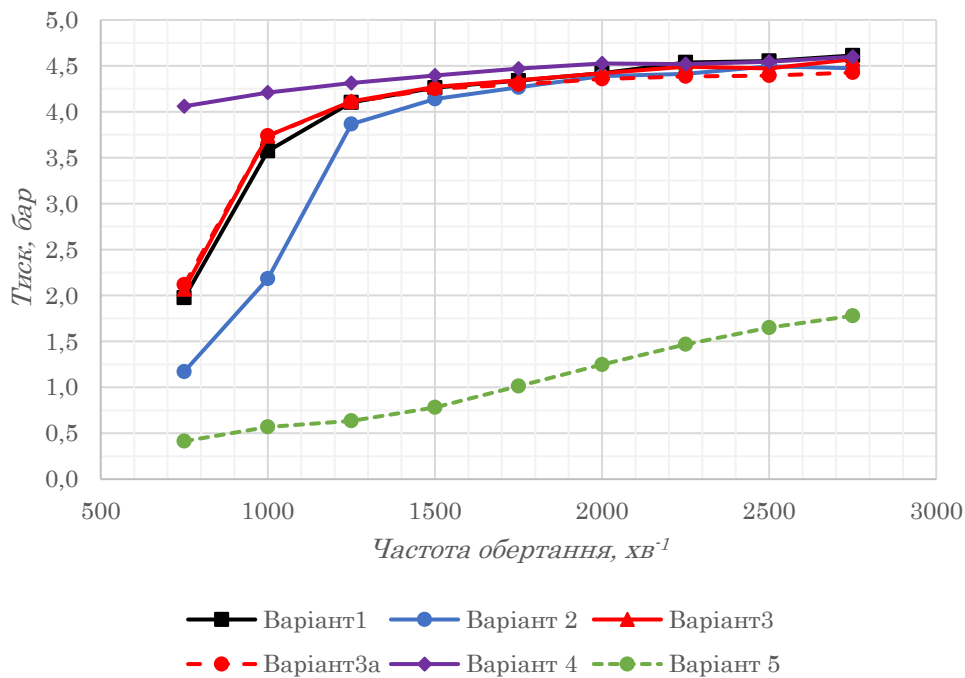


Рисунок 1. Залежність тиску в контурі подачі та очищення моторної оливи СЗ при різних варіантах технічного стану її елементів

Таблиця 1. Взаємозв'язок між функціональними та структурними параметрами СЗ

Варіант дослідження	Структурні параметри	Функціональні параметри		
		Тиск в напірній магістралі	Тиск в контурі подачі та очищення моторної оливи	Перепад тиску на фільтрі оливи
Варіант 2	Знос підшипникових вузлів КШМ	+	+/-	+/-
Варіант 3,3а	Забруднення оливоприймача	+/-	+/-	+/-
Варіант 4	Забруднення фільтру оливи	+	+/-	+/-
Варіант 5	Заклинювання золотника запобіжного клапану	+	+	+

Прим. Позначки + та +/- вказують на можливість використання функціонального параметру на всьому діапазоні частот обертання насоса моторної оливи чи тільки на його частині.

Висновки

Ступінь інформативності систем діагностування СДВЗ в напрямку контролю технічного стану систем змащування високооберткових дизелів є недостатнім та потребує розширення функціоналу. Проведені дослідження в напрямку встановлення впливу зміни технічного стану елементів СЗ на її робочі характеристики вказують на можливість заповнити недолік отримуваної діагностичної інформації, наприклад, шляхом аналізу характеристик золотника запобіжного клапану.

Література

[1]. Seth B., Field N. Oil Pressure Signatures for Engine Lubrication System Monitoring. SAE Technical Paper, Letter 840063, 1984, pp. 364-371. <https://doi.org/10.4271/840063>

[2]. Савчук В.П., Білоусов Є.В., Зінченко Д.О., Бойко М.О. Система моніторингу шатунних підшипників колінчастих валів судових двигунів внутрішнього згорання. *Розвиток транспорту*. 2022. №1(12). С. 64-74. <http://dx.doi.org/10.33082/td.2022.1-12.06>

[3]. Савчук В.П., Курносенко Д.В., Тулученко Г.Я., Котов А.І. Вдосконалення діагностування елементів систем мащення судових високооберткових двигунів внутрішнього згорання. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування: міжнародна наук.практ. конф.*, ХДМА. 2022. С. 33-38.

[4]. Курносенко Д.В., Савчук В.П., Білоусов Є.В., Дзигар А.К., Котов А.І. Стенд для дослідження параметрів елементів систем мащення високооберткових двигунів внутрішнього згорання. *Двигуни внутрішнього згорання*. 2021. № 2. С. 73-79. <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2021.2.10>

[5]. Курносенко Д.В., Савчук В.П., Білоусов Є.В. Дослідження впливу характеристик масляних фільтрів типу «spin-on» на робочі

параметри масляної системи. *Розвиток транспорту*. 2021. № 4(11). С. 52-64.

<https://doi.org/10.33082/td.2021.4-11.05>

Відомості про авторів

Володимир Савчук, к.т.н, доцент, завідувач кафедри експлуатації судових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-5266-850X](https://orcid.org/0000-0002-5266-850X).



Дар'я Курносенко, асистент кафедри експлуатації судових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0003-3417-8766](https://orcid.org/0000-0003-3417-8766)



Євген Білоусов, д.т.н., професор, професор кафедри експлуатації судових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-8185-8209](https://orcid.org/0000-0001-8185-8209).



Анатолій Сатулов, механік I розряду, старший викладач кафедри експлуатації судових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0003-2985-3755](https://orcid.org/0000-0003-2985-3755).



ДОСЛІДЖЕННЯ ТЯГО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ МАНЕВРОВОГО ЛОКОМОТИВА ЧМЕЗ НА РІЗНИХ ВАРІАНТАХ ПІДКЛЮЧЕННЯ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ

Горобченко О.М., Заїка Д.О. ✉

Державний університет інфраструктури та технологій, Україна

Анотація

Ключові слова: ефективність експлуатації, математична модель, тягово-енергетичні показники, економія палива, тепловоз, керування локомотивом

Розглянуто математичну модель визначення тяго-енергетичних показників маневрового локомотива ЧМЕЗ при роботі на 2-х та 4-х тягових електричних двигунах. Проаналізовано отримані залежності витрати палива на подолання заданої відстані, сили тяги від швидкості руху локомотива, залежності витраченого часу на подолання заданої відстані в порівнянні з штатною роботою локомотива для 3,4,5 (найбільш вживаними для маневрової роботи) позиції контролера машиніста обравши однакову ділянку руху та вагу поїзда. З отриманих результатів можна зробити висновок, що за допомогою різних варіантів підключення тягових електричних двигунів можна отримати економію палива на виконання маневрової роботи.

Вступ

Тягові розрахунки є ключовим елементом в залізничному транспорті та представляють собою одну з основних дій для організації залізничних робіт та їх проектування. Методологія тягових розрахунків включає різноманітні методи та прийоми, що охоплюють визначення маси поїзда, обчислення швидкості та часу руху, оцінку витрат палива та електроенергії для тяги, а також розв'язання завдань, пов'язаних з гальмуванням.

Ключовим напрямком в розвитку методів тягових розрахунків є комп'ютерне моделювання з використанням програмного коду. Суть їх полягає в розробці теоретичного підґрунтя для оптимізації витрат палива та енергії, моделюванні руху поїзда на визначеному шляху для виявлення потенційних резервів підвищення ефективності залізниць і раціонального використання рухомого складу [1].

Для удосконалення процесів керування локомотивів широко застосовуються методи на основі теорії штучного інтелекту [2,3].

Використовуючи існуючі дослідження методів тягових розрахунків та створення математичних моделей руху локомотива, в даній роботі пропонується розробка нового підходу до тягового розрахунку маневрового локомотива ЧМЕЗ з урахуванням можливості відключення паралельно з'єднаних ТЕД.

Актуальність досліджень

Багато фахівців присвятили свої праці дослідженню та удосконаленню тягових розрахунків локомотива. У роботі [4] висвітлено основні положення для тягових розрахунків промислового залізничного транспорту, особливості тягових розрахунків для вантажних поїздів на тепловозній тязі, розглянуто основний питомий опір руху поїзда, додаткові питомі опори руху, повний опір руху поїзда. Посібник Бобири Д.В., Білоконя І.М., Очкасова О.Б., Сердюка В.Н. [5] описує точність розрахунків, координати та довжини шляхів маневрового рейсу, методи розрахунку параметрів руху на заданому інтервалі шляху, розрахунок шляху та часу руху локомотива на заданому інтервалі, розрахунок максимальної швидкості розгону в маневровому напіврейсі методом ітерації. В статті [6] розглянуто питання підходів до проведення тягових розрахунків за допомогою автоматизованих комп'ютерних систем, було встановлено основну методику розрахунку для конкретних умов роботи для раціонального використання енергетичних ресурсів. Аналіз закордонних статей [7,8] відкриває сутність енергетичного моделювання залізничного транспорту. Симуляції сили тяги локомотива є фундаментальною частиною таких моделей. В даних роботах створено першу двовимірну модель локомотива (без деталізації контакту колесо – рейка) та більш удосконалену 2-гу версію з повністю деталізованою моделлю контакту колесо-рейка. Попередні роботи які стосуються даної тематики не дають змогу в певній мірі виконати аналіз руху локомотива на різній кількості

підключених ТЕД. В даній математичній моделі пропонується розробка нового підходу до тягового розрахунку маневрового локомотива ЧМЕЗ з урахуванням можливості відключення паралельно з'єднаних ТЕД.

Викладення основного матеріалу

Витрати палива на тягу суттєво залежать від режиму руху локомотива, при виборі раціонального режиму руху на станції, або перегоні можливо зменшити витрати палива. Для можливості розробки системи управління автоматичним переведення режиму роботи локомотива ЧМЕЗ, необхідно виконати розрахунок моделі руху в штатному режимі та на частковому відключенні ТЕД при маневровій роботі.

Тягово-енергетичні показники на маневрову роботу локомотива розраховують шляхом виконання тягових розрахунків.

Для визначення прискорення локомотива a , m/c^2 , використовуючи другий закон Ньютона отримуємо наступний вираз:

$$a = \frac{F_k - F_{опору}}{\Sigma m} = \frac{F_k - (W_{04} + W_l)}{(m_s + m_l)},$$

де, F_k – сила тяги локомотива, Н;

W_{04} – основний питомий опір руху поїзда, Н;

W_l – основний питомий опір руху локомотива, Н;

$m_s + m_l$ – сумарна маса локомотива та рухомого складу, кг.

Отримавши значення прискорення локомотива a , розраховані в минулій формулі визначимо поточну швидкість $V_{початкове}$ локомотива через момент часу t_{int} в км/год.:

$$v'_{поточне} = v_{початкове} + a \cdot t_{int},$$

де, $V_{початкове}$ – початкова швидкість локомотива в км/год;

a – прискорення локомотива в m/c^2 ;

t_{int} – інтервал часу в секундах.

Для визначення пройденого шляху локомотивом S_{pr} в метрах через t_{int} часу необхідно розрахувати наступну формулу:

$$S_{pr} = v_{поточне} \cdot t_{int},$$

де, $V_{початкове}$ – поточна швидкість локомотива в m/c ;

t_{int} – інтервал часу в секундах.

Отримавши значення пройденого шляху можливо розрахувати скільки палива локомотив витратив на виконану роботу в г:

$$G_e = \frac{F_k \cdot S_{pr}}{t_{int}} \cdot t_{int} \cdot \frac{g_e}{3600},$$

де, F_k – сила тяги локомотива, кН;

S_{pr} – пройдений шлях локомотивом, м;

t_{int} – інтервал часу, с;

g_e – витрата палива в г / кВт т.

Отримані залежності $G_e = f(S_{pr})$ за рахунок математичної моделі для тягово-енергетичних показників для 5-ї позиції контролера машиніста представлені на рисунку 1.

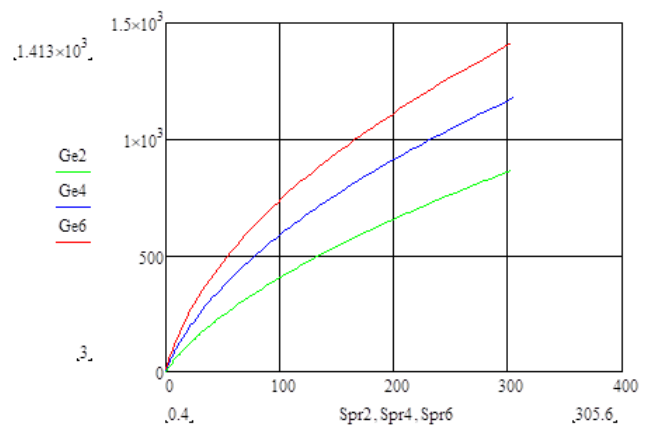


Рисунок 1. Залежності $G_e = f(S_{pr})$:

$G_{e6} = f(S_{pr6})$ – кількість витраченого палива на подолання заданої відстані для 6 ТЕД;

$G_{e4} = f(S_{pr4})$ – кількість витраченого палива на подолання заданої відстані для 4 ТЕД;

$G_{e2} = f(S_{pr2})$ – кількість витраченого палива на подолання заданої відстані для 2 ТЕД

Висновки

Аналізуючи результати отриманих залежностей тягово-енергетичних показників маневрового локомотива при роботі на 2-х та 4-х тягових електричних двигунах можна говорити про те, що доцільно використовувати різні варіанти підключення ТЕД.

В результаті використання різних варіантів підключення ТЕД можна отримати економію палива на виконання маневрової роботи на часткових навантаженнях в залежності від експлуатаційних умов.

Література

[1]. Барибін М.А., Фалендиш А. П., Гатченко В. О., Клецька О. В., Кіріцева О. В. Інформаційно-розрахунковий комплекс «Тягові розрахунки» та математичні методи пошуку основних параметрів руху поїзда як основи оптимізації витрат ресурсів на тягу. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2020. Т. 25, № 4. С. 15-27.

<https://doi.org/10.18664/iksz.v25i4.219530>

[2]. Горобченко О. М. Теоретичні основи оцінки інформативності ознак поїзної ситуації для роботи інтелектуальних систем керування локомотивом. *Транспортні системи і технології*. 2021. № 38. С. 223-231. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2021-38-220-21>

[3]. Горобченко О. М., Заїка Д. О. Огляд методів та перспективи використання штучного інтелекту на залізничному транспорті. *Innovations and prospects of world science. Proceedings of the 6th International scientific and practical conference*. Vancouver, 2022. С. 184-192. URL: <https://sci-conf.com.ua/vi-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-innovations-and-prospects-of-world-science-2-4-fevralya-2022-goda-vankuver-kanada-arhiv/>

[4]. Бобирь Д.В., Капіца М.І., Сердюк В.Н. Теорія локомотивної тяги. Тягові розрахунки для промислового залізничного транспорту: навч. посіб. Дніпро: Дріант-друк, 2022. 112 с.

[5]. Бобирь Д.В., Білоконь І.М., Очкасов О.Б., Сердюк В.Н. Теорія локомотивної тяги. Тягові розрахунки для маневрової роботи: навч. посіб. Дніпро: Дріант-друк, 2023. 129 с.

[6]. Фалендиш А.П., Гатченко В.О., Возненко С.І., Клецька О.В., Барибін М.А.

Математичне моделювання основних параметрів у тягових розрахунках. *Транспортні системи і технології*. 2020. № 35. С. 102-112.

<https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-11>

[7]. Wu Q., Spiryagin M., Cole C. Train energy simulation with locomotive adhesion model. *Railway Engineering Science*. 2020. Vol. 28. P. 75-84. <https://doi.org/10.1007/s40534-020-00202-1>

[8]. Wu Q., Spiryagin M., Wolfs P., Cole C. Traction modelling in train dynamics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2018. Vol. 233, no. 4. P. 382-395.

<https://doi.org/10.1177/0954409718795496>

Відомості про авторів

Олександр Горобченко, д.т.н, професор, в.о. декана факультету «Інфраструктури та рухомого складу залізниць», Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, Україна., [ORCID ID: 0000-0002-9868-3852](https://orcid.org/0000-0002-9868-3852).



Денис Заїка, аспірант, Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, Україна., [ORCID ID: 0000-0003-0693-9580](https://orcid.org/0000-0003-0693-9580).



ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВОДООПРІСНЮВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ЗВОРОТНЬОГО ОСМОСУ

Погорлецький Д.С.[✉], Грищук І.В., Худяков І.В.

Херсонська державна морська академія, Україна

Анотація

Ключові слова: водоопріснювальна установка, експлуатація системи опріснення, зворотній осмос, фільтрація

Робота енергетичного та технологічного обладнання сучасних суден пов'язана зі споживанням значної кількості прісної води. Вимушеним при водозабезпеченні судна є поповнення запасів води під час стоянки в порту, або на рейді. Придбання берегової води для судновласників дуже дороге. Природний шлях отримання необхідної кількості прісної води – це опріснення морської води. Ефективність використання промислових та транспортних морських суден та рівень комфорту на них значною мірою залежать від їхньої забезпеченості прісною водою. Всі сучасні судна обладнані дистиляційними або мембранними зворотньоосмотичними опріснювальними установками. Сучасна опріснювальна установка, незалежно від принципу її дії, є складною інженерною спорудою.

Вступ

Опріснення та знесолення морської води при створенні вискоефективних та економічно виправданих установок можуть на сучасному рівні техніки великою мірою сприяти вирішенню цієї проблеми. Розвиток опріснювальної технології на базі широкого комплексу наукових досліджень досяг високого ступеня досконалості. Опріснювальні комплекси дозволяють не тільки виробляти прісну воду, але і отримувати побічні продукти. Протягом багатьох років вивчалися проблеми термічного опріснення морської води стосовно умов роботи судових випарників. При написанні багатьох праць по експлуатації та обслуговуванні опріснювальних установок були вивчені та використані результати відомих досліджень з питань класифікації, конструкцій, накипоутворення та інтенсифікації теплообміну судових опріснювальних установок морської води. На даний час існують різні типи та конструкції опріснювальних установок для опріснення морської води. Сучасні опріснювальні установки більш економічні, повністю автоматизовані і оснащені відповідними засобами сигналізації, виготовляють дистилат високої якості при надійній роботі установки, володіють відносно малими енерговитратами та великою продуктивністю опрісненої води [2]. Однак збільшення продуктивності при заданих габаритних обмеженнях і регламентовані таким чином умови адіабатного випаровування неминуче накладають відбиток і умови відкладення накипу. Звідси стає очевидним, що досягти найбільш істотних результатів, у розвитку судових опріснювачів

миттєвого закипання можна лише тоді, коли вони розглядаються як об'єкт одночасного впливу двох вищезгаданих процесів. Така постановка завдання модернізації судових опріснювальних установок в багатьох аспектах буде до сить новою [1-5].

Актуальність досліджень

Водопріснювальні установки (ВОУ) мембранного типу з використанням ефекту «зворотний осмос» є останнім досягненням науки, техніки та технології в отриманні прісної води з морської, підвищеної солоності або стічних вод. Даний тип очищення води відноситься до галузі нанотехнологій, тому що одержання води відбувається на молекулярному рівні [2-6].

По мірі розвитку судноплавства потреба у прісній воді зростала. З появою парових двигунів прісна вода стала необхідна для парових котлів. Перша ВОУ на судні була встановлена у 1884 р., це була ВОУ киплячого типу з надлишковим тиском. Установка була економічно та технічно не ефективна. Надалі з'явилися вакуумні установки киплячого типу та адіабатні. На зміну їм у часі приходять ВОУ мембранного типу. Вперше на промислових судах така ВОУ «ATLANTIC SW 1000», почала встановлюватись з 2000 років, набувся досвід її експлуатації і проводились наукові та технічні дослідження [2-6]. У 20-ті роки XX ст. вивчення цього процесу активізувалося. 1927 р. німецька фірма «Сарторіус» отримала перші зразки штучних мембран. Після Другої світової війни американці, отримавши

німецькі розробки, налагодили виробництво ацетатцелюлозних нітроцелюлозних мембран. Лише на початку 60 років, почалося широке виробництво синтетичних полімерних матеріалів, що стали основою при промисловому застосуванні ефекту «зворотного осмосу». У 70-ті роки розпочалося виготовлення перших зразків ВОУ промислового застосування на суднах. Порівняно швидко ВОУ мембранного типу стали одним із найбільш економічних, універсальних і надійних методів очищення води, що дозволяє знизити концентрацію компонентів, що знаходяться у воді, на 98...99,5 % і практично повністю позбутися мікроорганізмів та вірусів.

Формулювання цілей. Водопріснювальна установка мембранного типу з використанням ефекту «зворотного осмосу» є сучасною технологією отримання високої якості і кількості прісної води, отримувати якісну прісну воду можна з будь якої води: як морської, так і з солонуватої, прісної і навіть стоків. Принцип зворотного осмосу полягає в тому, що коли два солоних розчину різної концентрації розділені напівпроникною мембраною, природний принцип осмосу дозволить воді з низьким хімічним потенціалом спонтанно переходити з менш концентрованого розчину в більш концентрований розчин. Фільтруюча здатність ВОУ мембранного типу з використанням ефекту «зворотний осмос» є унікальною. Жоден з фільтрів, що працюють за іншим принципом (механічне очищення, адсорбція або іонний обмін), не може забезпечити такого ступеня очищення.

Викладення основного матеріалу

Водопріснювальні установки класифікуються за такими основними ознаками. Залежно від тиску в корпусі випарника - установки надлишкового та атмосферного тиску та вакуумні. Установки надлишкового тиску обмежені у застосуванні та використовуються в основному для приготування питної води та для миття.

У зв'язку з циклом силової енергетичної установки автономні, неавтономні та утилізаційні:

- Автономні водопріснювальні установки не пов'язані з роботою головного двигуна;
- Неавтономні установки використовують для своєї роботи спільні механізми або пристрої з головним двигуном;
- Утилізаційні водопріснювальні установки використовують для нагрівання та випаровування морської води тепло від двигунів внутрішнього згоряння або відбирається від парових котлів і відпрацьовану пару.

Суднові водопріснювальні установки (СВУ) призначені для отримання опрісненої води з

заборотної. Опріснена вода, отримана в СВУ, застосовується для технічних цілей та побутових потреб. За способом опріснення водопріснювальні установки (СВУ) поділяють на три групи:

- дистиляційні;
- електродіалізні;
- зворотного осмосу.

За родом джерела тепла (парові, утилізаційні, універсальні, електричні, автономні). В даний час на суднах з дизельною енергетичною установкою виключно застосовуються вакуумні одноступінчасті утилізаційні водопріснювальні випарники заборотної води, що використовують тепло прісної води, що охолоджує, замкнутий контур системи охолодження головного двигуна [1-6].

Водопріснювальні установки, що використовують принципи зворотного осмосу, поки не отримали дуже широкого використання в суднових енергетичних установках. Метод опріснення морської води так званого зворотного осмосу обумовлений існуванням сольватів. Основу таких опріснювачів становить мембрана, що є проникною для води та непроникною для розчинених у ній солей (сольватів). Забортна вода з одного боку мембрани знаходиться під тиском, що перевищує осмотичний. Під дією цього тиску частина води без солей проходить через мембрану, а решта з підвищеним вмістом солей видаляється за борт.

Осмоз або процес прямого осмосу (FO) – це фізичне явище, відоме як чисте перенесення води через напівпроникну мембрану, обумовлену різницею в хімічному потенціалі через мембрану, тобто проходження води від нижньої до більш високої концентрації розчиненої речовини збоку. Хоча феномен FO спостерігався 260 років тому, невеликі дослідження були проведені до того, як прогрес мембранних технологій, особливо зворотного осмосу (RO), був зроблений у 1960-х роках. За останні десять років інтерес до досліджень у галузі FO швидко збільшився – (рис.1), показано тренд дослідницьких публікацій FO, що базується на результатах пошуку в Engineering [1-6].

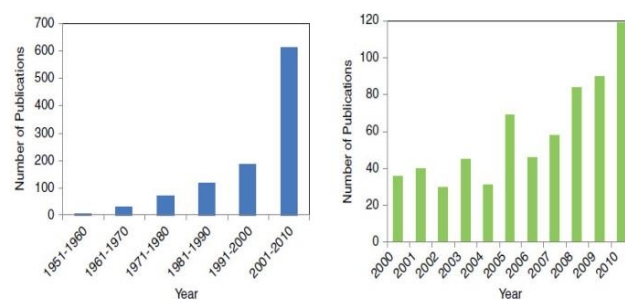


Рисунок 1. Документи, що опубліковані

Зростаюча увага до ФО здебільшого пов'язана з його потенціалом для досягнення високого рівня відбракування для широкого спектру забруднюючих речовин без необхідності застосування гідравлічного тиску для поділу [2-6]. Таким чином, ФО може вигідно порівнюватись з процесами, заснованими на тиску, такими як RO, у тому сенсі, що він може мати нижчий попит на електричну енергію і, можливо, менше ущільнення від забруднення. Не дивно, що у ФО є потенціал для широкого спектру застосувань, що охоплюють обробку стічних вод на судні, опріснення морської води, а також зворотне промивання RO очищення [6]. Основна увага в цьому огляді приділяється забезпеченню стану фізичних принципів та останніх розробок ФО для опріснення морської води на судні [1-6].

Опріснювати воду на стоянці або рейді, замість того, щоб її замовляти – марнотратство, порухайте та порівняйте різницю витрати на палива з опріснювачем і без, та вартість тони палива проти тони води. Виняток – опріснювач в системі охолодження двигунів дизель-генераторів (продуктивність буде малою). Гріти опріснювач паром можна тільки через спец ежектор для просідання температури. Солоня вода нагріта вище 50 °C – гарантований накип у трубках або на пластинках, тріщини у трубках. У звичайному опріснювачі бактерії не гинуть – температура занизька, тому воду пропускають через ультрафіолетову лампу, однак ультрафіолет – допоміжний засіб. Також існують вимоги, що морська вода для опріснення з метою подальшого господарсько-питного використання повинна прийматися на судно у незабруднених районах, а за відсутності відомостей про забруднення води в районах роботи судна – не ближче ніж 25 морських миль від берега. Вода, що отримується на дистильційних опріснювальних установках будь-якого типу, може використовуватися для пиття тільки після корекції її сольового складу (мінералізації) та знезараження.

На судні «MAERSK HANOI» встановлено водоопріснювальну установку ALFA-LAVAL типу JWP-26-C термічного принципу дії. Дана опріснювальна установка термічно пов'язана з тепловою схемою головного двигуна, працює, коли двигун працює з постійним навантаженням, та сталою температурою системи охолодження, а саме НТ (високотемпературний) контур, який і є гріючим середовищем (рідина системи охолодження) для опріснювальної установки.

На перехідних (маневрених режимах, або стоянка в порту чи на рейді) установка виводиться з роботи. Якщо судно працює з короткими переходами і частими заходами в порти, нормальна робота опріснювальної установки ускладнюється. Залежність продуктивності водоопріснювальної установки від температури теплоносія (прісної

води системи охолодження головного двигуна НТ-контур) представлена на (рис. 2), на даному графічному зображенні представлено порівняння двох опріснювальних установок JWP-26-C80, що встановлена на судні, та установки більшою продуктивністю С100 для прикладу.

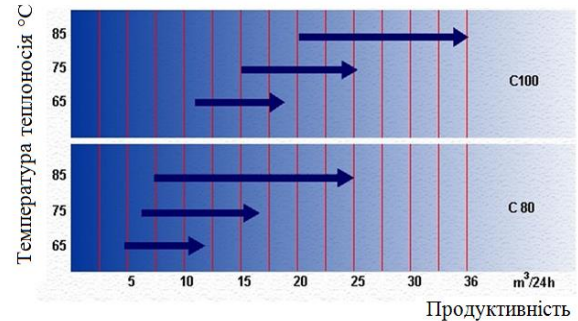


Рисунок 2. Продуктивність опріснювальної установки в залежності від температури нагріву

Ситуація ще ускладнюється тим, що судовласники, з метою економії палива, наказують суднам рухатись на половинних потужностях головного двигуна, так як потужність двигуна працюючого на гвинті фіксованого кроку є функцією оборотів або швидкості судна в кубі. Це дозволяє істотно економити паливо, але при цьому знижуються всі параметри головного двигуна, в тому числі і температури охолоджувальної води. А зниження температури гріючої води з 85 °C до 65 °C знижує продуктивність опріснювальної установки на половину, до 5 м³/добу, а це призводить до нестачі прісної води на судні, для загальносуднових систем енергетичної установки та, що не маловажно для потреб судової команди. У зв'язку з даними обставинами, на судні «MAERSK HANOI», додатково встановлено опріснювальну установку зворотного осмосу, як енергонезалежний засіб забезпечення прісною водою судової енергетичної установки судна та як один зі способів покращення енергоефективності судна в цілому.

Головною перевагою опріснювальної установки зворотного осмосу є відсутність потреби у використанні хімічних речовин для очистки. Також зменшення витрати електроенергії на насосне обладнання 17,8 кВт на продуктивність 22 м³/год. проти мінімально необхідної потужності на насос високого тиску 5,8 кВт на 20 м³/год. Ця опріснювальна установка є енергонезалежна від головного двигуна, як постачальника гріючого середовища, вона не пов'язана з тепловою схемою системи охолодження головного двигуна і може працювати на будь-яких режимах судової енергетичної установки, навіть на стоянці в порту, вона не потребує гріючого середовища, ніяких підігрівачів та подачі пару, тільки електроенергію для живлення насосних агрегатів. Цей

тип установок є перспективним і може встановлюватися на різних судах працюючих на змінних навантажувальних режимах. З огляду на все це було прийнято рішення, про встановлення додаткової опріснювальної установки зворотного осмосу для забезпечення судна прісною водою, а тим самим підвищити енергоефективність енергетичної установки (рис. 3). У морських водоопріснювальних установках застосовують тиск 6...7 МПа, який діє на певну кількість морської води у взаємодії з осмотичною мембраною.

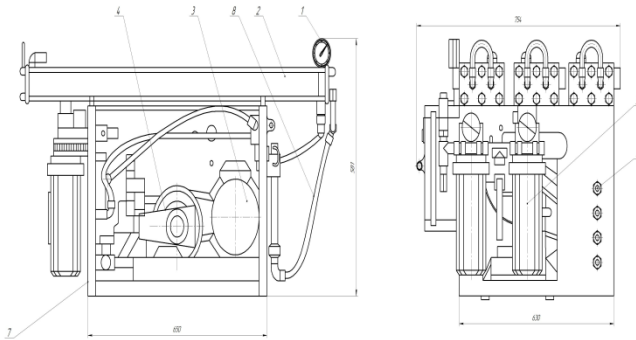


Рисунок 3. Загальний вид водоопріснювальної установки зворотного осмосу: 1 – манометр; 2 – мембранний картридж; 3 – електродвигун; 4 – насос високого тиску; 5 – фільтр; 6 – гайка; 7 – рама; 8 – шланг

Фільтраційне опріснення (зворотний ОСМОС) без зміни агрегатного стану рідини (води). Під ОСМОСОМ розуміють процес «вирівнювання» концентрації розчинених елементів у розчинах (наприклад, солей у судинах, розділених напівпроникною мембраною). Зворотний ОСМОС вимагає застосування до солоної води дуже високого тиску, який буквально «видавлює» іони солі через мембрану. Простіше кажучи, опріснення полягає в тому, що сольовий розчин виявляється під тиском з боку мембрани, проникної для води та непроникної для солі.

В результаті фільтрації способом зворотного ОСМОСУ 97 % солей і мінералів, що містяться в морській воді, відфільтровуються, а решта 3 % дають на виході чисту питну воду, згідно всіх санітарних вимог [1-6]. Саме ці чинники створили передумову для прийняття рішення використання водоопріснювальної установки. Метод опріснення гіперфільтрацією, або зворотним осмосом, заснований на фільтруванні води через мембрани, пропускають воду, але затримують сольвати. Сутність процесу пов'язана з відомим явищем осмотичного перенесення, який можна представити таким чином. Якщо напівпроникною мембраною розділені розчини різної концентрації (солоня і прісна вода), то молекули води будуть переходити з менш концентрованого розчину в більш концентрований, оскільки їх

кількість в одиниці об'єму прісної води більше, ніж в еквівалентному обсязі солоної води.

Принципова конструкція гіперфільтраційних опріснювальних установок вельми проста. Основним їх елементом є власне опріснювальний осередок, в якій на який-небудь несучій основі розміщені напівпроникні мембрани, що виготовляються з ацетат целюлози чи інших полімерних матеріалів. Мембрани укладені на плоскі рамки чи зібрані в пакети, нанесені на внутрішню поверхню пористих труб або згорнуті в рулон (рис. 4). До мембран подається морська вода і починається процес зворотно осмотичного перенесення [1-6].

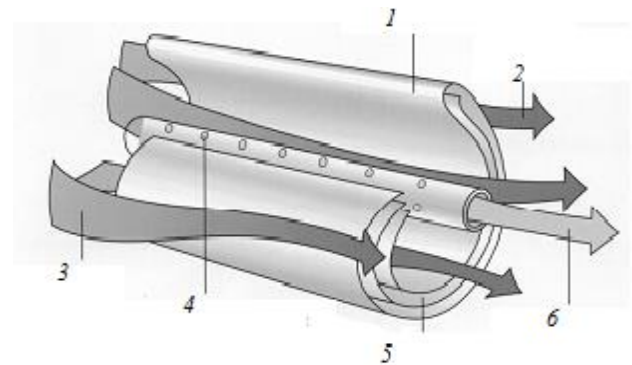


Рисунок 4. Конструкція модуля зворотно осмотичної опріснювальної мембрани: 1 – мембранний рулон; 2 – не опріснена вода; 3 – живильна вода; 4 – перфорована збирна труба; 5 – канал знесолення; 6 – опріснена вода

Це дозволяє відводити від протилежної сторони мембран опріснену воду, при цьому мембрани залишаються практично непроникними для більшості розчинених у воді солей, органічних речовин, мікроорганізмів і колоїдів. Ступінь такого опріснення залежить головним чином від солеутримуючої здатності мембран. При досить високому її значенні солевміст вихідної морської води може бути знижений до 0,5...0,3 мг/л. При проходженні морської води через осмотичну мембрану під тиском (до 5,5 МПа) 1/5 частина її опріснюється, а інша з підвищеною концентрацією солей зливається за борт, тобто вихід очищеної води становить не більше 15...17 %. При попередньому очищенні води перед зворотним осмосом, наприклад, ультрафільтрацією (мембранний процес, здійснюваний при невисокому тиску для видалення з води колоїдних часток і мікроорганізмів розміром 0,005...0,1 мм) це значення може бути доведено до 75...80 % [1-6].

До переваг опріснювальних установок зворотного осмосу відносять:

- простоту експлуатації;
- простота технічної реалізації та надійність;
- довговічність;

- велику продуктивність;
- простий процес заміни мембран та тривала працездатність мембран до їх заміни (45000 годин);
- компактність та мала вага;
- низькі питомі витрати енергії;
- низький рівень шуму;
- висока продуктивність за мінімальних експлуатаційних витрат;
- установки фільтраційного типу забезпечені автоматичною системою, що регулює робочий тиск насоса залежно від ступеня солоності води;
- дешеве опріснення морської води за рахунок виключення необхідності великої кількості тепла;
- можливість обробки різних типів вод (морської води, річкової та озерної води) за допомогою однієї установки;
- за допомогою установок фільтраційного типу (зворотний ОСМОС) можна обробляти портові води.

Висновки

На підставі виконаного аналізу особливостей експлуатації водопріснювальної установки зворотного осмосу можливо констатувати, що в даний час рішення задач з забезпечення судна прісною водою за допомогою установок даного типу є перспективним. За рахунок енергонезалежності від головного двигуна, як постачальника гріючого середовища, водопріснювальна установка не пов'язана з тепловою схемою системи охолодження головного двигуна та може працювати на будь-яких режимах суднової енергетичної установки, навіть на стоянці в порту, вона не потребує гріючого середовища, ніяких підігрівачів та подачі пару, тільки електроенергію для живлення насосних агрегатів. Цей тип установок є перспективним і може встановлюватися на різних типах суден працюючих на змінних навантажувальних режимах та змінних умовах експлуатації.

Література

- [1]. International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974. URL: [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-\(SOLAS\)-1974.aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-(SOLAS)-1974.aspx)
- [2]. Salinas Rodriguez, S.G., Schippers, J.C., Amy, G.L., Kim, I.S. & Kennedy, M.D. (eds.).

Seawater Reverse Osmosis Desalination: Assessment and Pre-treatment of Fouling and Scaling, London: IWA Publishing. 2021. doi: 10.2166/9781780409863

[3]. MARPOL. International Maritime Organization. URL: <https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/ConferencesMeetings/pages/Marpol.aspx>

[4]. Instruction Manual for Freshwater Generator. Type J WP-26-C80A 00. Salinometer. The ... Freshwater Generator JWP-26-C80(B). Doc. No. 9.2.2.3.1.

[5]. Atlantic SW Dissalator Atlantic SW. <https://pdf.nauticexpo.com/pdf/selmar/atlantic-sw/22061-32358.html>

[6]. Heinz Ludwig. Reverse Osmosis Seawater Desalination Volume 1. Planning, Process Design and Engineering – A Manual for Study and Practice. Baden-Württemberg, Germany. ISBN 978-3-030-81930-9. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-81931-6>

Відомості про авторів

Дмитро Погорлецький, к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-1256-8053](https://orcid.org/0000-0002-1256-8053).



Ігор Грицук, д.т.н., професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-7065-6820](https://orcid.org/0000-0001-7065-6820).



Ігор Худяков, к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-8900-7879](https://orcid.org/0000-0002-8900-7879).



ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ СУДНОВИХ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ

Залож В.І.[✉], Тарасенко Т.В.

Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», Україна

Анотація

Ключові слова: судновий дизельний двигун, параметрична діагностика, моніторинг робочого процесу, системи моніторингу реального часу, портативні пристрої.

У світлі зростаючих вимог до ефективності, екологічності, надійності та безпеки суднових дизельних двигунів, велика увага приділяється впровадженню передових технологій моніторингу, зокрема систем, які працюють у режимі реального часу. Ці системи забезпечують оперативне виявлення змін у робочих параметрах дизельних двигунів, що дозволяє механікам швидко виявляти та реагувати на потенційні несправності. Завдяки високій точності та актуальності отриманої інформації, системи реального часу сприяють ефективному моніторингу та управлінню станом двигуна під час експлуатації. Робота розглядає сучасні виклики та розвиток систем моніторингу для дизельних двигунів внутрішнього згорання в морській індустрії. Незважаючи на широке застосування стаціонарних систем моніторингу реального часу, нагальною залишається потреба у створенні мобільних систем, здатних оперативно функціонувати.

Вступ

Ефективний моніторинг та параметрична діагностика робочого процесу виступають основою для забезпечення надійності і довговічності обладнання. Вибір оптимального навантажувального режиму експлуатації та діагностика двигуна здійснюються на основі аналізу індикаторних діаграм тиску газів у робочих циліндрах. Це дозволяє точно визначити параметри робочого процесу та виявити будь-які аномалії, що можуть призвести до неполадок. Одним з ключових етапів моніторингу є розрахунок індикаторної потужності, яка визначає навантажувальний режим та служить основою для оцінки енергоефективності. Цей розрахунок також ґрунтується на аналізі індикаторних діаграм, що дозволяє здійснювати точні виміри та контрольовану оцінку роботи дизельного двигуна в реальному часі. Такий підхід сприяє оптимізації робочого процесу, зменшенню ризиків поломок та підвищенню загальної продуктивності морського транспорту. В результаті ефективного управління технічним станом суднових дизелів досягається баланс між ефективністю та надійністю їхньої експлуатації.

Актуальність досліджень

Розвиток систем моніторингу дизельних двигунів тісно пов'язаний з загальними тенденціями у галузі Інтернету речей (IoT) та великих даних (Big Data). Використання сучасних датчиків,

мікропроцесорів та алгоритмів обробки даних дозволяє отримувати величезні обсяги інформації про роботу двигуна в реальному часі та здійснювати її глибокий аналіз. Це, в свою чергу, сприяє підвищенню ефективності використання палива, зниженню шкідливих викидів у навколишнє середовище та продовженню терміну служби суднових двигунів.

Викладення основного матеріалу

На сучасному етапі розвитку морського транспорту з'являється все більше систем моніторингу дизельних двигунів, які можна класифікувати на стаціонарні та портативні (переносні) системи. Стаціонарні системи моніторингу представляють собою єдиний програмно-апаратний комплекс. Вони працюють у режимі реального часу, забезпечуючи запис параметрів роботи двигунів та їх аналіз. Така швидка реакція на зміни дозволяє операторам негайно виявляти потенційні несправності та вживати відповідних заходів, знижуючи ризик аварійних ситуацій.

Стаціонарні системи моніторингу, хоч і ефективні, мають ряд обмежень. Вони потребують встановлення довгих кабельних ліній, що може знижувати загальну надійність системи через потенційні поломки додаткового обладнання. Крім того, висока вартість цих систем обумовлена необхідністю використання не тільки датчиків і первинних перетворювачів, але й усього

проміжного обладнання. Важливим аспектом у розвитку стаціонарних систем моніторингу є їх спеціалізація на конкретних марках дизельних двигунів. Більшість виробників дизельних

двигунів фокусуються на моніторингу параметрів лише своїх власних моделей, тому універсальні системи, які б підходили для двигунів різних виробників, наразі на стадії розвитку.

Таблиця 1. Класифікація існуючих систем моніторингу суднових дизельних двигунів

Системи моніторингу суднових дизельних двигунів			
Стаціонарні		Портативні	
Реального часу (онлайн)	Відкладеного моніторингу (офлайн)	Реального часу (онлайн)	Відкладеного моніторингу (офлайн)
MAN B&W PMI (Autotuning, Adaptive Cylinder Control)	MAN B&W PMI Offline	CMT Premet® X	IMES EPM-XP plus-vibro
			CMT Premet® M
DEPAS D4.0H			
Icon Research DK-200 (Doctor Analysis)	Autronica A/S NK-5, NK-100, NK-200		Icon Research DK-20
Kistler CLCC (Closed-Loop Combustion Control)			MAN PMI VIT
PREMET Online			Maridis MarPrime Ultra
ABB Cylmate			Lemag ECI, Premet XL, C
			Kistler Offline Type 2516B12
			Leutert DPI 50
			DocPad 1/2 e-600 e-line
			Кума KDA
			ABB Cyldet
			Digitec Diesel Tune III
			Dimar-Tec PTE
			Tx Marine PMI mkII
		Unitest 205	
		Drew marine DPA-EZ	

З іншого боку, портативні системи моніторингу, що характеризуються своєю мобільністю, пропонують більш гнучкі можливості для збору та аналізу даних. Вони використовуються для відкладеного моніторингу, коли дані збираються в реальному часі, а аналіз проводиться пізніше. Це дозволяє проводити більш глибокий аналіз та робити виведення зі збірки даних, зібраної протягом певного періоду. На сьогоднішній день портативних систем, які б працювали в режимі реального часу та надавали б негайні рекомендації під час індикації, не так і багато. Проте, цей напрямок вважається дуже перспективним, особливо з урахуванням швидкого розвитку технологій штучного інтелекту, цифрових двійників та потужних методів математичного моделювання [1].

Портативні (переносні) системи моніторингу представляють собою компактні та легкі пристрої, спроектовані для вимірювання, збору даних і контролю параметрів в режимі відкладеного моніторингу. Відкладений моніторинг означає систему збору та аналізу даних, яка здійснюється з затримкою в часі. Тобто, інформація збирається в реальному часі, але аналіз та висновки можуть бути проведені пізніше.

Системи моніторингу реального часу надають негайну реакцію на будь-які зміни в параметрах роботи суднового дизельного двигуна, дозволяючи механікам швидко виявляти можливі проблеми. Дані, отримані у реальному часі, відзначаються високою точністю і актуальністю, що сприяє ефективному контролю та управлінню станом двигуна в реальних умовах експлуатації. Вахтові механіки можуть миттєво взаємодіяти з системами моніторингу, вносячи корективи у роботу двигуна чи вживаючи невідкладних заходів у випадку виявлення проблем.

У стаціонарних системах моніторингу, які є невід'ємною частиною сучасних суднових дизельних двигунів, датчики тиску газів встановлюються на всіх циліндрах. Це забезпечує повноцінний і неперервний контроль за станом кожного циліндра двигуна. Завод-виробник за замовчуванням інтегрує ці датчики в двигуни, що гарантує високу точність вимірювань та оптимізацію роботи системи. Стаціонарні системи моніторингу забезпечують постійний збір даних, що є ключовим для точного моніторингу та аналізу робочих характеристик двигуна. Застосування таких датчиків дозволяє отримувати детальну інформацію про внутрішні процеси в двигуні, включаючи робочі параметри та положення

поршня. Ця інформація є невід'ємною частиною для здійснення точної діагностики стану двигуна, а також для планування профілактичного обслуговування та ремонту.

У контрасті зі стаціонарними системами, портативні системи моніторингу зазвичай комплектуються одним датчиком тиску, який може бути почергово встановлений на індикаторний кран відповідного циліндра за допомогою *Thomson adapter*. В залежності від типу, система додатково може бути обладнана магнітним вібродатчиком, система *IMES EPM-XP plus-vibro*, *DEPAS D4.0H*, *CMT Premet® X* для контролю роботи паливної апаратури високого тиску, впускних/випускних клапанів та дає цінну інформацію про технічний стан основних вузлів, таймінгу паливоподачі та таймінгу газорозподілу двигунів [2, 3, 11].

Висновки

На сьогодні актуальним напрямком у моніторингових системах є здійснення моніторингу дизельних двигунів внутрішнього згоряння в режимі реального часу. Хоча стаціонарні онлайн системи моніторингу вже активно використовуються, існує очевидна потреба в розробці портативних систем, спроможних працювати в режимі реального часу. Відсутність таких систем вказує на значну перспективу для подальших досліджень у цій сфері. Розвиток таких систем стане важливим напрямком удосконалення моніторингових технологій, зокрема з використанням досягнень штучного інтелекту та інших сучасних методів обробки даних.

Література

[1]. D. Minchev, R. Varbanets, O. Shumylo, V. Zallozh, N. Aleksandrovska, P. Bratchenko, Thanh Hai Truong. Digital twin test-bench performance for marine diesel engine applications. Polish Maritime Research. 2023. Vol. 30 no. 4 (120). pp. 81-91. DOI: <https://www.doi.org/10.2478/pomr-2023-0061>.

[2]. IMES cylinder pressure sensors: веб-сайт. URL: <https://www.imes.de> (дата звернення: 16.01.2024).

[3]. DEPAS Laboratory: веб-сайт. URL: <http://depas.od.ua/> (дата звернення: 11.01.2024).

[4]. Digital Pressure Indicator DPI Leutert DPI-Type 50: веб-сайт. URL: <https://www.leutert.com/> (дата звернення: 09.01.2024).

[5]. MAN Energy Solutions PMI: веб-сайт. URL: <https://www.man-es.com/> (дата звернення: 20.01.2024).

[6]. Pressure and TDC sensors from Kistler: веб-сайт. URL: <https://www.kistler.com> (дата звернення: 04.11.2023).

[7]. MARIDIS Maritime Diagnosis & Service: веб-сайт. URL: <https://www.maridis.de/> (дата звернення: 24.01.2024).

[8]. Lemag ECI Electronic Cylinder Pressure Indicator: веб-сайт. URL: <https://chris-marine.com/products/monitoring-of-diesel-and-gas-engines/electronic-cylinder-pressure-indicator-eci/> (дата звернення: 24.01.2024).

[9]. Dimar-Tec PTE Electronic Cylinder Pressure Indicator: веб-сайт. URL: <http://dimar-tec.com/> (дата звернення: 20.01.2024).

[10]. Kyma Diesel Analyzer: веб-сайт. URL: www.kyma.no (дата звернення: 10.01.2024).

[11]. CM Technologies Monitoring Innovations: веб-сайт. URL: <https://www.cmtechnologies.de/> (дата звернення: 20.01.2024).

Відомості про авторів

Віталій Залож, к.т.н., доцент, доцент кафедри інженерних дисциплін, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», Ізмаїл, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-5213-6896](https://orcid.org/0000-0002-5213-6896).



Тетяна Тарасенко, к.т.н., доцент, завідувачка кафедри інженерних дисциплін, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», Ізмаїл, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-8107-3524](https://orcid.org/0000-0001-8107-3524).



ЗАСТОСУВАННЯ ДРОСЕЛЬНО-ЗВОЛОЖУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ В СИСТЕМАХ ГЛИБОКОЇ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ МАЛООБЕРТОВИХ ДВИГУНІВ

Шостак В.П., Личко Б.М. ✉

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

Анотація

Ключові слова: утилізація вторинної теплоти, малообертотий двигун, перегріта пара, дросель, конденсатор.

Розглядається пристрій, який забезпечує зниження тиску і температури перегрітої пари, що дозволяє її скидати в конденсатор при раптовій непередбаченій зупинці утилізаційної турбіни.

Вступ

На рубежі ХХ-ХХІ століть спостерігається «друге дихання» [2] глибокої утилізації вторинної теплоти малообертотого двигуна (МОД) з перспективою застосування утилізаційного гребного турбозубчастого агрегата (УГТЗА) [1], який додає понад 10 % енергії на гребний гвинт без додаткової витрати палива. У зв'язку з цим виникає чимало питань щодо розгалуженої системи «пара–конденсат». Зокрема, поза увагою залишаються режими непередбачуваної зупинки утилізаційної парової турбіни і, поряд з цим, інерційною генерацією пари в утилізаційному котлі. У даній роботі розглядається пристрій, що дозволяє знизити температуру і тиск перегрітої водяної пари та направити її у конденсатор.

Актуальність досліджень

Економія палива і, як наслідок, зниження викидів токсичних оксидів з відхідними газами МОД завжди є нагальним питанням проектування, побудови й експлуатації енергетичних установок сучасних транспортних суден. Перспективним являється впровадження на суднах ближньої побудови УГТЗА, які обумовлюють відносно складну систему «пара–конденсат». Вона повинна у своєму складі передбачувати пристрої, що дозволяють оперативно охолоджувати перегріту пару та направляти її поміж турбіни в конденсатор. Така ситуація виникає при ситуативному вимкненні УГТЗА внаслідок раптового зниження швидкості ходу судна, при його швидкому реверсуванні та інших форс-мажорних обставинах. А тому актуальною є інформація, в першу чергу для конструкторських рішень і подальшої експлуатації, по альтернативним пристроям, які б дозволяли раптове скидання водяної пари в конденсатор. Одна із таких альтернатив надається і характеризується нижче.

Викладення основного матеріалу

Як відомо, в конденсаторі паротурбінного контуру відбувається скраплення водяної пари при вакуумі і невисокій температурі, значення яких зумовлюється температурою охолоджувальної заборотної води. У зв'язку з цим до нього не можна скидати пару з надлишковим тиском. Тому при непередбачуваному раптовому вимкненні УГТЗА пара із утилізаційного котла повинна бути дросельована й охолоджена, бажано до температури не вище 50 °С. Для цього можуть бути застосовані пропоновані нами дросельно-зволожувальні пристрої.

На рисунку 1 зображено фрагмент теплової схеми з трьома такими пристроями, до яких підводиться пара з тиском 10, 2 й 1 бар і живильна вода із теплового ящика з температурою, наприклад, ~40 °С. На виході з пристроїв тиск уже охолодженої пари трохи більший від тиску в конденсаторі – на величину опору магістралі від пристроїв до конденсатора. Температура вихідної пари залежить від кількості впорскнутої води (На цьому рисунку пара на утилізаційну турбіну перекрита).

На рисунку 2 зображені процеси й параметри розширення й охолодження водяної пари в координатах «ентальпія–ентропія». При нормальній роботі, коли працює УГТЗА, до його п'ятиступеневої турбіни поступає перегріта пара і, як видно з рисунку, є два проміжних підводи.

При раптовій зупинці УГТЗА пара поступає до пристроїв. Складні динамічні процеси зниження тиску й охолодження пари в цих пристроях представлені тут у спрощеному вигляді, що не впливає на кінцевий результат.

Дроселювання перегрітої пари відбувається при постійній ентальпії і незначному падінні температури та суттєвим зниженням тиску – до 0,059 бара (відповідно до рисунку 2). Впорскнута вода, змінюючи свій агрегатний стан, охолоджує перегріту пару.

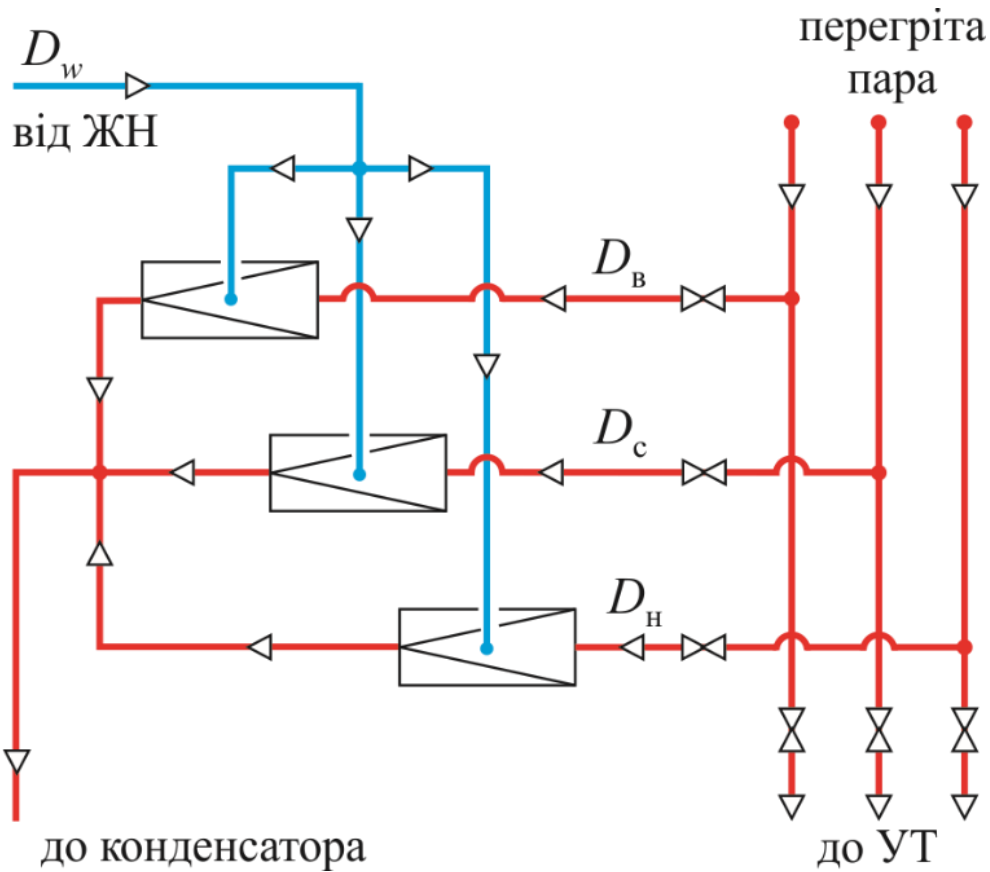


Рисунок 1. Фрагмент теплової схеми «пара-конденсат» з дросельно-зволожувальними пристроями: ЖН – живильний насос; УТ – утилізаційна турбіна; D_B , D_C , D_H – витрата пари високого, середнього і низького тисків; D_w – витрата впрорскуваної води

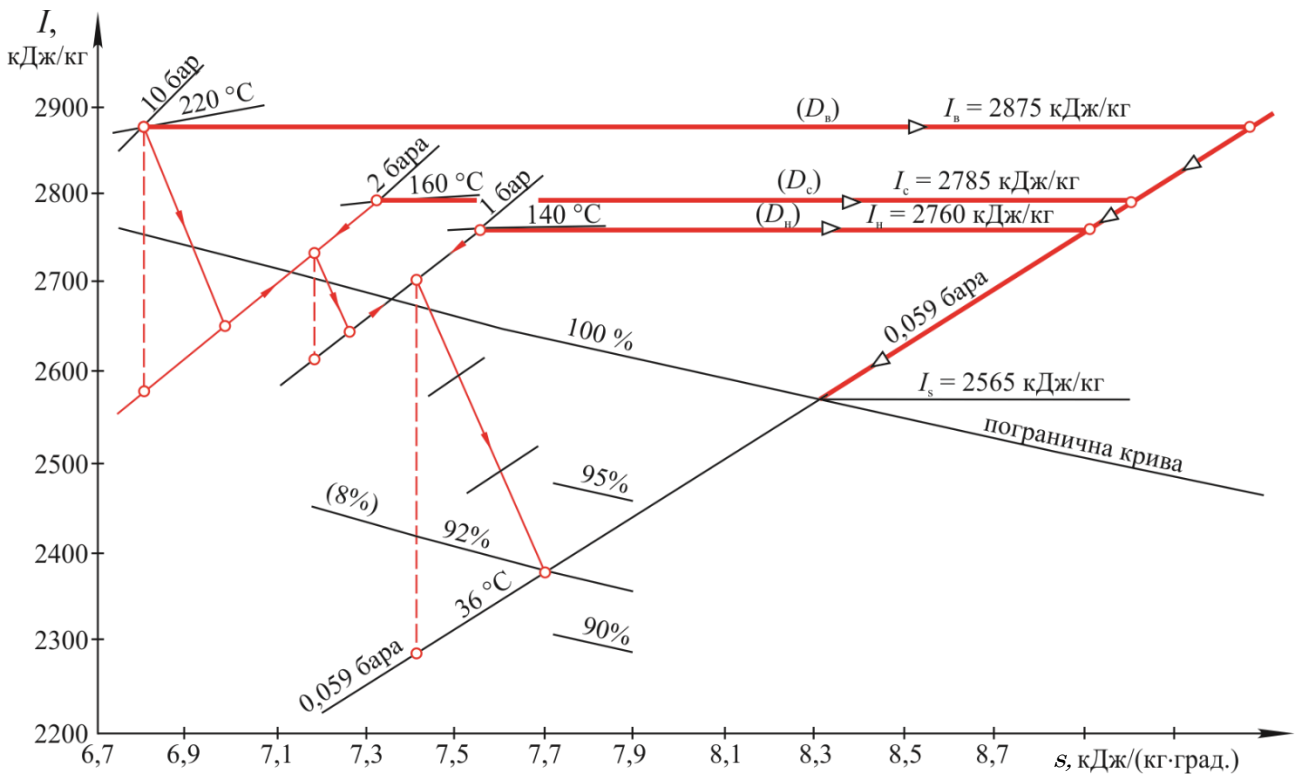


Рисунок 2. Процеси в п'ятиступеневій утилізаційній турбіні з проміжним підводом пари (ліворуч – середина) і у дросельно-зволожувальному пристрої (зверху – праворуч) у діаграмі «ентальпія – ентропія» ($I - s$)

Доречно охолоджувати пару до температури насичення. У цьому випадку загальна кількість впорскнутої води визначається як

$$D_w = \frac{D_B(I_B - I_S) + D_C(I_C - I_S) + D_H(I_H - I_S)}{I_S - i_w},$$

де i_w – ентальпія води, що забирається зі збірника конденсатів, наприклад, з температурою 40 °С; її ентальпія 168 кДж/кг.

Інші величини вказані на рисунках 1 і 2.

Визначимо величину D_w на конкретному прикладі з ГД 8G95ME-C9,5, для якого потужності (кВт): номінальна 54960, специфікаційна 52500 експлуатаційна 49875, за таких даних:

витрата пари (за умов ISO) високого, середнього і низького тисків: $D_B = 9259$ кг/год; $D_C = 9638$ кг/год; $D_H = 17592$ кг/год; сумарна $D_{\Sigma} = 6528$ кг/год.

Тоді, після підрахунків, $D_w = 3513$ кг/год.

Отже, якщо після дросельно-випарювального пристрою суміш представлятиме собою насичену пару, то кількість впорскнутої води складатиме 9,6 % від пари, що потребує охолодження (до 36 °С) і зниження тиску (до 0,059 бара). Для подачі впорскнутої води може бути використаний живильний насос.

Висновки

1. Для забезпечення безаварійної роботи конденсатора у складі утилізаційної парової установки пропонується дросельно-випарювальний пристрій, який знижуватиме температуру і тиск перегрітої пари, що скидатиметься в конденсатор при раптовому вимкненні утилізаційної парової турбіни.

2. Кількість впорскнутої води (наприклад, живильної) у вказаний вище пристрій сягатиме 10 % від кількості пари, що надходить до пристрою, з параметрами, характерними для систем

глибокої утилізації вторинної теплоти малооборотних двигунів.

Література

[1]. Шостак В.П., Манзюк А.Ю. Глибока утилізація теплоти відхідних газів і стисненого повітря сучасного малооборотного двигуна. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. 2016. № 3. С. 21-25. DOI [10.15589/jnn20160305](https://doi.org/10.15589/jnn20160305)

[2]. Шостак В.П., Личко Б.М. Друге дихання утилізації вторинної теплоти малооборотних дизелів. *Матеріали 14-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» (СЕУТТОО-2023)*. Херсон, 2023. С. 119-123.

Відомості про авторів

Володимир Шостак, к.т.н., професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та теплоенергетики, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-8071-389X](https://orcid.org/0000-0002-8071-389X).



Богдан Личко, к.т.н., доцент, в.о. завідувача кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та теплоенергетики, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна, [ORCID ID: 0000-0003-3943-9689](https://orcid.org/0000-0003-3943-9689).



ADVANCED MARINE DIESEL ENGINES DIAGNOSTICS FOR IMO DE-CARBONIZATION COMPLIANCE

Roman Varbanets^{1✉}, Dmytro Minchev^{1✉}, Iryna Savelieva^{1✉}, Andriy Rodionov^{2✉}, Tatiana Mazur^{1✉}, Sviatoslav Psariuk^{1✉}

¹ Odessa National Maritime University, Ukraine

² DTSCHART Ltd., Poland

Abstract

Key words: diagnostics, de-carbonization, marine diesel engines.

This paper discusses hardware-based methods for monitoring the operational parameters of marine diesel engines and online mathematical modeling techniques (digital twins) for calculating the emissions of CO₂, NO_x, soot, and other harmful pollutants. It is demonstrated that measuring and analyzing the engine's vibrational diagrams in parallel with gas pressure diagrams in the cylinders allows the evaluation of the actual fuel injection and gas distribution timings. The obtained data is used to refine the mathematical model of the engine's working process, which determines the engine's indicator parameters and power, as well as the emission of harmful substances that need to be monitored in compliance with current IMO requirements. The authors have accumulated experience in using the discussed hardware-based methods for diagnosing marine engines during operation. The discussed hardware and software methods are used in the educational process at the engineering faculty of the marine university, as they provide a detailed analysis of the main components of the engine's working process: the combustion process in the cylinder, the fuel injection process, and the gas distribution process.

Introduction

The International Maritime Organization (IMO) has adopted a series of measures and strategies aimed at reducing greenhouse gas emissions and decarbonizing the maritime industry. The essence of the latest IMO requirements for decarbonizing marine engines is to reduce emissions of carbon dioxide (CO₂) and other greenhouse gases.

In April 2018, the IMO adopted an initial strategy [1] to reduce greenhouse gas emissions from ships, which includes the following main objectives:

- reducing the amount of CO₂ emissions by at least 40% by 2030 and striving for 70% by 2050 compared to 2008 levels;
- reducing the total volume of greenhouse gas emissions from international shipping by at least 50% by 2050 compared to 2008 levels;
- aiming full decarbonization of maritime transport in this century [2].

To achieve these goals, the IMO proposes the use of various technological and operational measures, such as improving the energy efficiency of engines,

using alternative energy sources such as liquefied natural gas (LNG) or hydrogen, and encouraging innovation in new technologies that enhance the efficiency of marine engines [1, 2].

Performance analysis and diagnostics of marine engines are essential for improving operational efficiency and decarbonization of marine engines. During performance analysis, key parameters such as MIP, IPower, Pmax, Pcomp, etc., are determined, analyzed, compared with sea trial data, and adjusted according to the chosen operational strategy.

Various diagnostic systems from different manufacturers are used for conducting performance analysis, such as Premet® XL by LEHMANN & MICHELS GmbH, Doctor Analysis by Icon Research Ltd., EPM-XPplus by IMES GmbH, Mar-Prime by Maridis GmbH, and D4.0H by Depas Lab. (ONMU) [3]. However, it should be noted that even the most advanced systems only determine a small portion of the parameters required for accurate and quality diagnosis of the critical components of the engine.

To expand the volume of analyzed information, a digital twin of the engine, such as Blitz-PRO [4], can be used. The digital twin is an advanced online model that is precisely tuned to the engine using data obtained from diagnostic systems. The digital twin allows for analyzing a wide range of parameters, thus enabling qualitative and reliable diagnosis of the technical condition of the engine components and monitoring emissions in accordance with the current requirements of the International Maritime Organization (IMO) [1, 2].

Presentation of the main material

The safe operation of a vessel and its compliance with the latest International Maritime Organization (IMO) standards for decarbonization depend on the continuous and reliable operation of main and auxiliary engines. Such conditions can be ensured through periodic performance analysis and diagnostics of the engine's key components responsible for the quality of the working process. Performance analysis allows for optimizing the operation of cylinders, evenly distributing the load between them, and timely identifying dangerous trends in the engine's technical condition. Parameter analysis also helps reduce the overall vibration levels of the engines, achieve fuel consumption close to the rated values, and improve the overall energy efficiency of the vessel in accordance with IMO requirements.

Some defects can be identified through the analysis of indicator diagrams P(°CA) and the main parameters of the working process calculated from them, such as P_{max} , P_{comp} , MIP, ignition angles, and fuel ignition delay periods. Examples of such defects can include deviations in MIP, Pmax, or end compression pressure, as well as increased ignition delay periods, and others.

The analysis of one of the most typical defects in cylinder operation – reduction in end compression pressure (P_{comp}) – is associated with ambiguities. The reduction in P_{comp} can be caused by several diverse reasons, such as wear of cylinder liners, wear, breakage, and/or sticking of piston rings, valve leakage, or malfunctioning valves timing. All these causes will result in the same consequence – a decrease in the parameter P_{comp} , followed by Pmax and MIP [3]. Thus, the true cause of the defect may remain uncertain.

Similarly, to the defect of decreased P_{comp} , some other defects that manifest on the P(°CA) diagrams can be caused by various reasons. A typical example is malfunctions in the high-pressure fuel equipment operation. These defects often occur during continuous engine operation. For example, late combustion process, which is determined by the

phases of fuel ignition points on the P(°CA) diagram, can be a result of late fuel injection and/or wear of precision components in the high-pressure fuel equipment, leading to a decrease in fuel pressure before the injectors at the moment of injection. Therefore, determining operational defects based solely on the analysis of P(°CA) diagrams may not be accurate.

Measurements and analysis of diagrams in the high-pressure fuel system before the injectors could provide comprehensive diagnostic information. However, such measurements do not comply with the strategy of non-destructive testing and cannot be carried out on marine engines in operational conditions due to the risk of fuel leaks when installing high-pressure sensors. Such measurements using non-standard devices are prohibited by most marine certification societies [5, 6].

An alternative to direct measurements is the use of vibration sensors on a magnetic platform. Such sensors can be quickly installed in a chosen location, reducing the overall measurement time and allowing for quasi-stationary engine operation conditions. Vibration diagrams and P(°CA) diagrams should be recorded in parallel and analyzed together. The proposed method is suitable for analyzing defects in the high-pressure fuel equipment and the gas distribution mechanism. The use of magnetic vibration sensors fully complies with the modern strategy of non-destructive testing of marine engines.

The P(°CA) diagrams and vibration diagrams, initially recorded as functions of time, are transformed into functions of crankshaft angle using an analytical algorithm for determining TDC: $P(t, ms) \rightarrow P(°CA)$ [3,7].

The D4.0HT diagnostic system

The D4.0HT diagnostic system is a portable system for diagnosing two-stroke and four-stroke engines. The system is designed in ONMU to determine the parameters of marine and stationary diesel and gas engines running on heavy fuel without any restrictions.

The D4.0HT system has the following features [3]:

- a vibroacoustic sensor works in parallel with the gas pressure sensor in the cylinder;
- a high-precision algorithm based on a compression model is used to determine TDC (top dead center), without the need for a hardware TDC sensor.


The system is controlled by a single multifunctional button and has a durable aluminum housing. The real-time module of the D4.0HT system is designed for direct recording of working process

data and preliminary calculation of 3 key parameters:

- P_z (P_{max}) – the maximum combustion pressure in the cylinder (average, minimum, and maximum values over several working cycles).

- RPM – the rotational frequency of the diesel engine's crankshaft.
- P_t – the average pressure in the cylinder during the working cycle.

Table 1. Specifications of D4.0HT diagnostic system

	<p>Pressure sensor PS-20m Measuring range: 0-250 bar; Capacitive type, non-cooled Permissible surface temperature: up to 350°C Max. error: <= 1.5% Weight: 0.5 kg Installed on a standard indicator cock, W27x1/10.</p>
	<p>Vibration sensor VS-20 Frequency range: 0.1 to 18 kHz Filter passband: 1.0 kHz Max. Operating temperature: 90°C Sensor has a magnetic base.</p>
	<p>Real-time module D4.0HT Based on RCM2000 processor, 25 MHz; ADC: 125 kHz, 12-bit; Automatic determination of engine cycle; Contrast display; One-button control; USB / RS-232 interface; Approximately 12 hours of autonomous operation; 130 x 80 x 40 mm; 0.5 kg 6VDC (4 x A1)</p>

The engine cycle is automatically determined or can be manually set. Automatic engine cycle detection allows for monitoring without prior setup for engine type (engine data can be entered after measurements during the full calculation of parameters). In many cases, this option is useful and saves time in indicating measurements when used in marine conditions.

The indication data from individual cylinders is transmitted from the D4.0HT module to a computer via a serial USB/RS-232 interface, Table 1.

The software provides calculation of following parameters:

- mean indicated pressure $P_i \backslash \backslash \backslash MIP$;
- cylinder gross indicated power $N_i \backslash \backslash Pi$;
- crankshaft speed RPM ;
- maximum combustion pressure $p_{max}, p_{max}^{min}, p_{max, \phi}^{max}$;
- maximum compression pressure p_{comp} ;

- pressure at the specific points of indicated diagram (36° after TDC) P_{exp} ;
- maximum pressure increases rate $(dp/d\phi)_{max}$;
- pressure increase ratio $\lambda = \frac{p_{max}}{p_{comp}}$;
- firing pressure $p_c'(\phi P_c')$;
- actual and geometrical fuel injection timing $\alpha, \alpha^G, \phi_{INJ}, \phi_{INJ}^G$;
- ignition delay $\tau_D, \phi \tau_D$;
- gas distribution valves and ports timing $\phi_{in}^{op}, \phi_{in}^{cls}, \phi_{exh}^{cls}, \phi_{exh}^{op}$;
- valve train mechanism and fuel injection equipment technical state estimation;
- pressure at any point of diagram p_x ;
- numerical filtration and FFT spectral analysis.

Unlike the MarPrime system by Maridis GmbH, the D4.0HT system uses a vibroacoustic sensor with a different frequency range, which allows for high-precision determination of the needle valve displacement in fuel injectors, gas distribution valves, and plunger in the plunger pair of the fuel injection pump. Fuel injection phases are determined with high precision based on the moments of needle valve lift and seating. Gas distribution phases are determined based on the moments of valve seating. The sensor allows for determination of the moments of plunger window closing and fuel cutoff. As a result, the vibroacoustic sensor enables determination of fuel injection and gas distribution phases, as well as diagnosis of the technical condition of corresponded units. In recent versions, options for gas turbine compressor vibrodiagnostics and electronic lubrication system for cylinder oil injectors have been added to the system [5, 8].

In the D4.0HT system, the automatic determination of TDC (Top Dead Center) is carried out using a proprietary algorithm based on solving the equation $P'=0$ during the compression stroke prior to the start of combustion. Data preprocessing is performed using a digital filter [5-8]. This automatic TDC determination allows for a maximum error of no more than 0.1°CA in TDC determination, and the final calculation of indicated cylinder power is performed with error of no more than 2.5%.

In the Premet® XL system by LEHMANN & MICHELS GmbH, automatic determination of TDC is also provided. However, in the Doctor Analysis system by Icon Research Ltd, automatic TDC determination is not available. Instead, the system offers a procedure for manual TDC correction, or the option to have this procedure performed by Icon Research specialists.

However, it is also possible to perform TDC correction independently using pressure diagram analysis, with a correction step and accuracy of TDC setting of 0.1°CA .

TDC detection from the $P'=0$ equation

The proposed approach relies on the principle that when there is no combustion occurring within the cylinder, the rate of change of pressure at the top dead center (TDC) piston position is equal to zero, with the exception of the TDC thermal loss angle, which corresponds to the dissipation of heat to the cylinder walls.

$$P'_{\phi-\delta\phi_T} = P'_\Theta = 0.$$

Taking into account the angle of TDC thermal loss at the apex of the piston, we obtain:

$$\Theta = \phi - \delta\phi_T.$$

Subsequently, the rate of pressure change within the compression region can be expressed in the following manner:

$$\frac{dP_{comp}}{d\Theta} = -P_\alpha V_\alpha^{n_1} n_1 \frac{1}{V_\Theta^{n_1+1}} \cdot \frac{dV_\Theta}{d\Theta},$$

where P_α – pressure at the start of compression;

$V_\Theta = V_{\phi-\delta\phi_T}$ – cylinder volume, where:

$$V_\phi = V_C + 0,5V_S \left[1 + \frac{1}{\lambda_{III}} - \cos \phi - \frac{1}{\lambda_{III}} \sqrt{1 - (\lambda_{III} \sin \phi)^2} \right];$$

V_C – compression chamber volume;

$V_S = V_C(\varepsilon - 1)$ – the volume described by the piston;

ε – compression ratio in cylinder;

$\lambda_{III} = R_{KP} / L_{III} = S / 2L_{III}$ – The ratio between the crank radius and the length of the connecting rod.

Solving the above equations, the TDC coordinate is calculated (Figure 1).

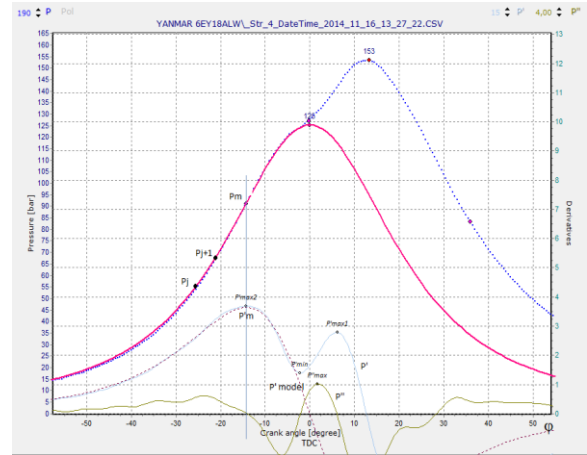


Figure 1. TDC determination task

Data filtration

Despite the excellent quality of IMES pressure sensors, characterized by low relative error ($6 < 1\%$) and minimal noise levels, the subsequent numerical differentiation of the obtained indicator diagrams poses significant challenges in conducting accurate numeric analysis of the $dP/d\phi$ curves. As a result, determining the coordinates of the maximum $dP/d\phi$ values prior to combustion becomes highly uncertain, as depicted in Figure 2. Consequently, it becomes evident that the implementation of an appropriate data filtering procedure is imperative.

Our preference lies in utilizing the Butterworth digital low-pass filter [3] due to its frequency characteristics, which closely resemble those of an ideal integrator and exhibit a monotonic response within

the passband. The frequency characteristics of a j -th order Butterworth digital low-pass filter are as follows:

$$G(f) = \frac{G_0}{\sqrt{1 + (f / f_c)^{2j}}},$$

where G_0 – the gain coefficient;
 f_c – the cutoff frequency (at which the amplitude is 3dB;

j – the filter order.

Figure 2 illustrates the $P(\varphi)$ and $P'(\varphi)$ diagrams obtained prior to the application of the Butterworth low-pass filter. The presence of analog and digital noise during the recording of $P(\varphi)$ introduces significant uncertainties in determining the coordinates of the maximum $P'(\varphi)$ values. Consequently, analyzing the second derivative, $P''(\varphi)$, is infeasible in this particular scenario.

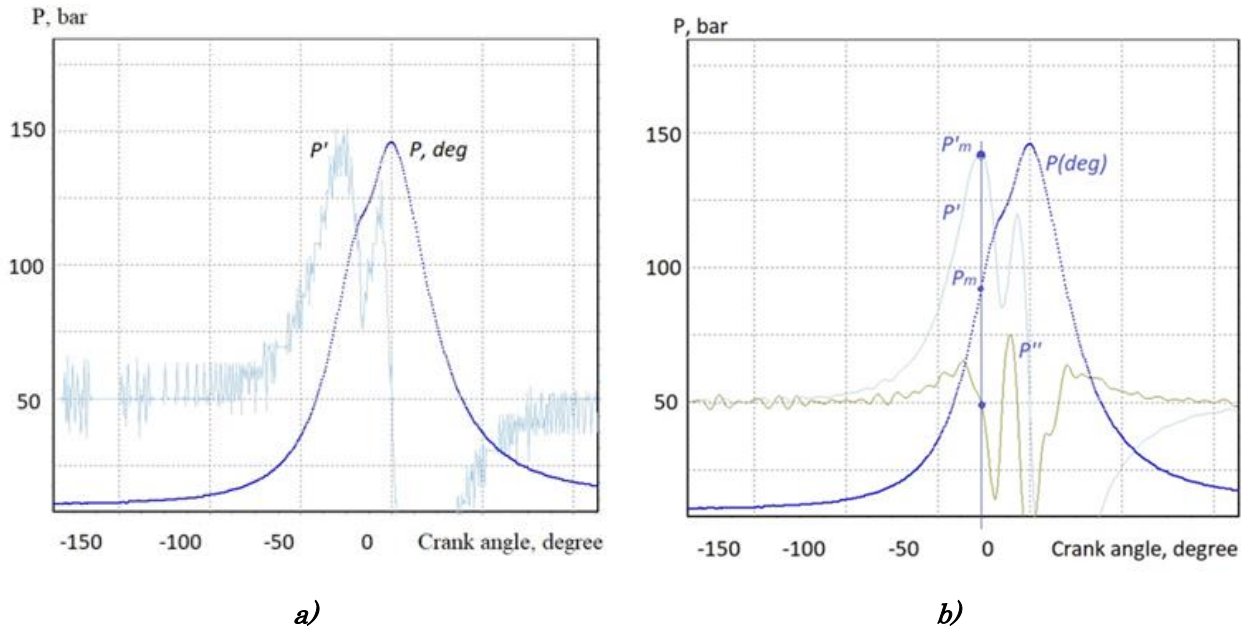


Figure 2. Diagrams $P(\varphi)$, $P'(\varphi)$, $P''(\varphi)$ before (a) and after (b) applying the Butterworth low pass filter

The implementation of the Butterworth low-pass filter enables the numerical analysis of the first derivative, $P'(\varphi)$, and the second derivative, $P''(\varphi)$, as depicted in Figure 2. Moreover, it facilitates the determination of the coordinate representing the maximum compression stroke speed within the working cylinder, denoted as point $P'm$.

During the recording of indicator diagrams utilizing IMES pressure sensors, characterized by a relative error of less than 1% and a sampling step of $\Delta \leq 0.5$ °CA, the choice of a filter order, $j = 5 \div 7$, proves to be effective in suppressing high-frequency noise on the $P'(\varphi)$ and $P''(\varphi)$ curves. This filtering approach not only ensures adequate noise suppression but also allows for subsequent analysis to identify local extrema. These extrema serve as synchronization points for the indicator diagrams, facilitating their transformation from time-based functions into crank angle degree functions.

Figure 3 illustrates an example of diagnosing a single cylinder of a two-stroke MAN engine using the D4.0HT system.

The diagram $P(\varphi)$ (Figure 3.a) is analyzed in parallel with the vibro-diagrams of the fuel injectors $Vinj(\varphi)$, Figure 3.b, and the high-pressure fuel pumps $Vhpfp(\varphi)$, Figure 3.c. The vibro-diagrams were obtained using the Vibration sensor VS-20, see Table 1.

The injector vibro-diagram (Figure 3.b) also includes the closing pulse of the exhaust valve, which is a convenient feature of the D4.0HT system in practice, as it allows not only the actual fuel injection phases to be controlled but also the gas distribution phases using a single measurement point – the injector end face.

By analyzing the phases and shapes of the pulses in figure 3.b,3.c, it is possible to evaluate the technical condition of the injectors, high-pressure fuel pumps, and exhaust valve control system. The obtained data is used to adjust the Blitz-PRO online service.

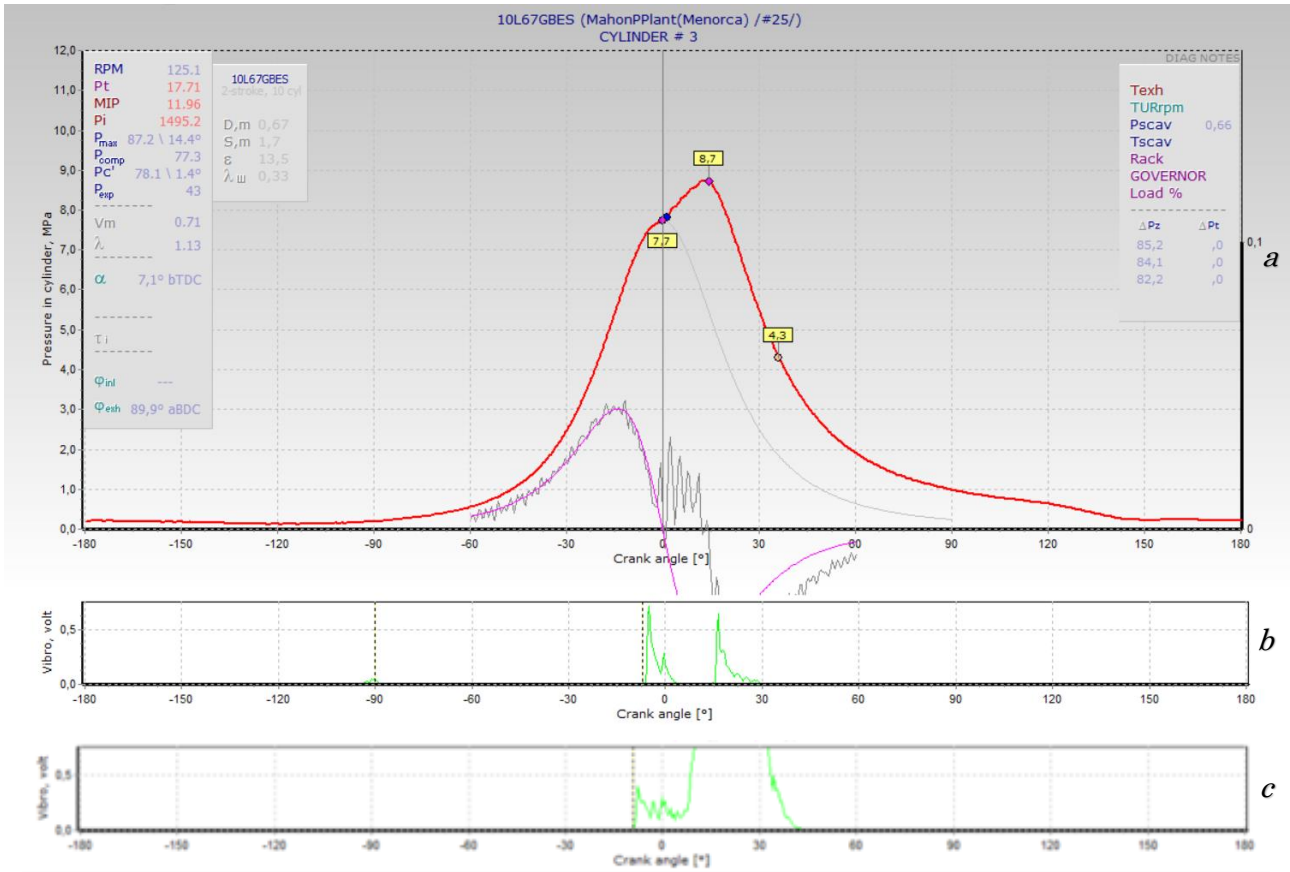


Figure 3. Diagnosis of one cylinder of a two-stroke MAN engine using the D4.0HT system

Application of Digital Twins for advanced diagnostics and engine behavior prediction

The Digital Twin of the Internal Combustion Engine is a numerical representation of a real engine that models various processes and parameters of engine behavior, depending on its type. These processes may include the operating processes in the engine cylinders, intake and exhaust manifold, engine wear due to friction and mechanical loading in engine parts, as well as vibrations and noise emissions. The application of Digital Twin technology for Internal Combustion Engine diagnostics has shown promising results, providing additional information on engine technical conditions. Furthermore, it can be used for simulating engine parameters for different engine operation programs, including the prediction of toxic and greenhouse gas emissions during engine operation.

In our study, we utilize the Blitz-PRO online service, which facilitates the creation and utilization of Digital Twins for Internal Combustion Engines [4]. This approach has been successfully applied in addressing diagnostics issues in marine diesel engines [5, 6, 8, 9].

For diesel engine the main component of greenhouse gases is CO₂, and its amount in exhaust gases obviously depends on the fuel consumption:

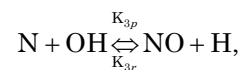
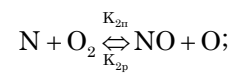
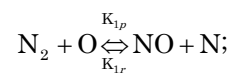
$$g_{CO_2} = g_c b_b \cdot \frac{g}{kW \cdot h},$$

where g_c – carbon mass fraction in engine fuel,
 b_b – brake specific fuel oil consumption.

Blitz-PRO also helps to estimate the following components of marine diesel engines exhaust gases toxic emissions: CO, soot, SO_x and NO_x.

The two-zone combustion model is used to predict separately the gas composition in the fresh charge and burned gases zones. Professor Zvonov’s method for 18-components burned gases mixture is applied. The following constituents are considered: O, O₂, O₃, H, H₂, OH, H₂O, C, CO, CO₂, CH₄, N, N₂, NO, NO₂, NH₃, HNO₃, HCN.

The NO_x concentration is calculated for “thermal” nitric oxides (NO), according to Zeldovich. Three equations are:



where $K_{1p}, K_{1r}, K_{2p}, K_{2r}, K_{3p}, K_{3r}$ – chemical reactions constants.

The kinetics of NO development is calculated as following:

$$\frac{d[NO]}{d\tau} = \frac{2K_{1p}[N_2][O]}{1 + \frac{K_{1r}[NO]}{K_{2p}[O_2]}} \left(1 - \frac{[NO]^2}{K_4[O_2][N_2]} \right);$$

$$K_4 = \frac{K_{1p}K_{2p}}{K_{1r}K_{2r}}.$$

For high-speed engines the final concentration of CO in exhaust gases is estimated as equivalent concentration at the combustion finish point. For medium-speed and low-speed diesel engines the following kinetic equation is used:

$$\frac{d[CO]}{d\tau} = -K_{1c}[CO][OH],$$

where $K_{1c} = 7.1 \cdot 10^{12} \cdot \exp(-32200RT)$ – reaction constant;
[CO], [OH] – CO and OH concentrations correspondently.

The volumetric rate of soot concentration is given by the Razleitsev mechanism:

$$\frac{d[C]}{d\tau} = \left(\frac{d[C]}{d\tau} \right)_{kin} + \left(\frac{d[C]}{d\tau} \right)_{pol} + \left(\frac{d[C]}{d\tau} \right)_{burn} + \left(\frac{d[C]}{d\tau} \right)_{vol},$$

where $\left(\frac{d[C]}{d\tau} \right)_{kin}$ – kinetic soot formation rate (in the flame),
 $\left(\frac{d[C]}{d\tau} \right)_{pol}$ – core polymerization of fuel droplets rate,
 $\left(\frac{d[C]}{d\tau} \right)_{burn}$ – burning of the soot particles rate,
 $\left(\frac{d[C]}{d\tau} \right)_{vol}$ – change in soot concentration rate due to cylinder volume change.

$$\left(\frac{d[C]}{d\tau} \right)_{kin} = B_{1soot} \frac{q_{fuel}}{V} \frac{dx}{dt};$$

$$\left(\frac{d[C]}{d\tau} \right)_{pol} = B_{2soot} \delta_d \frac{q_{fuel}}{V} \times$$

$$1 - \exp \left(- \left(\frac{\sqrt{K_{ev}} (\tau - \tau_{inj.start})}{d_{32}^{inst}} \right)^{n_{disp}} \right);$$

$$\times \frac{1}{\tau_{inj}};$$

(fuel injection period);

$$\left(\frac{d[C]}{d\tau} \right)_{pol} = B_{2soot}^n \delta_d (1 - x_{inj.end}) \times$$

$$\times \frac{n_{disp} q_{fuel}}{2V (\tau - \tau_{inj.end})} \left(\frac{\sqrt{K_{ev}} (\tau - \tau_{inj.start})}{d_{32}^{inst}} \right)^{n_{disp}} \times$$

$$1 - \exp \left(- \left(\frac{\sqrt{K_{ev}} (\tau - \tau_{inj.start})}{d_{32}^{inst}} \right)^{n_{disp}} \right);$$

$$\times \frac{1}{\tau_{inj}};$$

(soot polymerization after injection end);

$$\left(\frac{d[C]}{d\tau} \right)_{burn} = B_{3soot} k_{O_2} \sqrt{n} \cdot p \cdot [C];$$

$$\left(\frac{d[C]}{d\tau} \right)_{vol} = B_{4soot} \frac{6n}{V} \frac{dV}{d\phi},$$

where $B_{1soot}, B_{2soot}, B_{2soot}^n, B_{3soot}, B_{4soot}$ – coefficients;
 δ_d – droplets core size,
 d_{32}^{inst} – diameter fuel droplets for given portion of fuel,
 K_{ev} – constant of evaporation,
 $\tau_{inj.start}, \tau_{inj.end}$ – injection start and stop timings,
 $x_{inj.end}$ – burned fuel fraction at the injection end,
 n_{disp} – coefficient of droplets distribution,
[C] – volumetric concentration of the soot.

As an example, the Blitz-PRO's online service results of engine emissions prediction depending on the fuel injection advance are shown in figure 4, 5. We considered the maximum continuous rating (MCR) operating point of marine low-speed engine MAN 6S60MC.

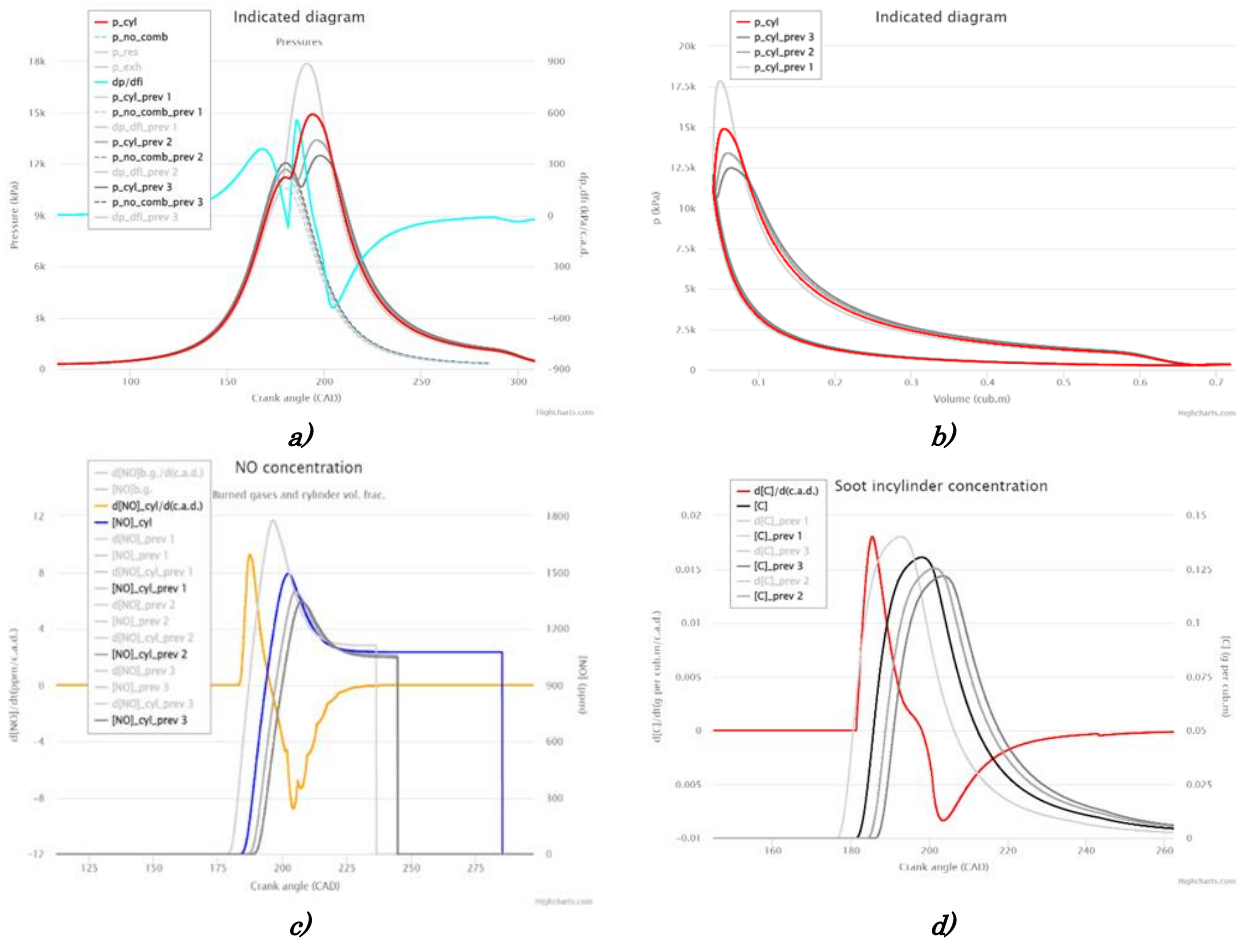


Figure 4. $P(deg)$ (a), $P(V)$ (b), NO concentration (c), Soot concentration (d) of MAN 6S60MC engine at different fuel injection timing

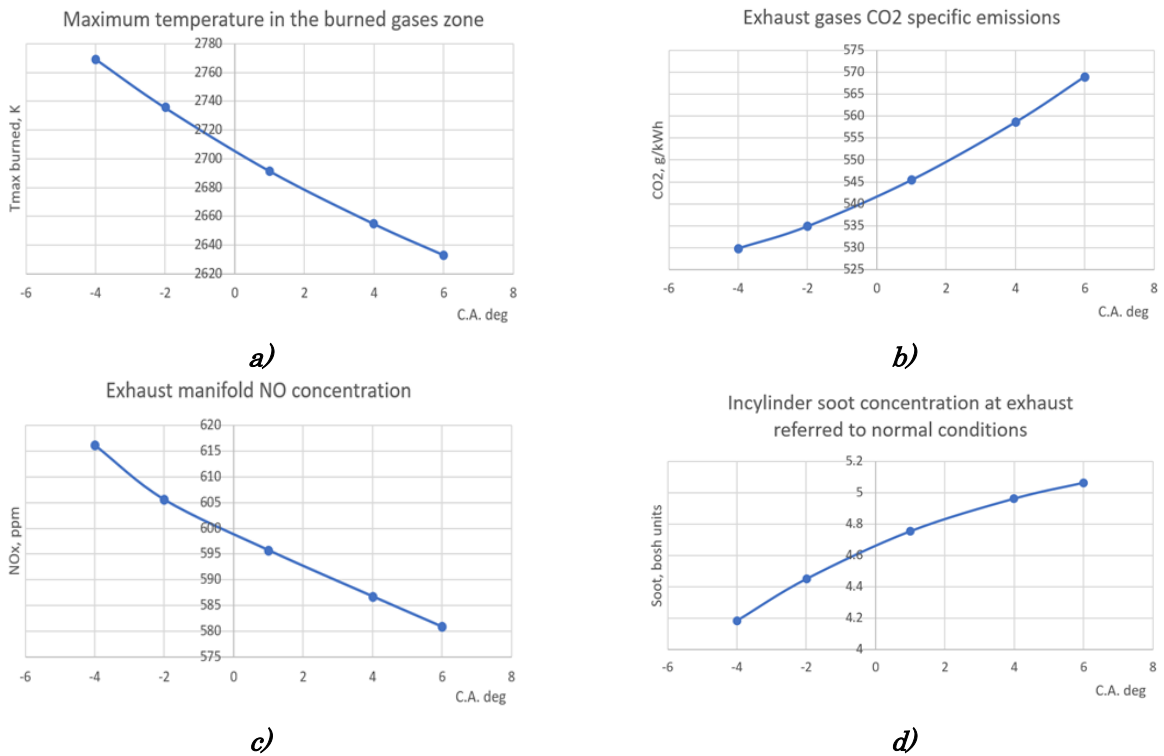


Figure 5. Maximum temperature in the burned gases zone (a), CO₂ specific emissions (b), NO (c) and soot (d) concentration at different fuel injection timing

Conclusions

The analysis of emissions concentrations of CO₂, NO, and soot during advanced marine diesel engine diagnostics using the D4.0HT system and Blitz-PRO online service showed that earlier fuel injection timing resulted in decreased CO₂ specific emissions and soot, but increased concentration of nitrogen oxides (NO). These findings suggest that careful consideration of fuel injection timing can influence emissions performance in accordance with current IMO requirements. Numerical analysis of these values can aid in the selection of an appropriate operational strategy that takes into account current IMO requirements, engine power, and fuel consumption rate, thereby optimizing engine performance and emissions control.

References

- [1]. IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships, *International Maritime Organization*. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/IMO-Strategy-on-reduction-of-GHG-emissions-from-ships.aspx>
- [2]. ANNEX 11. Resolution MEPC.304(72) Initial IMO strategy on reduction of ghg emissions from ships, *International Maritime Organization*. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.304\(72\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.304(72).pdf)
- [3]. R. Varbanets, "Diagnostic control of the working process of marine diesel engines in operation.", Dissertation of the Doctor of Technical Sciences, Odessa, ONMU, 2010.
- [4]. D. Minchev, Blitz-PRO User's manual, <http://blitzpro.zeddmalam.com/extra/Tutorial/Help.pdf>
- [5]. Varbanets Roman, Shumylo Oleksandr, Marchenko Andrii, Minchev Dmytro, Kyrnats Vladyslav, Zalozh Vitalii, Aleksandrovska Nadiia, Brusnyk Roman and Volovyk Kateryna. Concept of Vibroacoustic Diagnostics of the Fuel Injection and Electronic Cylinder Lubrication Systems of Marine Diesel Engines. *Polish Maritime Research*, 29:4, 2022, 88-96. <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046>
- [6]. Neumann S., Varbanets R., Minchev D., Malchevsky V., Zalozh V. Vibrodiagnostics of marine diesel engines in IMES GmbH systems. *Ships and Offshore Structures*, 2023, 18(11), 1-12. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2128558>
- [7]. Yeryganov, O., Varbanets, R. (2018). Features of the fastest pressure growth point during compression stroke. *Diagnostyka*, 19(2), 71-76. <https://doi.org/10.29354/diag/89729>
- [8]. Minchev, D.S., Varbanets, R.A., Alexandrovskaya, N.I., Pisintsaly, L.V. (2021). Marine diesel engines operating cycle simulation for diagnostics issues. *Acta Polytechnica*, 61(3), 428-440. <https://doi.org/10.14311/AP.2021.61.0435>
- [9]. Minchev D., Gogorenko A., Varbanets R., Mo-shentsev Y., Pistek V., Kucera P., Kyrnats V. Prediction of centrifugal compressor instabilities for internal combustion engines operating cycle simulation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2023, 237(2-3), 572-584. <https://doi.org/10.1177/09544070221075419>

Authors' Information

Roman Varbanets, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department Marine Power Plants and Maintenance, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine, [ORCID ID: 0000-0001-6730-0380](https://orcid.org/0000-0001-6730-0380).



Dmytro Minchev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Marine Power Plants and Maintenance, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine, [ORCID ID: 0000-0002-5960-3063](https://orcid.org/0000-0002-5960-3063).



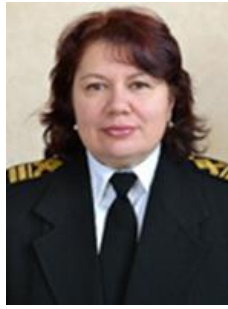
Iryna Savelieva, Doctor of Economics, Professor of the Department of Entrepreneurship and Tourism Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine, [ORCID ID: 0000-0002-6492-2130](https://orcid.org/0000-0002-6492-2130).



Andriy Rodionov, Marine Superintendent of DTSCHART Ltd., Zyrardow, Poland.



Tatiana Mazur, PhD student, Senior Lecturer, Danube Institute, National University "Odesa Maritime Academy", Izmail, Ukraine, [ORCID ID: 0009-0008-7816-145X](https://orcid.org/0009-0008-7816-145X)



Sviatoslav Psariuk, Superintendent of Transship LTD, Odesa, Ukraine.



ПЛАВУЧІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ НА БАЗІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЯК ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ СУДЕН В АКВАТОРІЇ ПОРТУ

Коробейнікова Н.В.[✉], Чередніченко О.К.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

Анотація

Ключові слова: мобільний енергокомплекс, плавуча електростанція, контроль енергоефективності, суднова енергетична установка

Основною метою цього дослідження є оцінка можливості використання мобільних енергокомплексів для виробництва та забезпечення електричною енергією припортових територій а також суден, що знаходяться в акваторії порту з метою збільшення показників енергоефективності морської інфраструктури. Були виявлені перспективні напрямки розвитку та проаналізовано варіанти використання плавучих електростанцій як джерела живлення суден поблизу причалу та в акваторії порту, а також в умовах тимчасової підтримки впровадження перспективних технологій.

Вступ

В останні часи широке використання набули мобільні енергокомплекси, зокрема плавучі електростанції, як додаткове або альтернативне джерело постачання електричної енергії для віддалених районів, або припортової території.

Кількість плавучих електростанцій збільшується в останні десятиліття. Більшість плавучих електростанцій працюють на нафтогазовому паливі і генерують викиди в повітря, створюють шум і скидають викиди у воду, що впливає на місцеве середовище, якість повітря і води, а також клімат.

Актуальність досліджень

Світовий ринок плавучих електростанцій оцінюється в 1 217,139 млн USD на 2020 рік. Зі зростанням у середньому на 10,03% на рік він, за прогнозами, мав досягнути розміру 2159,766 млн USD до 2026 року.

Поява COVID-19 і збройна агресія РФ проти України несприятливо вплинули на світовий ринок плавучих електростанцій, оскільки пандемія призвела до зупинки діяльності в енергетичній галузі в усьому світі, що обмежило необхідні дослідження і розробки. Після початкового періоду блокування деякі види діяльності були дозволені, але з обмеженнями і певними протоколами, яких необхідно було дотримуватися, наприклад, будівництво і складання плавучої електростанції будуть виконуватися з меншою потужністю, що потребуватиме менше праці для контакту, а також у приміщенні також було потрібно дотримуватися соціальної дистанції.

Викладення основного матеріалу

Складові енергоефективності системи морського транспорту повинні виходити за межі суден та поширюватися на берегові організації, включаючи порти, які повинні надавати ефективні послуги, а також на інші ланки логістичного ланцюга (тобто підрозділи обробки вантажів, служби управління рухом суден та протоколами маршрутизації, комерційні відділи фрахтування суден, бункер-бази, служби постачання та інше). Це передбачає розробку засобів щодо контролю енергоефективності морського транспорту (ECEEM – Emission Control and Energy Efficiency Measures) [1].

У рамках цього імперативу визначені дві цілі, а саме:

- оптимізація операційної діяльності;
- створення новітніх технологій та покращення властивостей існуючих об'єктів.

Існуючі ЕСЕЕМ в основному поділяються на три категорії: засоби контролю енергоефективності обладнання, засоби контролю ефективності використання енергоносіїв та засоби контролю енергоефективності при експлуатації (рис.1) [2].

До категорії контролю енергоефективності обладнання відноситься засоби, які пов'язані з оцінкою конструктивних, технологічних та інших інженерних рішень щодо суднового енергетичного обладнання на борту судна, в першу чергу головних (силових) двигунів, допоміжних двигунів та теплоенергетичного обладнання (з врахуванням технологій обробки відпрацьованих газів).

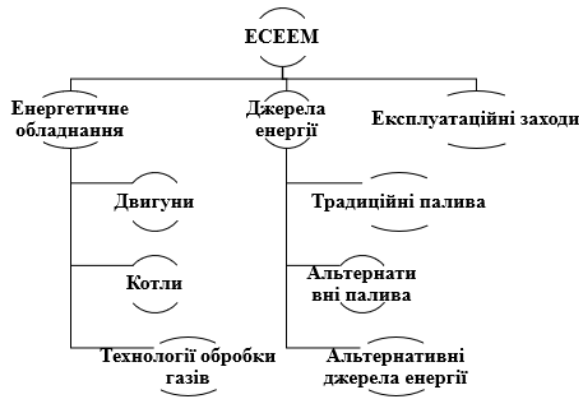


Рисунок 1. Категорії ЕСЕЕМ

До засобів контролю ефективності використання енергоносіїв відносяться ЕСЕЕМ, які пов'язані з джерелами енергії, що використовуються на судні, незалежно від того, чи є вони судновими або є наземними. Ці заходи можуть включати рішення, які пов'язані з використанням традиційних та альтернативних палив та альтернативними джерелами живлення.

Щоб підвищити ефективність своїх інструментів боротьби за підвищення енергоефективності порти повинні співпрацювати з іншими регіональними зацікавленими сторонами, узгоджуючи з ними регіональні вимоги до суден та об'єктів морської інфраструктури.

Післявоєнне оновлення економіки України потребує відновлення портової інфраструктури та реалізації інвестиційних проектів та проектів державно-приватного партнерства. Одним з таких проектів може бути створення рейдового терміналу в Очакові.

Вкрай важливо швидко розгорнути нові потужності з виробництва електроенергії. Однак тривалий термін будівництва наземних електростанцій є серйозною перешкодою для задоволення нагальних потреб в електроенергії. Крім того, проблеми безпеки в нинішній українській ситуації можуть перешкоджати довгостроковим

інвестиціям у виробництво енергії в конкретних регіонах.

Мобільні електростанції зазвичай являють собою теплові електростанції, всі компоненти яких є модульними і встановлюються на транспортний засіб або складаються з декількох транспортних одиниць. Приводними двигунами електрогенераторів зазвичай є дизельні двигуни або газові турбіни. До складу обладнання, крім основного двигуна і генератора, входять розподільна апаратура, блоки управління і сигналізації, допоміжне обладнання та запасні частини. Ці електростанції пропонують гнучке і децентралізоване рішення для швидкої подачі електроенергії в райони з обмеженою інфраструктурою. Вони широко використовуються у віддалених регіонах, зонах стихійних лих і служать резервними джерелами живлення. Ринок мобільних електростанцій можна розділити за потужністю на три сегменти: 1-10 МВт, 10-20 МВт і понад 20 МВт. Однак висока витрата палива і вплив на навколишнє середовище створюють серйозні проблеми для світового ринку мобільних електростанцій. Вирішення цих проблем може бути досягнуто за рахунок застосування технологій термохімічної переробки палива, що використовують вторинні енергоресурси [3,4].

Плавучі електростанції (ПЕС) являють собою окрему підгрупу в категорії мобільних електростанцій. Плавучу електростанцію можна охарактеризувати як спеціалізоване судно, самохідне або несамохідне, призначене для вироблення електроенергії. Область застосування плавучих електростанцій досить велика, як зазначено в [5, 6]. Однак склад і характеристики цих електростанцій істотно змінюються залежно від умов експлуатації та визначаються техніко-економічними обмеженнями, що накладаються на конкретний проект (табл. 1).

На ці обмеження може впливати сучасний стан технологій та обладнання, а також політичні, соціальні, зовнішньоекономічні та інші чинники.

Таблиця 1. Варіанти використання плавучих електростанцій

Умови експлуатації	Причина використання	Критерії, що визначають доцільність використання	Частота використання
Розгортання в режимі постійної електростанції	Політичні, соціальні, зовнішньоекономічні та регіональні аспекти	Група критеріїв: - економічна ефективність; - екологічність	Рідко
Розгортання для досягнення середньострокових цілей	Соціальні, політичні аспекти	Група критеріїв економічної ефективності	Помірно
Короткострокове екстремне розгортання	Соціальні, політичні аспекти	Група критеріїв забезпечення оперативної працездатності	Часто
Тимчасова підтримка впровадження технологій відновлюваних джерел енергії	Соціальні, технічні, економічні аспекти	Група критеріїв: - економічна ефективність; - екологічність	У перспективі
Використання як джерела живлення суден поблизу причалу і в акваторії порту.	Соціальні аспекти	Група критеріїв екологічності	У перспективі

Висновки

З огляду на ситуацію, що склалася, перспективним напрямом подальших досліджень є вивчення методів забезпечення експлуатаційної ефективності енергетичних установок плавучих електростанцій під час використання їх як джерела живлення суден поблизу причалу та в акваторії порту, а також в умовах тимчасової підтримки впровадження перспективних технологій.

Література

[1]. Study of Emission Control and Energy Efficiency Measures for Ships in the Port Area. IMO. <https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/01/STUDY-OF-EMISSION-CONTROL-AND-ENERGY-EFFICIENCY-MEASURES-FOR-SHIPS-IN-THE-PORT-AREA.pdf>

[2]. Lokukaluge P., Perera, Brage Mo. Emission control based energy efficiency measures in ship operations, *Applied Ocean Research*, Volume 60, 2016, Pages 29-46.

<https://doi.org/10.1016/j.apor.2016.08.006>

[3]. Cherednichenko, O., Serbin, S. & Dzida, M. (2019). Application of Thermo-chemical Technologies for Conversion of Associated Gas in Diesel-Gas Turbine Installations for Oil and Gas Floating Units. *Polish Maritime Research*, 26(3), 181-187. <https://doi.org/10.2478/pomr-2019-0059>

[4]. A. Poran, L. Tartakovsky. Performance and emissions of a direct injection internal combustion

engine devised for joint operation with a high-pressure thermochemical recuperation system. *Energy*, 124, 2017, 214-226, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.074>

[5]. A. Kleijn. Summary assessment of the status of floating powerplants," CE Delft, Netherlands, 2022. Available: <https://policycommons.net/artifacts/3154501/summary-assessment-of-the-status-of-floating-powerplants/3952363/>

[6]. FLOATING POWER PLANTS. Available: <https://vardmarine.com/vessels/vard-9-series-specialized-vessels/floating-power-plants>

Відомості про авторів

Наталія Коробейнікова, асистент каф. ЕСЕУ та ТЕ, Національний Університет Кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.



Олександр Чередніченко, д.т.н., професор, Національний Університет Кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-5745-8117](https://orcid.org/0000-0001-5745-8117).



ADAPTIVE MULTI-PHASE CONTROL SYSTEM OF THE RECTIFIER-INVERTER CONVERTER OF ELECTRIC ROLLING STOCK

Volodymyr Nerubatskyi, Denys Hordiienko[✉]

Ukrainian State University of Railway Transport, Ukraine

Abstract

Keywords: control system, electric rolling stock, electromagnetic compatibility, power factor, rectifier-inverter converter, traction electric motor.

An analysis of the influence of the quality of electrical energy on the reliability and service life of railway devices and other objects was carried out. The shortcomings of the operation mode of thyristor rectifiers in static converters of single-phase alternating current electric locomotives have been determined. Simulation of different control modes of the rectifier-inverter converter of the electric locomotive was carried out. An adaptive multi-phase control system of the rectifier-inverter converter is presented using a diode arm connected in parallel with the rectified current circuit.

Introduction

The issues of increasing the reliability and efficiency of technical means of electric rolling stock have always been relevant and have received special attention in numerous scientific studies. A large number of works [1, 2] are dedicated to the study of electromagnetic compatibility of the "electric locomotive – contact network" system.

However, there remains the problem of ensuring electromagnetic compatibility, since during the operation of some signaling, centralization and blocking systems using rail circuits, both a traction current with a strength of hundreds of amperes and a weak current of the above systems simultaneously flow along the rails. Thus, higher voltage harmonics generated by the electric locomotive lead to the appearance of additional losses in the windings of auxiliary machines of the electric locomotive, which reduces their operational resource [3, 4].

The priority tasks were the development and implementation of more advanced technologies aimed at increasing the reliability of electrical equipment of traction rolling stock [5, 6]. In this strategy, the question of improving the quality of electric power in the power supply system takes first place, since the operational resource of the technical means of the entire railway industry directly depends on the quality of electric energy. In connection with the growing freight traffic and passenger traffic of AC mainline railways, the quality of electrical energy is being increasingly stricter.

Relevance of research

Distortion of the sinusoidal form of the voltage in the contact network affects both the operating

characteristics of electric locomotives and the traction power supply system [7, 8]. Thus, higher voltage harmonics generated by an electric locomotive lead to the appearance of additional losses in the windings of auxiliary machines of electric locomotives, which reduces their operational resource.

The influence of non-sinusoidal voltage on induction and electronic devices for accounting for electricity consumed by an electric locomotive leads to an increase in the error of the measurement results of these devices [9, 10]. Harmonics disrupt the reliability of protection devices and worsen their operational characteristics. In this case, the most common are false alarms, which are most likely in the operation of protection systems based on resistance measurements.

The low quality of electricity leads to a reduction in the service life of the insulation of electric machines and devices, low reliability of the operation of signaling, centralization and blocking devices, automatic locomotive signaling, to failures in the operation of the control systems of electric locomotive converters, relay protection, automation, telemechanics, communication and computing equipment [11, 12].

Thanks to the use of thyristor rectifiers in static converters of single-phase alternating current electric locomotives, it is possible to control collector traction electric motors by smoothly adjusting the voltage on them [25, 26]. This is done by changing the opening moments of the corresponding arms of the rectifier-inverter converter of the electric locomotive within the period of the supply voltage. However, the operation of such electric locomotives, along with the advantages of the power circuits of thyristor converters, also revealed a

number of their shortcomings in comparison with electric locomotives equipped with semiconductor heterogeneous diodes.

Losses of failure of technical means from non-fulfillment of electromagnetic compatibility requirements are quite significant due to the railway network. This determines the relevance and economic significance of this problem.

The main material of the study

According to the standard mode of operation of the control system on modern alternating current electric locomotives, switching in all rectifier inverter converters occurs simultaneously. At the moment of starting commutation, part of the windings of the traction transformer of each section of the electric locomotive starts to work as a short circuit. The simultaneous start of switching of all converters causes a sharp decrease in the voltage on the current receiver.

The power of the electric locomotive in the hourly and long-term modes is slightly lower than with the typical control method, and there is a slight decrease in the speed of the electric locomotive. In addition, the constancy of the angle shift by 89° does not give the full effect of reducing high-frequency voltage fluctuations of the catenary network due to changes in the inductance and capacity of the traction network, which can lead to periodic disruption of the performance of the electric locomotive. In an ideal case, the value of the delay of the pulses should be equal to the half-period of the self-oscillations of the voltage in the traction network. Due to the difference in the parameters of the traction network and the variable distance of the electric locomotive from the busbars of the traction substations, the frequency of free fluctuations of the voltage on the current receivers of the electric locomotive changes. In this connection, only partial damping of free voltage fluctuations occurs.

Thus, for the most effective reduction of distortions in the shape of the supply voltage curve, it is desirable to introduce an adjustable delay exactly on the half-period of free oscillation, taking into account the variable distributed parameters of the catenary network. In this regard, it is proposed to use simultaneous commutation with shunting of the rectified current circuit of the electric locomotive with a discharge diode arm with the development of an adaptive multi-phase corner control system. It is proposed to delay the control of the converter shoulders, which is equal to the half-period of the own oscillations of the voltage of the traction network. This will increase the power factor of the electric locomotive from 0.84 to 0.88.

Intrinsic voltage fluctuations of the traction network are determined through spectral analysis,

which allows characterizing the frequency composition of the measured signal. The Fourier transform is a mathematical basis that relates a temporal signal to its representation in the frequency domain. The time-continuous Fourier transform of a signal identifies the frequencies and amplitudes of those complex sinusoids (exponentials) into which some arbitrary oscillations are decomposed.

Spectral analysis of the catenary voltage is supposed to be carried out taking into account DSP (digital signal processor) controllers, which provide fast Fourier transformation. The catenary voltage through the voltage sensor type LV 100 is supplied to the input of the voltage sensor matching unit with the DSP. The latter, according to the given algorithm, carries out a spectral analysis of the harmonic oscillations of the power supply network, selects the harmonic with the largest amplitude and calculates the change in the delay angle of the inclusion of the arms of the rectifier-inverter converter with pulses with phase p . According to the signals of the control unit of the rectifier-inverter converter, the control pulses are alternated and distributed with converters and their shoulders.

The structural diagram of the implementation of multi-phase control of the arms of the rectifier-inverter converter is shown in Fig. 1.

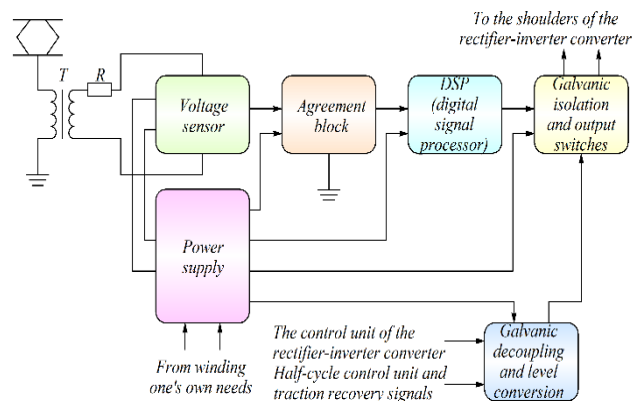


Figure 1. Structural diagram of the implementation of multi-phase control of the arms of the rectifier-inverter converter

The created adaptive multi-phase control system of the rectifier-inverter converter of the electric locomotive will allow, regardless of the location of the electric locomotive on the feeder zone (changes in the catenary network parameters), to maximally perform the function of significantly reducing the harmonics corresponding to the frequencies of these oscillations, and to reduce the distortion coefficient of the sinusoidality of the voltage curve, that is, the electric energy in contact network.

In order for the external characteristics of the rectifier-inverter converter in the sections of the electric locomotive to be the same, it is suggested to alternate the deviation of the angle for each

adjustable section in different half-periods. Diagrams of the voltage on the traction electric motors and in the contact network with the proposed algorithms of the rectifier-inverter converter are shown in Fig. 2, 3.

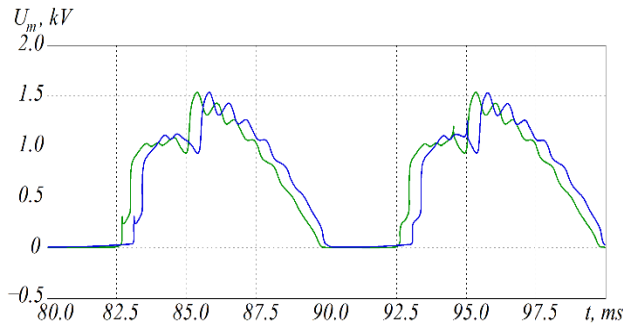


Figure 2. Diagram of voltage on traction electric motors of different sections with the proposed algorithms of operation of the rectifier-inverter converter

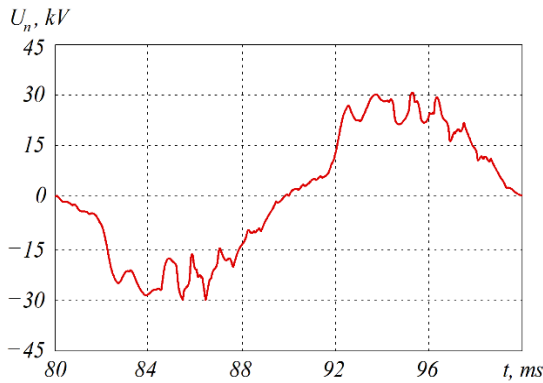


Figure 3. Diagram of the voltage in the contact network with the proposed algorithms of the rectifier-inverter converter

When using the presented control algorithms, can expect a significant reduction in voltage fluctuations and distortions in the catenary network.

For the following control algorithms, the external characteristics of the converter were calculated:

1. Typical voltage regulation algorithm.
2. Algorithm of the converting unit with multi-phase control by sections.
3. Algorithm of the converting unit with the inclusion of a discharge diode in the rectified current circuit.
4. Algorithm with different phase control by sections, as well as with the inclusion of a discharge diode in the rectified current circuit.

In Fig. 4 shows the comparative external characteristics of the converter of three control algorithms.

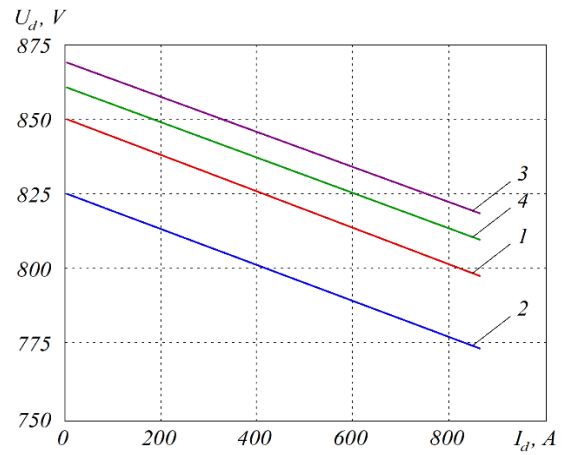


Figure 4. Comparative external characteristics of the converter under different control modes of the rectifier-inverter converter of the electric locomotive: 1 – typical work algorithm; 2 – proposed algorithm 1; 3 – proposed algorithm 2; 4 – proposed algorithm 3

When the electric locomotive is operating, the proposed control algorithm 2 is the most acceptable. Since in this case, despite the decrease in external characteristics (slightly compared to the characteristics of the third algorithm), the operating conditions of the electric locomotive in terms of voltage quality in the contact network, its electronic equipment and electrical equipment, and other equipment located in the immediate vicinity of the rail significantly improve way.

Conclusion

The use of the proposed control algorithms together with the adaptive system will allow to significantly improve the characteristics of the voltage in the catenary network, and, therefore, to reduce the negative impact on the operation of the electric locomotive. Improving the quality of electricity will make it possible to extend the service life of the insulation of electric machines and devices, the reliability of signaling, centralization and blocking devices, automatic locomotive signaling, control systems for electric locomotive converters, relay protection, automation, telemechanics, communication and computer equipment.

References

[1] Serdiuk T., Ansari H. T., Rodica B. Electromagnetic influence of AC traction network on the railway communication lines. *2022 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMC/SPIN)*. 2022. P. 326–329. [doi:10.1109/EMCSI39492.2022.9889435](https://doi.org/10.1109/EMCSI39492.2022.9889435)

[2] Nicolae P.-M., Nicolae I.-D., Nuca I., Nicolae M.-S. Determination of electromagnetic noise

from a power supply substation of railway traction systems. *2022 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSD)*. 2022. P. 619–624. [doi:10.1109/EMCSI39492.2022.9889567](https://doi.org/10.1109/EMCSI39492.2022.9889567)

[3] Dems M., Komezka K. Designing an energy-saving induction motor operating in a wide frequency range. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2022. Vol. 69, No. 5. P. 4387–4397. [doi:10.1109/TIE.2021.3082057](https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3082057)

[4] Crotti G., D'Avanzo G., Landi C., Letizia P. S., Luiso M. Evaluation of voltage transformers' accuracy in harmonic and interharmonic measurement. *IEEE Open Journal of Instrumentation and Measurement*. 2022. Vol. 1. P. 1–10. [doi:10.1109/OJIM.2022.3198473](https://doi.org/10.1109/OJIM.2022.3198473)

[5] Kobenkins G., Marinbahs M., Bizans A., Rilevs N., Sliskis O. Determination of the level of vibroactivity of the traction motor-gear units. *2023 18th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*. 2023. P. 1–4. [doi:10.1109/ELMA58392.2023.10202391](https://doi.org/10.1109/ELMA58392.2023.10202391)

[6] Hu H., Liu Y., Li Y., He Z., Gao S., Xiaojuan Z., Tao H. Traction power systems for electrified railways: evolution, state of the art, and future trends. *Railway Engineering Science*. 2023. Vol. 32. P. 1–19. [doi:10.1007/s40534-023-00320-6](https://doi.org/10.1007/s40534-023-00320-6)

[7] Graber G., Calderaro V., Galdi V., Ippolito L., Massa G. Impact assessment of energy storage systems supporting DC railways on AC power grids. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 10783–10798. [doi:10.1109/ACCESS.2022.3145239](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3145239)

[8] Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A., Khoruzhevskyi H. A. Study of the energy parameters of the system “solar panels – solar inverter – electric network”. *4th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF-2023). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1254. 012092. P. 1–12. [doi:10.1088/1755-1315/1254/1/012092](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012092)

[9] Fan R., Zhang M., Wang J., Chang X., Gao L., Song J., Zhang S., Xu Y. Overview of power factor

calculation method for nonsinusoidal and unbalanced systems. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*. 2023. Vol. 18. P. 1763–1771. [doi:10.1002/tee.23909](https://doi.org/10.1002/tee.23909)

[10] Khomenko I. V., Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A., Shelest D. A. Research and calculation of the levels of higher harmonics of rotary electric machines in active-adaptive networks. *4th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF-2023). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1254. 012040. P. 1–15. [doi:10.1088/1755-1315/1254/1/012040](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012040)

[11] Salles R. S., Ronnberg S. K. Review of waveform distortion interactions assessment in railway power systems. *Energies*. 2023. Vol. 16. P. 5411. [doi:10.3390/en16145411](https://doi.org/10.3390/en16145411)

[12] Nerubatskyi V., Hordiienko D. Analysis of the control system of a wind plant connected to the AC network. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2023. No. 1. P. 87–91. [doi:10.20535/1813-5420.1.2023.276028](https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2023.276028)

Authors' information

Volodymyr Nerubatskyi, PhD, Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine, [ORCID: 0000-0002-4309-601X](https://orcid.org/0000-0002-4309-601X).



Denys Hordiienko, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine, [ORCID: 0000-0002-0347-5656](https://orcid.org/0000-0002-0347-5656).



УРАХУВАННЯ АНАЛІЗУ РИЗИКІВ ПРИ РОЗРОБЦІ МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ ВАРТОСТІ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ СУДНА

Шумило О.М.[✉], Кононова О.М.

Одеський національний морський університет, Україна

Анотація

Ключові слова: модель вартості життєвого циклу, прийнятний ризик, метод Монте-Карло.

У роботі запропоновано вирішення проблеми, пов'язаної із значними похибками в розрахунку повної вартості ЖЦ шляхом використання теорії ризиків. Основною метою оцінки ризику є уявлення на основі об'єктивних свідчень інформації, необхідної для прийняття обґрунтованого рішення щодо способів обробки ризику. Оцінка ризику може бути виконана з різним ступенем глибини і деталізації з використанням одного або кількох методів різного рівня складності. Форма оцінки та її вихідні дані мають бути сумісні з критеріями ризику, встановленими при визначенні сфери застосування. Під час вибору методу оцінки ризику необхідно враховувати, що метод має відповідати багатьом критеріям. У статті розглядаються два підходи використання теорії ризиків: встановлення значення прийнятного сумарного ризику або використання методу Монте-Карло для трансформування невизначеності для звичайних аналітичних моделей та розрахунку ймовірностей, якщо аналітичні методи не можуть бути використані.

Вступ

Сучасний період розвитку цивілізаційного суспільства характеризує процес інформатизації як такий, що кардинально змінює концепцію моделювання в процесі проектування технічних систем. У світі спостерігається постійне зростання складності технічних систем, до яких належить морські та річкові судна. Таке ускладнення в сукупності з постійним зростанням конкуренції на ринку перевезень робить процес прийняття управлінських рішень щодо управління життєвим циклом судна неможливим без розробки адекватної моделі визначення вартості життєвого циклу судна. Використання цієї моделі необхідна в процесі вирішення значного кола задач: – проектування та побудова нового судна; – оптимізація тривалості життєвого циклу до його утилізації; – розробка стратегії ТОР суднових технічних засобів та суднових конструкцій; – аналіз доцільності проведення модернізації або переобладнання судна. Запроваджене дослідження націлене на вдосконалення моделі вартості життєвого циклу (ЖЦ) судна на основі використання в ній методології управління ризиками.

Актуальність досліджень

Наведена вище задача знаходиться в центрі уваги фахівців різних галузей знань вже доволі

довгий період часу [1–7]. У роботі [1] як концепції запропоновано, що будь-яка система, незалежно від її масштабу і виду, проходить весь свій ЖЦ у суворій послідовності, відповідно до визначеного порядку. Дефініція стандарту визначає: ЖЦ – це еволюція системи, продукції, послуги, проекту або іншого об'єкта, створеного руками людини, від її задуму до припинення використання за плановим призначенням. В основі майже всіх запропонованих моделей і методів розрахунку вартості ЖЦ технічних систем знаходиться принцип Заде, який попереджає про несумісність точності моделі зі складністю системи. Д.А. Курсіним [3] сформульовані основні вимоги до означених моделей, а саме: – обмежена кількість змінних і факторів; – відсутність необхідності постійного збирання великої кількості вихідної інформації; – використання методів діагностування, тобто зміну вартості грошей у часі. У загальному вигляді вартість ЖЦ судна Z_{Σ} складається з таких доданків [4]: – витрати на проектування і побудову судна, його введення до експлуатації Z_B ; – витрати на паливно-мастильні матеріали Z_T ; – витрати на ремонт, що містять вартість змінно-запасних частин Z_R ; – експлуатаційні витрати (утримання екіпажу, забезпечення функціонування окремих елементів системи судна) C_E ; – витрати на утилізацію на момент виводу судна з експлуатації [4] Z_U . З

урахуванням дисконтування авторами [5] запропонована загальна формула розрахунку Z_{Σ} :

$$Z_{\Sigma} = Z_B + \sum_{i=1}^T \left[\frac{1}{(1+k)^i} Z_E \right] + \sum_{i=1}^T \left[\frac{(1+I_T)^i}{(1+k)^i} Z_T \right] + \sum_{i=1}^T \left[\frac{1}{(1+k)^i} Z_R \right] + \frac{Z_U}{(1+k)^T}, \quad (1)$$

де T – плановий час експлуатації судна (горизонт планування);

k – коефіцієнт дисконтування;

I – коефіцієнт інфляції.

Будь-яка задача оптимізації використання судна і процесі перевезення вантажів (пасажирів) вирішується шляхом мінімізації виразу (1). Однак основна проблема в процесі її вирішення є наслідком тривалого життєвого циклу судна, що призводить до значних похибок при вирішенні вихідних параметрів моделі (зміна вартості паливно-мастильних матеріалів, коливання ринку судноремонтних послуг тощо).

В останні роки такі проблеми вирішуються шляхом застосування в оптимізаційних моделях методології теорії ризиків. Прийняття і впровадження міжнародних стандартів серії ISO 31000 [6; 7] дасть змогу значно збільшити точність при вирішенні задачі оптимізації життєвого циклу складних технічних систем.

Викладення основного матеріалу

У різних літературних джерелах можна знайти більше ста визначень дефініції «ризик» [8–15]. Однак найбільш чітко і точно визначення наведено в Стандарті [6]: «Ризик – це вплив невизначеності на мету».

З цього формулювання можна виділити головні ознаки ризику.

По-перше, ризики виникають тільки в разі виконання будь-яких цілеспрямованих дій. Якщо метою судноплавної компанії не є торговельно-економічні операції з деякою державою, то стан фінансової системи цієї країни не можна вважати джерелом ризику. І, навпаки, якщо потенційний портфель замовлень містить сумісні проекти, цей фактор стає одним із найбільш важливих.

По-друге, ризиком варто вважати подію, яка має чітко визначені причини виникнення і негативні наслідки. Тому невірними будуть терміни: виробничий ризик, екологічний ризик тощо. Такі характеристики можуть використовуватись

як класифікаційні ознаки, а не ризики конкретної особи.

По-третє, ризик – це подія, яка може відбуватися лише з деякою ймовірністю, яка має не дорівнювати нулю або одиниці.

По-четверте, будь-який ризик варто вважати економічною категорією. Тому під час кількісної оцінки ризик (R) чисельно дорівнює добутку ймовірності настання ризикової події (P) та величині збитків (U), яких зазнає судновласник внаслідок недосягнення тієї чи іншої цілі.

$$R = PU. \quad (2)$$

Таким чином, якщо будь-яка діяльність націлена на досягнення N цілей, кожна з яких характеризується значеннями P_N та U_N , відповідно, сумарний ризик становитиме:

$$R_{\Sigma} = \sum_{n=1}^N P_n U_n. \quad (3)$$

По-п'яте, ризик – це кількісний показник процесу, а не об'єкта. Саме тому в моделі оцінки вартості життєвого циклу судна варто враховувати ризики всіх процесів, що будуть реалізовані судном впродовж повного життєвого циклу або частини, що аналізується. З урахуванням тривалості циклу кількість виконаних процесів буде дуже великою, що значно ускладнює задачу визначення сумарного ризику.

У практиці ризик-менеджменту з успіхом використовується концепція прийнятного ризику, яка наведена на рис. 1. Для кожного з виробничих процесів визначаються експертним шляхом (або на базі статистичних даних, якщо такі є ризики перевищення витрат від планового показника $R_1, R_2, R_3, \dots, R_i$ та порівнюються з прийнятним ризиком $R_{доп}$, затвердженим для цього виробничого процесу. Виробничі процеси, для яких величина ризику менше прийнятного, показані на схемі зеленим кольором, а більше – червоним. Довжина стрілки пропорційна величині ризику. Представлена на рис. 1 схема дає змогу наочно визначити найбільш вразливі з погляду мінімізації сумарних витрат.

З урахуванням великої кількості процесів за повний період життєвого циклу судна такий метод досить складно впровадити на практиці. Крім того, вплив окремих факторів на величину ризику окремих процесів може бути спрямованим у різні сторони. У деяких процесах це може призвести до зростання витрат, але одночасно зменшити витрати на інші процеси, що нівелює сумарну величину ризику.

Основною метою оцінки ризику є уявлення на основі об'єктивних свідчень інформації,

необхідної для прийняття обґрунтованого рішення щодо способів обробки ризику. Оцінка ризику забезпечує: – розуміння потенційних небезпек і впливу їхніх наслідків на досягнення встановлених цілей судновласної компанії; – отримання інформації, необхідної для прийняття рішень; – розуміння небезпеки і її джерел; – ідентифікацію ключових чинників, що формують ризик, уразливих місць судна і її систем; можливість порівняння ризику з ризиком альтернативних технологій, методів і процесів; – обмін інформацією про ризик і невизначеності; – інформацію, необхідну для ранжирування ризиків; – запобігання нових інцидентів на основі дослідження наслідків інцидентів; – вибір способів обробки ризику; – відповідність правовим і обов'язковим вимогам; – отримання інформації, необхідної для обґрунтованого рішення про прийняття ризику відповідно до встановлених критеріїв; – оцінку ризику на всіх стадіях життєвого циклу судна.

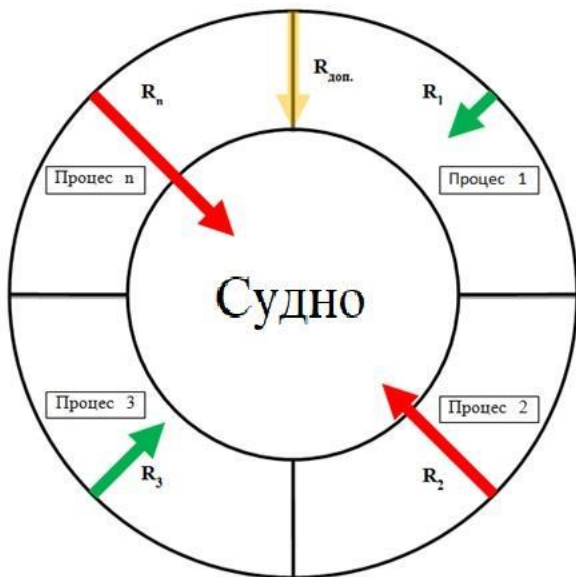


Рисунок. 1. Ризики окремих процесів експлуатації судна

У роботі [7] наведено понад 30 методів кількісної оцінки ризиків, які можна умовно поділити на чотири типи:

- статистичні;
- ймовірно-статистичні;
- теоретико-ймовірнісні;
- експертні [8–10].

Теоретичною основою ймовірнісних моделей визначення ризиків є теорія ймовірностей та ймовірнісне моделювання. На підставі розроблених математичних моделей елементів системи M_E , технологічних процесів M_{TP} , процесів зношування M_3 , сценаріїв виникнення і розвитку

аварійних ситуацій з урахуванням ролі людського фактора $M_{ЛФ}$.

$$M = f(M_E; M_{TP}; M_3; M_{ЛФ}). \quad (4)$$

У цій моделі вносяться ймовірнісні характеристики зовнішніх та внутрішніх факторів:

$$P = f(M_E; M_{TP}; M_3; M_{ЛФ}). \quad (5)$$

За результатами ймовірнісного моделювання визначаються розподіл ймовірностей виникнення небезпечних подій та математичне очікування збитків у разі настання цих подій U . Недоліком таких методів є складність реалізації ймовірного аналізу, що робить його впровадження досить обмеженим. Статистичні методи будуються на аналізі великих масивів статистичних досліджень, що також робить їх не завжди прийнятними. Найбільше поширення в останні роки отримала модель оцінки ризиків на підставі аналізу небезпек, вразливостей і втрат. Загальний порядок використання такої моделі аналізу ризиків передбачає послідовний аналіз небезпек, які можуть виникнути в системі, вразливостей системи щодо виявлених небезпек та аналіз втрат від настання небезпек, що реалізувались [11; 12]

$$A_R = A_H \cup A_{BP} \cup A_{BT}. \quad (6)$$

На рис. 2 наведена структурна схема моделі аналізу ризиків, де використовуються такі позначення:

- $ПС$ – початковий стан системи;
- S_0 – сценарій успішного досягнення системою своїх цілей;
- KC_0 – бажаний кінцевий стан системи;
- E_0 – діапазон відхилення точки KC_0 , в межах якого кінцеві стани можна вважати допустимими;
- IC_1, IC_2 – ініціюючі небезпеки події;
- $ГC_1, ГC_2$ – граничні стани системи;
- $S_i (i = 1, 2, \dots, N)$ – i -й сценарій, що реалізується після граничного стану;
- $KC_i (i = 1, 2, \dots, N)$ – недопустимий кінцевий стан системи, який відповідає сценарію S_i ;
- $U (KC_i) (i = 1, 2, \dots, N)$ – втрати, що відповідають кінцевому стану KC_i .

Вразливість системи характеризується сукупністю сценаріїв випадкових подій і причинно-наслідкових зв'язків лише цими подіями, тобто структурою сценарного графа системи [13]. При цьому параметрами вразливості будуть виступати умовні ймовірності реалізації різних

кінцевих станів систем, що виникають у полі ініціюючої події того чи іншого типу та інтенсивності. Аналіз вразливостей припускає дослідження послідовності події та причинно-наслідкових зв'язків між ними від ініціюючої до досягнення системою одного з кінцевих станів. Іншими словами, аналіз вразливостей являє собою детальне вивчення дерева сценаріїв системи, що вивчається.

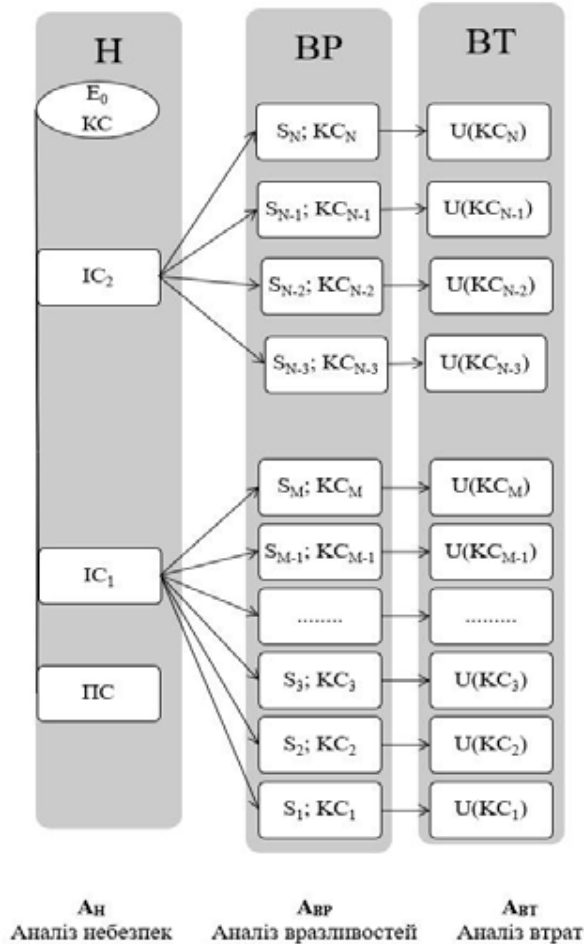


Рисунок. 2. Модель аналізу ризиків

Траекторія S_0 у просторі станів, що описують функціонування системи від початкового стану PC до бажаного KC_0 має назву «сценарій успіху». У моменти часу t_1, t_2, \dots, t_N в системі можуть відбутися ініціюючі події $III_1; III_2; \dots; III_N$, які здатні відхилити траекторію від кривої S_0 , включаючи послідовність подій, що відповідають сценаріям S_1, S_2, \dots, S_N , які дають змогу системі досягнути кінцевих станів KC_1, KC_2, \dots, KC_N . Кожен кінцевий стан, крім бажаного, призводить до втрат $U_N(KC_N)$. Таким чином, втрати – це результат зміни стану системи у бік, який не дозволяє отримати заплановану кінцеву подію.

За наслідками послідовної оцінки небезпек, вразливостей та втрат для системи можна визначити рівень ризику:

$$R = \vec{H} V \vec{U}. \tag{7}$$

де $\vec{H} = \{P[III_1]; P[III_2]; \dots; P[III_N]\}$ – вектор небезпек, компонентами якого є ймовірності реалізації ініціюючих подій;

$V[P(KC_1) | III_j]$ – NK – матриця вразливостей, компоненти якої виявляють собою ймовірності реалізації невдалих станів KC_1 за умови настання ініціюючої події III_j ;

$\vec{U} = \{U[KC_1]; P[KC_2]; \dots; P[KC_N]\}$ – вектор втрат, компонентами якого є величини збитків, що відповідають кінцевим станом KC_1, KC_2, \dots, KC_N .

Оцінка ризику може бути виконана з різним ступенем глибини і деталізації з використанням одного або кількох методів різного рівня складності. Форма оцінки та її вихідні дані мають бути сумісні з критеріями ризику, встановленими при визначенні сфери застосування.

У процесі вибору методу оцінки ризику необхідно враховувати, що метод має: – відповідати ситуації, що розглядається в судовласній компанії та оточуючому середовищі; – надавати результати в формі, що сприяє підвищенню обізнаності про вид ризику і способи його обробки; – забезпечувати простежуваність, відтворюваність і верифікацію процесу і результатів.

Досвід у проведенні досліджень з оцінки ризиків під час моделювання вартості життєвого циклу судна показав ефективність використання в цій задачі методу Монте-Карло. Цей метод зазвичай використовують для оцінки діапазону зміни результатів і відносної частоти значень у цьому діапазоні для кількісних величин, таких як вартість, тривалість, продуктивність, попит та ін. Моделювання методом Монте-Карло може бути використано для двох різних цілей: – трансформування невизначеності для звичайних аналітичних моделей; – розрахунку ймовірностей, якщо аналітичні методи не можуть бути використані.

Вхідними даними для моделювання методом Монте-Карло є добре опрацьована модель системи, інформація про тип вхідних даних, джерела невизначеності і необхідних вихідних даних. Вхідні дані та відповідну їм невизначеність розглядають у вигляді випадкових змінних із відповідними розподілами змінних (нормальний, трикутний, логарифмічний тощо).

Процес включає такі етапи: – визначення моделі або алгоритму, які найбільш точно описують поведінку досліджуваної системи; – багаторазове застосування моделі з використанням генератора випадкових чисел для отримання вихідних даних моделі (моделювання системи). За необхідності моделюють вплив невизначеності. Модель записують у формі рівняння, що виражає співвідношення між вхідними та вихідними параметрами. Значення, відібрані як вхідні дані, отримують із відповідних розподілів ймовірностей, що характеризують невизначеності даних; – за допомогою комп'ютера багаторазово використовують модель (часто до 10 000 разів) із різними вхідними даними і отримують вихідні дані. Вони можуть бути оброблені за допомогою статистичних методів для отримання оцінок середнього, стандартного відхилення, довірчих інтервалів.

Перевагами методу Монте-Карло є такі:

- метод може бути адаптований до будь-якого розподілу вхідних даних, включаючи емпіричні розподіли, побудовані на основі спостережень за відповідними системами;

- моделі порівняно прості для роботи і можуть бути в разі потреби розширені; – метод дозволяє врахувати будь-які дії, події і взаємозв'язки між ними, включаючи такі, як умовні залежності; – для ідентифікації сильних і слабких впливів може бути застосований аналіз чутливості;

- моделі є зрозумілими, а взаємозв'язок між входами і виходами – прозорим;

- метод допускає застосування ефективних моделей дослідження багатоконпонентних систем, таких як мережа Петрі.

- метод дає змогу досягти необхідної точності результатів.

Недоліками методу є такі:

- точність рішень залежить від кількості ітерацій, які можуть бути виконані;

- метод передбачає, що невизначеність даних можна описати відомим розподілом;

- великі і складні моделі можуть становити труднощі для фахівців із моделювання й ускладнювати залучення зацікавлених сторін;

- метод не може адекватно моделювати події з дуже високою або дуже низькою ймовірністю появи, що обмежує його застосування в процесі аналізу ризику. ∞

Як програмне забезпечення реалізації методу Монте-Карло в процесі створення і реалізації моделі визначення вартості життєвого циклу судна нами пропонується використання системи імітаційного моделювання AnyLogic, яке має

графічне середовище користувача та дає змогу використовувати мову Java для розробки моделей. Крім того, проведення імітаційного моделювання дозволяє визначити очікувану вартість життєвого циклу судна як математичне очікування випадкової величини сумарних витрат. При цьому немає необхідності аналізувати кожен фактор ризику та його вплив на сумарні витрати життєвого циклу окремо. Для вирішення прикладних задач мінімізації витрат на виконання всіх процесів життєвого циклу судна можна як цільову функцію використовувати саме математичне очікування сумарних витрат, а до системи обмежень додати умову максимально допустимого значення середнього квадратичного відхилення або дисперсії.

За результатами імітаційного моделювання було доведено, що величина сумарної вартості життєвого циклу судна Z_{Σ} підпорядковується нормальному закону розподілу з функцією щільності розподілу:

$$f(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{M_L^2}{2\sigma^2}}, \quad (8)$$

де M_L – математичне очікування сумарних витрат;

σ – середньоквадратичне відхилення (рис. 3).

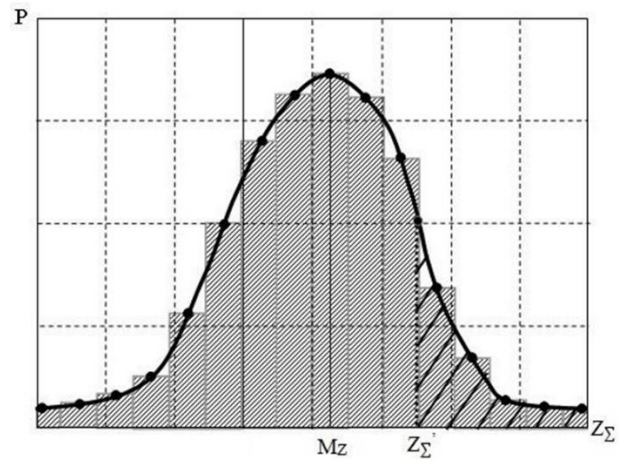


Рисунок 3. Розподіл ймовірності вартості життєвого циклу судна

Якщо планом передбачається отримання сумарної вартості життєвого циклу на рівні Z_{Σ}^* , то ризик недосягнення цілі може бути розрахований за формулою:

$$R = P\left(Z_{\Sigma} \geq Z_{\Sigma}^*\right) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Z_{\Sigma}^*} e^{-\frac{M_L^2}{2\sigma^2}}. \quad (9)$$

Висновки

У роботі запропонована модель визначення вартості життєвого циклу судна з урахуванням аналізу ризиків, що впливають на її складники.

Література

[1] ISO/IEC 15288:2008 Systems and software engineering – System life cycle processes. URL: <http://www.Iso.org>.

[2] Шахов А.В. Проектирование жизненного цикла ремонтпригодных технических систем: Монография. Одесск. национ. морс. ун-т. Одесса: Феникс, 2005. 164 с.

[3] Xianming Cai, Satish, Tyagi. Development of a Product Life-Cycle Cost Estimation Model to Support Engineering Decision-Making in a Multi-Generational Product Development Environment. *Journal of Cost Analysis and Parametrics*. 7(3): November, 2014. P.147-165.
<https://doi.org/10.1080/1941658X.2014.982403>

[4] Longbiao Li. Safety and Risk Assessment of Civil Aircraft during Operatio. (2020). Nanjing University of Aeronautics and Astronautics.

[5] Шахов А.В., Пизинцали Л.В. Модель управления стоимостью жизненного цикла судна. *Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал*. 2014. Вип. 3. С. 9–16.

[6] ISO/IEC 31010:2009. Risk-management. Methods of risk assessment. URL: <http://www.Iso.org>.

[7] Committee to co-ordinate environmental and related programmes, Risk Assessment and Risk Management of Toxic Substances, US Department of Health and Human Services, Washington, DC (1985).

[8] National academy of science, Risk Assessment in the Federal Government: Managing the Process, Committee on the Institutional Means for Assessment of Risk to Public Health, Commission on Life

Sciences, The National Research Council, National Academy Press, Washington, DC (1983).

[9] International atomic energy agency, Manual for the Classification and Prioritization of Risks due to Major Accidents in Process and Related Industries, LAEATECDOC-727, Vienna (1993).

[10] Berkman, H., Jacobsen, B., & Lee, J. B. (2011). Time-varying rare disaster risk and stock returns. *Journal of Financial Economics*, 101(2), 313–332. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1572042>

[11] Калько Е.В., Дыбач А.М., Севбо А.Е., Кудла Е.П. Концепция оперативного вероятностного анализа безопасности. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2012. Вип. 3(55). С. 51–56.

[12] Hiromitsu Kumamoto; Ernest J. Henley. (1996). Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists. Wiley-IEEE Press.

Відомості про авторів

Олександр Шумило, к.т.н., професор, проректор з науково-педагогічної роботи, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна, ORCID ID: 0000-0003-0574-1954.



Ольга Кононова, к.т.н., доцент, доцент кафедри «Машинознавство», Одеський національний морський університет, Одеса, Україна, [ORCID: 0000-0001-6966-7223](https://orcid.org/0000-0001-6966-7223).



МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ МЕТОДИКИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЧНОСТІ АВІОНІКИ НА СТАДІЇ ПРОЕКТУВАННЯ

Тачинін Є.В.¹, Єнчев С.В.²[✉], Тачиніна О.М.²

¹ ДП «Антонов», Україна

² Національний авіаційний університет, Україна

Анотація

Ключові слова: експлуатаційна технологічність, контролепридатність, технічне обслуговування, готовність

Упродовж останніх років спостерігаються значні зміни в розвитку авіаційної техніки та поява нових тенденцій та підходів до її технічної експлуатації. Ці нові тенденції та підходи можна охарактеризувати як перехід у області технічної експлуатації на сучасні інформаційні технології. Обладнання літаків нового покоління базується на використанні обчислювальних компонентів і мережевих технологій. Це дозволяє значно зменшити вагу та розміри обладнання, також підвищити обчислювальні і, як наслідок, функціональні можливості. У бортові системи широко впроваджуються інформаційні технології самоконтролю, які дозволяють значно знизити тривалість пошуку та усунення несправностей та зменшують необхідність у наземних засобах контролю.

Вступ

Створення складних технічних об'єктів, зокрема літака, – це завжди пошук компромісу конструкторських рішень. При цьому одним із факторів, що значно впливають на вибір кращого варіанту конструкції, є зручність експлуатації (на технічному сленгу – експлуатабельність, а в стандартах зустрічається підтримувальність), що безпосередньо впливає на економічність технічної експлуатації. Літак повинен мати оптимальну програму технічного обслуговування та інформативну експлуатаційну документацію, бути технологічним при його обслуговуванні та ремонті, контролепридатним – мати розвинені засоби контролю, мати пристосованість до наявної інфраструктури та засобів обслуговування, вимагати їх мінімальну кількість. Кожна з цих характеристик в той же час також є окремою темою, в якій йдуть свої рішення завдань і конструкторська робота. Вирішенню таких основних завдань присвячено цю роботу.

Актуальність досліджень

Світовий досвід експлуатації літальних апаратів [1] свідчить про те, що підвищення рівня експлуатаційної технологічності (ЕТ) на стадії проектування приводить до скорочення часу пошуку та усунення несправностей; забезпечення доступу до зняття, встановлення та перевірки комплектуючих виробів. Таким чином, вона

впливає на тривалість технічного обслуговування (ТО), але при цьому, не має впливу на частоту виникнення відмов. Тому, задача пов'язана з підвищенням рівня експлуатаційної технологічності, є актуальною науковою задачею.

Ключовим моментом у забезпеченні експлуатаційної технологічності нового літака є прогнозування її показників. Для розрахунку та прогнозування показників експлуатаційної технологічності використовуються існуючі розроблені методики [2], у тому числі методика для раннього прогнозування та детальної оцінки всіх видів обладнання – авіоніки та механічного обладнання на всіх рівнях технічного обслуговування [3]. Ця методика [4] дозволяє проаналізувати експлуатаційну технологічність з урахуванням можливостей діагностики та усунення несправностей, конструкції замінного компоненту (виробу) і інтенсивності відмов. Головні показники ЕТ, які розраховуються за цією методикою наступні: середня тривалість відновлення (MTTR), середні трудомісткості відновлення та роботи по технічному обслуговуванню (MLH/repair та MLH/MA), середня трудомісткість ТО (на годину напруження) (MMH/ON).

Викладення основного матеріалу

Система ТО представляє «Сукупність взаємозалежних засобів, документації технічного обслуговування та ремонту та виконавців, необхідних

для підтримки якості виробів, що входять до цієї системи» – ДСТ 18322-78. ГСТ 54 30044-85 уточнює це визначення – «Система ТО і Р авіаційної техніки (АТ) являє собою сукупність взаємозалежних елементів: об'єкта та засобів ТО та Р, виконавців та викладеного в документації плану ТО та Р, - необхідних для підтримки надійності виробів АТ та готовності їх до польотів.» Тобто, ГСТ 54 30044-85 доповнює цю сукупність об'єктом ТО та конкретизує частину документації – план ТО.

Близький опис дає британський військовий стандарт DefStan 00-40, Part 7 для концепції ТО (Maintenance Concept): «Опис запланованої загальної схеми обслуговування та підтримки виробу у робочому середовищі. Концепція ТО забезпечує практичну основу для проектування, компонування та пакування системи та її випробувального обладнання та встановлює обсяг відповідальності за обслуговування за кожний

рівень обслуговування та ресурсів персоналу (персонал для ТО та рівні його кваліфікації), необхідних для обслуговування системи».

Напряму забезпечення підтримуваності на різних стадіях життєвого циклу виробу присвячено один британський військовий стандарт DefStan 00-60. Він є розвитком американського стандарту Mil-Stan-1388 і є найповнішим документом, який широко описує підтримуваність та логістичну підтримку як дисципліни.

Серія документів Європейської асоціації авіакосмічних та оборонних галузей промисловості ASD: S1000D, S2000M, S3000L, S4000P присвячена цій же проблематиці та конкретизує вимоги та методики для європейських військових авіаційних програм. Ці стандарти та специфікації значно потрібні для контролю витрат підприємствами організаціями в оборонних проектах (рис.1).

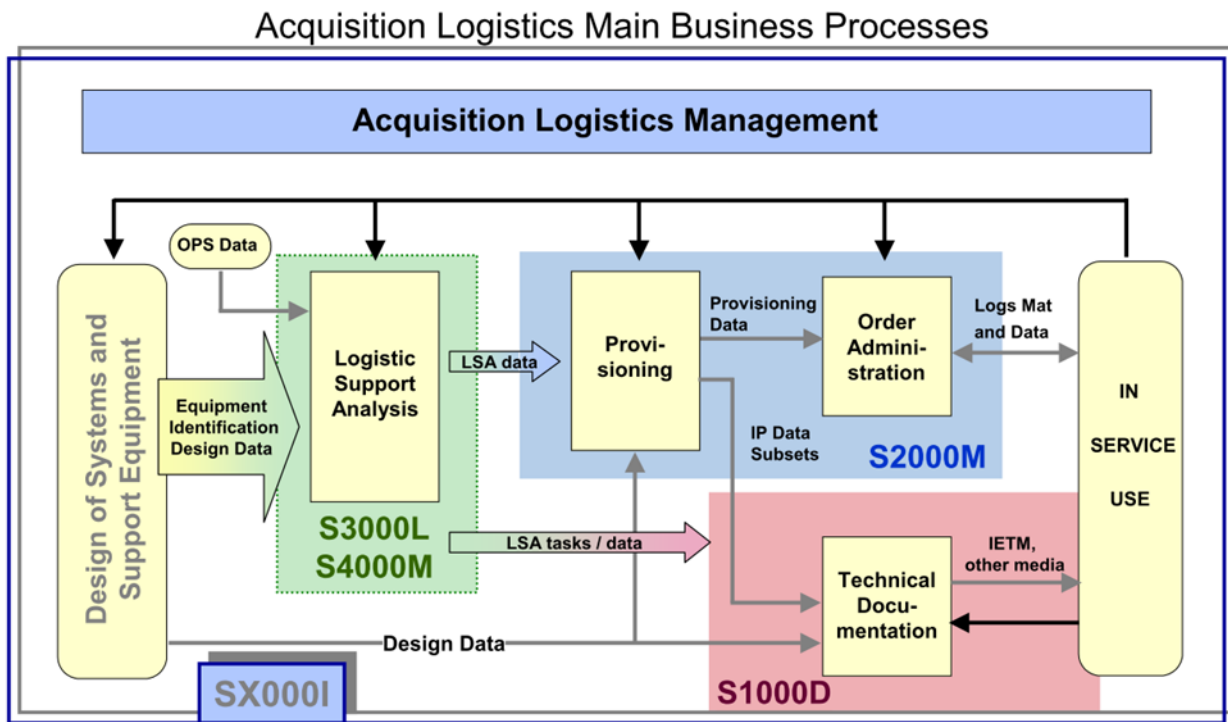


Рисунок 1. Зв'язки етапів проектування, постачання, підтримки процесів експлуатації ASD

Європейська асоціація авіакосмічних та оборонних галузей промисловості (ASD) об'єднує промислові організації Європи, які здійснюють діяльність у галузі авіації, космічних досліджень, оборони та безпеки. Ці організації мають загальний оборот близько 160 мільярдів євро, у яких зайнято близько 700000 чоловік, які працюють у більш ніж 2000 великих компаній та 80000 їх постачальників. В асоціацію входять 28 аналогічних асоціацій у 20 країнах (Австрія, Бельгія, Болгарія, Великобританія, Німеччина, Греція, Данія, Ірландія, Іспанія, Італія, Нідерланди, Норвегія, Польща, Португалія, Туреччина,

Фінляндія, Франція, Чехія, Швеція, Швейцарія).

Метою діяльності ASD є конкурентний розвиток галузі на основі формування та просування у взаємодії з іншими європейськими урядовими та громадськими інститутами загальної позиції, які представляють асоціація організацій галузі.

Одним із важливих напрямів діяльності ASD є випуск стандартів, специфікацій та методичних документів (подібних до розглядуваного), які забезпечать єдиний підхід організацій – учасників ASD до вирішення проблем якості та сертифікації продукції, умов її поставки замовникам,

взаємодії з урядовими органами та іншими міжнародними організаціями при підготовці, прийнятті та вдосконалення державних вимог та міжнародних стандартів у різних галузях регулювання діяльності авіакосмічних та оборонних галузей промисловості, а також методів та процедур контролю відповідності цим вимогам.

Для цивільних (комерційних) проектів є стандарти та дослідження, в частині окремих компонентів, але повною мірою охоплюючих систему таких джерел практично немає. Розробники літаків самостійно виробляють методики та процедури для своїх потреб.

Таким чином, система технічного обслуговування літака є сукупністю складових:

- безпосередньо літака з його пристосованістю до виконання ТО;
- експлуатаційної документації (ЕД), що встановлює плани, методи та технологію виконання робіт з ТО;
- засобів, які необхідні виконання робіт з ТО;
- виконавців, які виконують роботи з ТО, та призначених для підтримки в очікуваних умовах експлуатації заданих показників справності та готовності літака протягом життєвого циклу за мінімальної вартості ТО.

Система ТО літаків визначає ефективність їх використання та відповідно експлуатаційні витрати. Експлуатаційні витрати за весь життєвий цикл у 2-3 рази перевищують вартість літака, що підтверджує актуальність розв'язання задач підвищення ефективності системи ТО. Процес створення літака включає завдання проектування системи ТО із заданими економічними показниками. Для виконання завдання створення ефективної системи ТО при проектуванні транспортних літаків потрібно розробити, як мінімум:

- вимоги щодо ЕТ та виконати прогнозування показників ЕТ;
- вимоги до планового ТО (створити план ТО);
- бортову частину системи ТО;
- наземну частину системи ТО (уніфіковані засоби ТО);
- інтерактивну ЕД;
- та комплексно впровадити дані елементи системи ТО. При цьому ці елементи мають бути економічно ефективними не лише окремо, а й давати максимальний ефект разом.

Враховуючи деяку суперечливість у зміні важливих характеристик, наприклад:

- збільшення резервування систем призводить до зростання вартості літака та експлуатаційних

витрат за рахунок збільшення витрат на запасні частини;

- зниження періодичності ТО призводить до зростання витрат на оплату праці, а збільшення – до збільшення потоку відмов;
- зниження витрат у бортову частину системи ТО призводить до зростання тривалості простоїв літака або зростання вимог до наземних засобів контролю;
- зниження витрат в інтерактивну ЕД призводить також до зростання тривалості простоїв літака,
- має бути знайдено потрібний баланс вищенаведених якостей ще на стадії проектування, у визначенні термінів та з урахуванням оптимального рівня витрат на проектування.

Контролепридатність (КП) є підзавданням експлуатаційної технологічності і визначається як характеристика проекту, що дозволяє визначити стан об'єкта (компонента) і несправності, які будуть ефективно знайдені та усунуті по прийнятній вартості. Діагностика складається з ручних, автоматичних і напівавтоматичних апаратних засобів технічного обслуговування, програмного забезпечення та процедур по визначенню стану, виявленню та усуненню несправностей.

Необхідні апаратні засоби, програмне забезпечення та процедури будуть залежати значною мірою від ЕТ (тобто характеристики контролепридатності). Діагностика є всього одним аспектом ТО. Всі процедури ТО визначаються значною мірою конструкцією. Проект із високої ЕТ потребує найменшої кількості засобів ТО та простих процедур ТО [2].

На рівні компонента, контролепридатність – це його властивість, яка дозволяє швидко підтвердити його функціональну цілісність. З економічної точки зору ефективна контролепридатність дозволяє зменшити:

- тривалість простоїв літака;
- кількість помилкових зняття справного компонента;
- вартість перевірок у лабораторії та вартість ремонту.

Часто контролепридатність оцінюється за допомогою показника NFF (No Fault Found – дослівно «несправності не знайдене» або кількість небезпечних знятих компонентів.

Поняття NFF пояснюється прикладом: після прояву відмови, у результаті пошуку несправності визначається передбачуваний компонент, що відмовив. Даний компонент знімається з літака та відправляється для перевірки в лабораторію. Якщо в процесі проходження перевірки несправність не підтверджується, то компонент вертається в експлуатацію. У цьому випадку дане

знімання належить до категорії NFF. Як показують статистичні дані [3], блоки авіоніки, що прибули для ремонту, лише в 14,3 % мали підтвержені відмови, стільки ж перемерзовані, а 71,4% випадків були пов'язані з помилковою сигналізацією.

Висновки

У роботі обґрунтовано методологічні засади щодо створення методики, що дозволяє на ранніх етапах проектування транспортних літаків знайти оптимальне поєднання вирішення завдань підтримуваності (забезпечення ЕТ, контролепридатності, інтерактивної експлуатаційної документації, уніфікованими засобами ТО), з урахуванням впливу кожної з них на загальний результат, витрат на їх реалізацію під час проектування та скорочення можливості зміни конструкції з перебігом проектування. У межах роботи необхідно запропонувати в подальшому розрахунок вагових коефіцієнтів для розглянутих завдань.

Література

[1] MIL-HDBK-470A. Designing and Developing Maintainable Products and Systems. 1997. 719 с.

[2] Benjamin S. Blanchard. Logistics Engineering And Management. Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998. 526 p.

[3] Louis Y. Ungar. Causes and Costs of No Fault Found Events. Advanced Test Engineering (A.T.E.) Solutions, Inc. El Segundo, CA, IPC APEX EXPO 2015. 36 p.

[4] K. Bain and David G. Orwig. F/A-18E/F Built-in-test (BIT) Maturation Process. Proceedings of NDIA Third Annual Systems Engineering & Supportability Conference, August 2000, P.419-429.

[5] K. Westervelt. Applying the Quality Function Deployment on the V-22 Osprey. IEEE Aerospace Conference, 2010. P. 212.

[6] Kinseng K, Holt M, Precht M. Physics of failure assessment of a cruise control module, Microelectronics Reliability 39. 1999. P.1423-1444.

[7] ASD S1000D International specification for technical publications using a common source database. AeroSpace and Defense Industries Association of Europe, Aerospace Industries Association of America, ATA e-Business Program, 2019. 3503 p.

[8] Gerald J. Belcher, Randy P. Neisler. Cost Benefit Assessment of Interactive Electronic Technical Manuals in Navy Training and Education. Logistics Management Institute Corporate Ridge Mclean, Virginia, 2000. 53 p.

[9] Esker E.A., Martin J., Simpson W.R., Shepard J.W, Integrating Design for Testability and Automatic Testing Approaches, IEEE Systems Readiness Technology Conference. Maryland. USA. 1990. P.509 – 514.

Відомості про авторів

Сьвгеній Тачинін, начальник відділу, ДП «Антонов», Київ, Україна, [ORCID ID: 0009-0002-5347-6371](https://orcid.org/0009-0002-5347-6371).



Сергій Єнчев, д.т.н., професор, професор кафедри автоматизації та енергоменеджменту, Національний авіаційний університет, Київ, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-6994-9378](https://orcid.org/0000-0001-6994-9378).



Олена Тачиніна, д.т.н., професор, професор кафедри комп'ютеризованих систем управління, Національний авіаційний університет, Київ, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-7081-0576](https://orcid.org/0000-0001-7081-0576).



ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ УПОРСКУВАННЯ ЦИЛІНДРОВОГО МАСТИЛА СУДНОВИХ ДВИГУНІВ

Бігун С.В.¹, Сіманенков А.Л.¹, Лебеденко Ю.О.^{2✉}

¹ Херсонська державна морська академія, Україна

² Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

Анотація

Ключові слова: система змащення, оптимізація, лубрикатор, головний двигун, система керування, експлуатація

Матеріали дослідження ставлять перед собою мету вирішення завдання оптимального управління процесом змащення судових головних двигунів. Задача керування спрямована на досягнення декількох важливих цілей, таких як підвищення ресурсу головного двигуна, забезпечення безпечної експлуатації, підвищення надійності та мінімізація витрат праці на обслуговування. Також однією з ключових задач є підвищення ефективності функціонування системи змащення головного двигуна шляхом точного дозування циліндрового мастила.

Вступ

Одним із ключових аспектів, що визначає ефективність та довговічність дизельних двигунів, є система змащення [1]. Вона мінімізує сили тертя, сприяє відведенню тепла і здійснює очищення поверхонь від продуктів зносу, нагару та інших частинок [2]. Належне змащення не лише гарантує бездоганну та надійну роботу дизельного двигуна, але й сприяє зниженню експлуатаційних витрат, а також витрат на обслуговування та ремонт. У цьому контексті оптимізація системи змащення стає критично важливим аспектом для досягнення максимальної продуктивності та ефективності в різних умовах експлуатації.

Актуальність досліджень

Для поліпшення ефективності системи змащення основного двигуна та забезпечення його надійності та оптимального змащення в різних умовах експлуатації, важливо впроваджувати сучасні засоби мікропроцесорної техніки, які мають можливість оперативної взаємодії з системою дистанційного управління та загальносудновою обчислювальною мережею. Розробка високоефективних алгоритмів для таких систем передбачає проведення численних експериментів для збору необхідної статистики та використання імітаційних моделей [3].

Викладення основного матеріалу

В теперішній час найбільш оптимальним методом для забезпечення безпечної, ефективної та екологічно відповідної експлуатації циліндропоршневих груп дизелів з низькою обертовою частотою вважається контроль показників використаного циліндрового мастила. Враховуючи різні типи циліндрових оливок та різний вміст сірки у паливі, а також особливості конструкції систем змащення, важливо регулювати дозування з урахуванням характеристик палива, щоб уникнути неоднозначності при виборі оптимального рівня споживання циліндрового мастила.

Отже, система змащення головного двигуна представляє собою складний об'єкт, для якого необхідно здійснювати контроль за багатьма параметрами в реальному часі, такими як температура мастила, тиск у лубрикаторах та в'язкість мастила. Загалом, математичну модель системи змащення можна виразити у вигляді системи рівнянь у просторі станів.

$$\begin{cases} \dot{x} = F_1(x, u) \\ y = F_2(x, u) \end{cases} \quad (1)$$

де x – вектор стану,
 u – вектор входу,
 y – вектор керування.

Для забезпечення потрібних якісних характеристик у процесі змащення важливо оптимізувати керування форсунками, які відповідають за

упорскування мастила. Оскільки створення системи упорскування, що б забезпечувала ідеальні параметри при впливі різних факторів, є неможливим, необхідно вирішити задачу оптимізації з мінімізацією відхилень від заданої траєкторії руху системи керування. Комплексне вирішення цих задач дозволить зменшити вплив різноманітних факторів при забезпеченні необхідних параметрів у процесі змащення. У завданні оптимального керування системою змащення можна використовувати функціонал якості, який визначає середньоквадратичне відхилення від заданого профілю змащення. Для системи керування процесом змащення:

$$J = \int (y - y_0)^2 dt, \quad (2)$$

де y - кількість поданого мастила,
 y_0 - задане значення.

Виходячи з цих міркувань, задачу оптимального керування процесом упорскування циліндрового мастила можна сформулювати наступним чином: знайти керування, що доставляє мінімум функціоналу (2) при обмеженнях за змінними стану:

$$x < x_{max}. \quad (3)$$

Таким чином, оптимізація функціоналу мети (2) при обмеженнях (3) є задачею слідкування, що зводиться до пошуку керування, при якому забезпечується мінімум відхилень вихідної величини від завдання та виконуються умови щодо обмежень на змінні стану.

Висновки

Для підвищення ефективності системи змащення головного двигуна необхідне впровадження передових технологій мікропроцесорної техніки, що здатні забезпечити оперативний зв'язок із системою дистанційного управління головним двигуном та загальносудновою обчислювальною мережею. Подальше удосконалення процесу обчислення моментів впорскування стає можливим завдяки застосуванню нечітких алгоритмів керування форсунками системи змащення. Це спрямовано на покращення точності та ефективності в управлінні процесом змащення головного двигуна, що в свою чергу може призвести до оптимізації його функціонування.

Література

[1] Doug Woodyard. Introduction: A Century of Diesel Progress. In: Doug Woodyard (ed.)

Pounder's Marine. Diesel Engines and Gas Turbines. 9th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2009; pp.ix+xxvii.

[2] Сіманенков А.Л. Підходи до побудови систем керування процесами упорскування циліндрового мастила суднових двигунів / А.Л. Сіманенков, С.В. Бігун, Ю.О. Лебеденко // Матеріали 14-та Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування», 16-18 березня 2023 р., м. Одеса, Україна, С. 369-371

[3] Бігун С.В. Імітаційна модель системи керування процесом упорскування циліндрового мастила суднових двигунів / С.В. Бігун, А.Л. Сіманенков, Ю.О. Лебеденко // Прикладні питання математичного моделювання, 2022, №5 (2), С. 9-18.

<https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2022-5-2-1>

[4] Tadros, M., Ventura, M. & Guedes Soares, C. Optimization of the Performance of Marine Diesel Engines to Minimize the Formation of SOx Emissions. J. Marine. Sci. Appl. 19, 473–484 (2020). DOI: 10.1007/s11804-020-00156-0

Відомості про авторів

Сергій Бігун, аспірант кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматизації, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0009-0007-6385-3296](https://orcid.org/0009-0007-6385-3296).



Андрій Сіманенков, к.т.н., старший викладач кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматизації, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0003-0797-5276](https://orcid.org/0000-0003-0797-5276).



Юрій Лебеденко, к.т.н., доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних технологій, Київський національний університет технологій та дизайн, Київ, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-1352-9240](https://orcid.org/0000-0002-1352-9240).



ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ ЯКОСТІ БАЛАСТНИХ ВОД

Булгаков М.П.[✉], Кучеренко В.Ю., Волошин Д.О.

Одеський національний морський університет, Україна

Анотація

Ключові слова: баластні води, інвазійні види, моніторинг, очищення, сенсорні технології, біологічні методи очищення

Метою дослідження було вивчення нових технологій моніторингу якості баластних вод. Основні результати дослідження полягають у наступному: розроблено нову схему моніторингу якості баластних вод, що поєднує монітор стану баластних вод та проточну цитометрія, досліджено можливість використання проточного цитофлуориметра на борту судна. Запропоновано новий підхід до моніторингу баластних вод, який дозволяє отримати більш точну та детальну інформацію про їх склад. Впровадження нових технологій моніторингу баластних вод дозволить підвищити точність та ефективність контролю за роботою систем управління баластними водами, дозволить зменшити ризик забруднення водних середовищ. Нові технології моніторингу баластних вод є перспективним напрямком, який потребує подальшого розвитку та впровадження.

Вступ

Забезпечення екологічної безпеки морських екосистем є однією з найактуальніших проблем сьогодення. Одним з ключових факторів, що негативно впливають на морське середовище, є забруднення, спричинене скиданням баластних вод з суден. Ці води, які використовуються для забезпечення стійкості судна, можуть містити різноманітні шкідливі організми, такі як бактерії, водорості, мікроскопічні тварини. Потрапляючи в нове середовище, ці організми можуть витіснити місцеві види і порушити екологічну рівновагу, що може призвести до значних економічних та екологічних збитків.

Традиційні методи моніторингу баластних вод часто є трудомісткими, дорогими та не завжди точними. Їх практичне застосування може бути ускладнене необхідністю відбору проб, транспортування до лабораторії та проведення лабораторних досліджень.

У цій роботі досліджуються нові технології моніторингу якості баластних вод, такі як монітор баластних вод (BW-монітор) та проточна цитометрія. Ці технології пропонують більш точний та ефективний контроль за роботою систем управління баластними водами (СУБВ) та дозволяють отримувати дані в режимі реального часу, знизити ризик забруднення водних середовищ та зберегти екосистеми та економіку.

Актуальність досліджень

Моніторинг якості роботи системи управління баластними водами (СУБВ) зазвичай

проводиться тільки в інститутах під час тестування будь-яких систем-кандидатів. Відбір проб є звичайним методом моніторингу, а новітні технології відбору проб скорочують час, необхідний для проведення якісного аналізу. Зразки на судах, що прибувають, відбираються якраз під час досліджень, щоб з'ясувати потенційну небезпеку для води, що досліджується.

Досвід відбору проб якості вантажу на різних продуктових танкерах і танкерах-хімовозах свідчить про проблеми, пов'язані з якістю рідин. Існує багато судових процесів, які доводять провину власників судноплавних компаній або постачальників вантажу в портах навантаження, коли якість наливного вантажу була визнана неналежною.

Час, необхідний для якісного аналізу наливних вантажів у лабораторії, становить від 3 до 7 годин, іноді, навіть, більше.

Що стосується моніторингу якості СУБВ, очікується, що час, необхідний для якісного аналізу зразків баластної води в будь-якій лабораторії, буде однаковим. Все це - втрати часу, яких можна було б уникнути завдяки використанню нової технології.

Всі постачальники і продавці нових моделей СУБВ заявляють, що їхні моделі стійкі до морської солоні води і до умов сильного хвилювання на морі. Але немає жодних доказів цієї стійкості протягом 10 або 20 років. Інший досвід показує, що всі судові трубопроводи і системи ходових механізмів пошкоджуються під впливом моря і умов експлуатації судна протягом багатьох років. Це також є причиною необхідності

моніторингу, окрім інших причин, пов'язаних з якістю обробки.

Викладення основного матеріалу

Система очищення баластних вод, як правило, включає блок для видалення великих (органічних) частинок і блок дезінфекції залишків. Найчастіше це фільтр з розміром комірок 20...50 мк, а два основних типи дезінфекційних установок використовують ультрафіолетове опромінення або виробляють реактивний хлор. Для перевірки роботи СУБВ була запропонована наступна схема перевірки якості баластних вод, яка зветься «BW-монітор» (рис. 1). Вона складається з двох датчиків: один для моніторингу частинок і, отже, ефективності роботи фільтра, а другий - для вимірювання флуоресценції хлорофілу, тобто індикатора життєздатних водоростей і ефективності процесу дезінфекції. BW-монітор працює без додавання хімічних речовин або маніпуляцій з відібраними зразками в баластній лінії (in-line) і надає оператору або майстру миттєвий (своєчасний) аналіз і результати. Він може вимірювати і повідомляти про продуктивність попередньої обробки і ефективність дезінфекційної

установки вчасно для повторного запуску, ремонту або повторної обробки. У разі несправності він миттєво подає сигнал тривоги і може миттєво попередити оператора. Датчики BW-монітора розташовані в двох положеннях: до і після блоків попередньої обробки та дезінфекції.

BW-монітор відображає і зберігає дані на борту, дозволяючи капітану судна або судновласнику використовувати їх для оцінки ефективності СУБВ. Коли даних стане багато, це дасть змогу розвивати потенціал прогнозного технічного обслуговування, що також представляє великий інтерес для виробника СУБВ. Очевидно, що державний портовий контроль, який повинен перевіряти відповідність системи управління водними ресурсами, може використовувати ці дані, щоб переконатися, що не відбувається грубого перевищення критеріїв життєздатності. Хмарний центр обробки даних також пропонується як опція, що забезпечує як механізм резервного копіювання, так і комбінований аналіз продуктивності СУБВ з плином часу, аналіз продуктивності декількох ідентичних систем або різних систем за схожих умов.

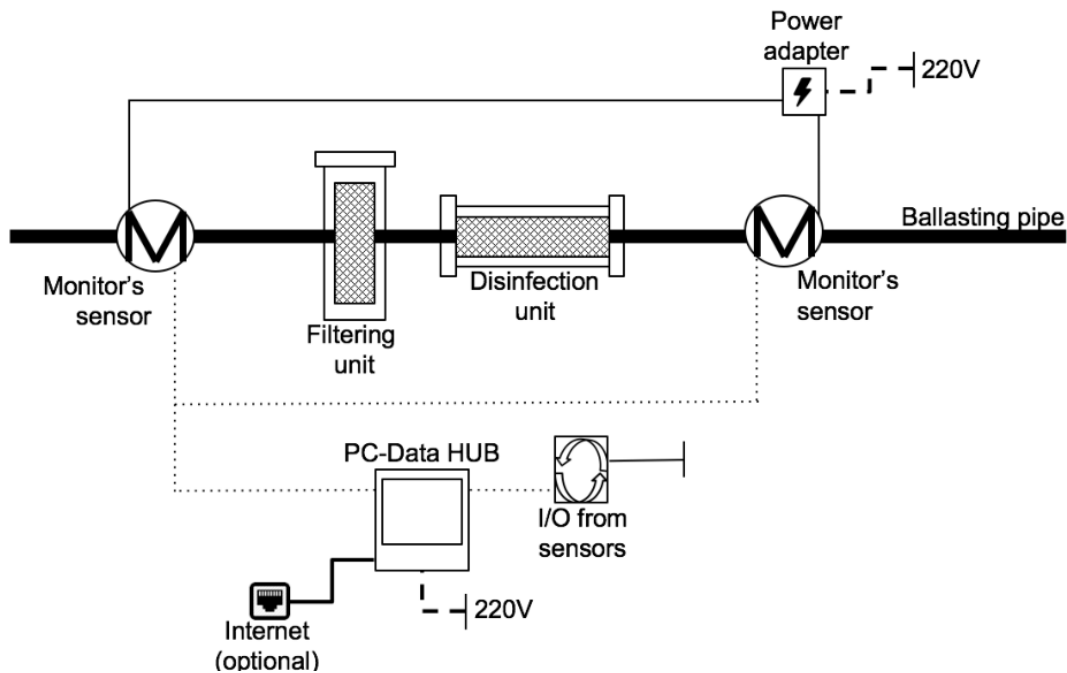


Рисунок 1. Схема встановлення системи BW-моніторингу

Проточна цитофлуориметрія – це метод визначення та кількісної оцінки клітинних властивостей, органел або структурних компонентів клітини переважно оптичними та електронними засобами. Хоча вона вимірює одну клітину за раз, найновіше обладнання здатне обробляти до декількох сотень тисяч клітин за кілька секунд. Проточна цитометрія може бути використана для підрахунку і навіть розрізнення клітин різних типів у суміші шляхом кількісної оцінки

їхніх структурних особливостей. Таким чином, проточна цитометрія має великі переваги порівняно з традиційною мікроскопією, оскільки дозволяє аналізувати більшу кількість клітин за частку часу.

Принцип проточної цитометрії полягає в тому, що клітини одна за одною проходять через лазерний промінь з високою швидкістю, і їхні індивідуальні властивості розсіювання світла та флуоресценції реєструються для формування

оптичного відбитка кожної клітини. Це відрізняє метод проточної цитометрії від об'ємних методів для спектрів флуоресценції та/або спектрів розмірів для об'ємних об'ємів води, де набагато важче розрізнити внесок різних груп у воді, оскільки показники збираються для всіх частинок одночасно. Проточна цитометрія дозволяє легко розпізнавати різні групи в зразку і кількісно оцінювати їх чисельність, а також їх оптичні властивості (розмір, пігмент) - навіть виявляти кілька рідкісних клітин серед великої кількості клітин квітучого виду. Промінь світла лазера однієї довжини хвилі спрямовується на потік рідини. В точку проходження потоку через промінь світла направляється ряд детекторів: один на одній лінії з променем світла (канал прямого розсіювання) і кілька перпендикулярно до нього (канал бічного розсіювання) і один або кілька детекторів. Кожна зважена частинка розміром від 0,2 до 150 мікрометрів, проходячи через промінь, розсіює промінь, і флуоресцентні хімічні речовини, що містяться в частинці або прикріплені до неї, можуть збуджуватися і випромінювати світло з більшою довжиною хвилі, ніж джерело світла. Ця комбінація світла уловлюється

детекторами, і, аналізуючи флуктуації яскравості на кожному детекторі, можна отримати різні типи інформації про фізичну і хімічну структуру кожної окремої частинки.

Проточна цитометрія - це технологія, яка забезпечує електронне виявлення і відбір проб баластної води, з подальшим збором даних, фільтрацією через впорядкований фільтр і передачею. Ця технологія добре розвинена сьогодні. Вона використовується в клінічній медицині, біохімії та при відборі проб прісної води в озерах, водосховищах і природних джерелах.

Проаналізовані застосування передбачають можливість використання проточного цитофлуориметра на борту судна. Такий складний прилад, як проточний цитофлуориметр, може бути встановлений на трубопроводі баластної води в місці, доступному для виявлення всіх цистерн з баластною водою на борту судна. Найкраще місце розташування - в машинному відділенні біля рециркуляційного трубопроводу баластних насосів [1]. На рис. 2 показано можливе розташування.

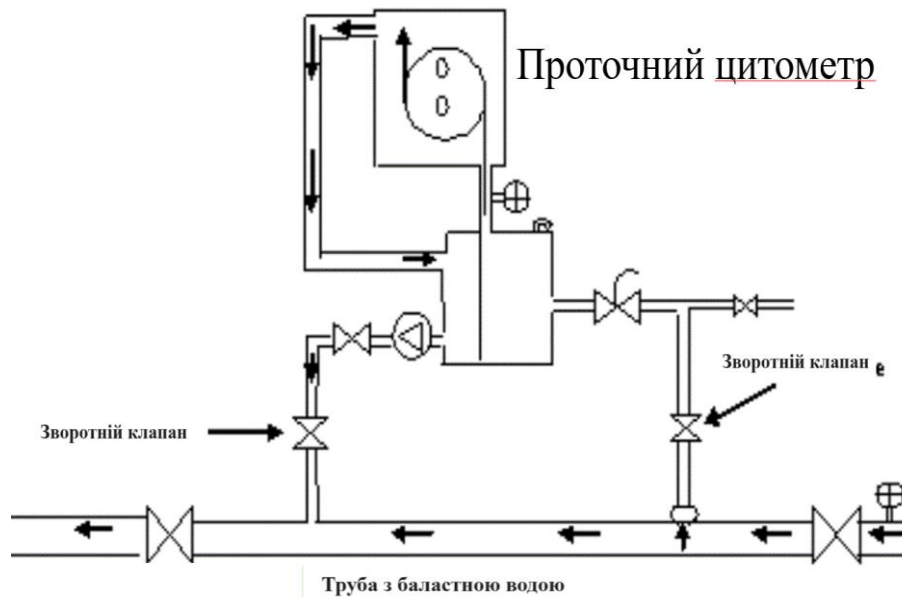


Рисунок 2. Схема детектування проточним цитометром системи баластних вод

Висновки

Моніторинг якості баластних вод є ключовим етапом в боротьбі з екологічним забрудненням у морських екосистемах. Традиційні методи моніторингу часто є трудомісткими, дорогими та не завжди точними, що обмежує їх ефективність. Водночас, нові технології, такі як BW-монітор та проточна цитометрія, пропонують більш точний та ефективний моніторинг. Їх впровадження дозволить судновласникам та операторам оцінити ефективність роботи систем управління баластними водами, виконувати прогнозне технічне

обслуговування та дотримуватися нормативних вимог.

Переваги нових технологій полягають у більш точному та ефективному моніторингу, можливості виявлення проблем на ранній стадії та зниженні ризику забруднення водних середовищ. Впровадження цих технологій сприятиме збереженню екосистем та економіки.

Для успішної реалізації нових технологій рекомендується їх впровадження, розробка стандартів та методик для їх використання, а також підготовка кадрів для роботи з новим обладнанням.

Впровадження нових технологій моніторингу баластних вод є важливим кроком у боротьбі з екологічним забрудненням водних середовищ та забезпеченням їх екологічної стабільності.

Література

[1]. Hurley, W., Schilling, S.S, and Mackey, T. Contract Designs for Ballast Water Treatment Systems on Container Ship / Marine Environmental Engineering Technology Symposium (MEETS). Arlington, VA. June 1, 2001.

[2]. Costello, C., J. M. Drake, і D. M. Lodge. 2007. Evaluating an invasive species policy: ballast water exchange в The Great Lakes. / Ecological Applications 17:655–662 с.

[3]. Голуб'ятників Н. І. Захист водойм від забруднення при судноплаванні / Н. І. Голуб'ятників / Одеса: Фенікс, 2009. – 430 с.

Відомості про авторів

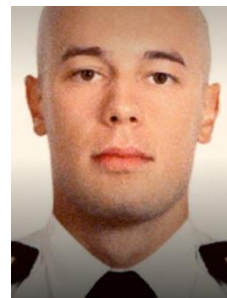
Микола Булгаков, к.т.н., доцент, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-7172-8678](#)



Володимир Кучеренко, аспірант, кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна, [ORCID ID: 0009-0008-4906-9726](#)



Дмитро Волошин, аспірант, кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна, [ORCID ID: 0009-0008-4922-9576](#).



СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТА ОБЛІКУ ПАЛИВНО-МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ПІДПРИЄМСТВАХ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

Кривошапов С.І.[✉], Назаров О.І.[✉]

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Анотація

Ключові слова: автомобільний транспорт, витрата палива, моніторинг, нормування, економічна ефективність, програмне забезпечення.

Проаналізовано існуючу систему нормування витрати палива на автомобільному транспорті. Розглянуто існуючі методи вимірювання витрати палива. Запропоновано програмно-апаратний комплекс для вимірювання витрати палива безпосередньо на транспортному засобі. Побудована системи реєстрації та обробки первинної інформації. Складена схема потоків даних та модулів що реалізує ці протоколи. Розроблено канали передачі діагностичної інформації на комп'ютер для взаємодії з користувачем. Розроблена структура зберігання результатів вимірювань у системі бази даних. Розроблено схему модулів комп'ютерного програмного забезпечення щодо обробки первинної документації з роботи транспортного засобу. Розроблено висновки та рекомендації, вказані основні шляхи подальших досліджень.

Вступ

Транспорт є основним споживачем палива нафтового походження. Доцільно періодично контролювати витрату на транспортному засобі. За витратою палива можна оцінити ефективність використання транспортного засобу.

Довгострокове або оперативне планування діяльності підприємств транспорту передбачає необхідність отримання нормативних та фактичних значень витрати палива.

Перспективно використовувати інформаційні та комп'ютерні технології, які дозволять автоматизувати процес отримання, нормування, зберігання та обробку даних з витрати палива для кожного транспортного засобу.

Актуальність досліджень

На автомобільному транспорті деякій час діяли норми витрати палива згідно наказу Міністерства інфраструктури України [1], але зараз цей наказ втратив свою чинність.

Сьогодні основні положення з нормування витрати палива наведені у методичних рекомендаціях [2]. Тут наведені нормативні значення витрати палива для різних транспортних засобів та методика корегування витрати у залежності від умов експлуатації. Недоліком методики є низькій взаємозв'язок між нормою витрати палива та конструктивними і експлуатаційними характеристиками транспортного засобу.

В методиці [3] запропоновано визначати нормативне значення витрати палива за розрахунковою математичною моделлю Ця методика більш якісно враховує як конструктивні особливості транспортного засобу, так режими його навантаження, з урахуванням дорожніх та транспортних умов експлуатації.

Методики [1-3] тією чи іншою мірою лише наближаються до фактичного споживання палива, яке можливо отримати тільки безпосередньо на транспортному засобі.

Викладення основного матеріалу

Мета дослідження є вирішення науково-прикладної задачі з автоматизації обліку витрати палива для транспортних підприємств шляхом вдосконалення оперативного контролю витрати палива безпосередньо на транспортному засобі.

Фактичне значення витрати палива на транспортному засобі можливо отримати наступним чином:

- за даними електронного блоку керування двигуна;
- за розрахунком тривалості вприскування палива форсункою;
- за зміною рівня палива в баку;
- за визначенням витрати палива у паливної магістралі;
- тощо.

Реальне значення витрати палива можливо отримати шляхом визначення кількості палива в системі, оскільки інформація з блоку керування дає тільки бажану витрату палива.

Витратоміри палива можуть вимірювати об'ємну або масову витрату палива. Зв'язок між цими витратами є щільність палива, яка залежить від температури та фракційного складу вуглеводнів у паливі.

Поширені такі методи вимірювання витрати:

- об'ємний - заснований на пропущенні певного обсягу палива (шестерні, лопатеві, поршневі та ін);
- постійного (поршневі, роторні) чи змінного (трубка Вентурі, соплові, діафрагмові) перепаду тиску;
- швидкісні – що вимірюють швидкість обертання крильчатки в потоці рідини;
- теплові – які вимірюють енергію розсіювання тепла в потоці рідини;
- ультразвукові – що вимірюють швидкість звуку в потоці рідини;
- електромагнітні – які вимірюють електропровідність рідини в магнітному полі;

- вихрові – що вимірюють частоту завихрень
- та ін.

В роботі [4] наведено схема вимірювання витрати палива об'ємним витратоміром поршневого тип. Частота перемикаць циклів руху поршня буде пропорційна витраті палива на магістралі.

Цей витратомір має хорошу точність вимірювання, особливо на невеликих та середніх швидкостях потоку [5].

Такий витратомір здатен вимірювати витрату палива як в одному напрямку, так і підключатися в двонаправлену магістраль, вимірюючи різницю витрат палива (диференційна схема підключення). Це дозволяє використовувати його для різних схем паливоподачі.

Мікроконтролер, керуючий роботою витратоміра, може видавати дані на екран, записувати у файл на карту Мікро-SD, передавати на зовнішній комп'ютер через USB-роз'єм, взаємодіяти з CAN-шиною.

Схема взаємодії витратоміра палива з зовнішніми елементами автомобіля зображена на рисунку 1.

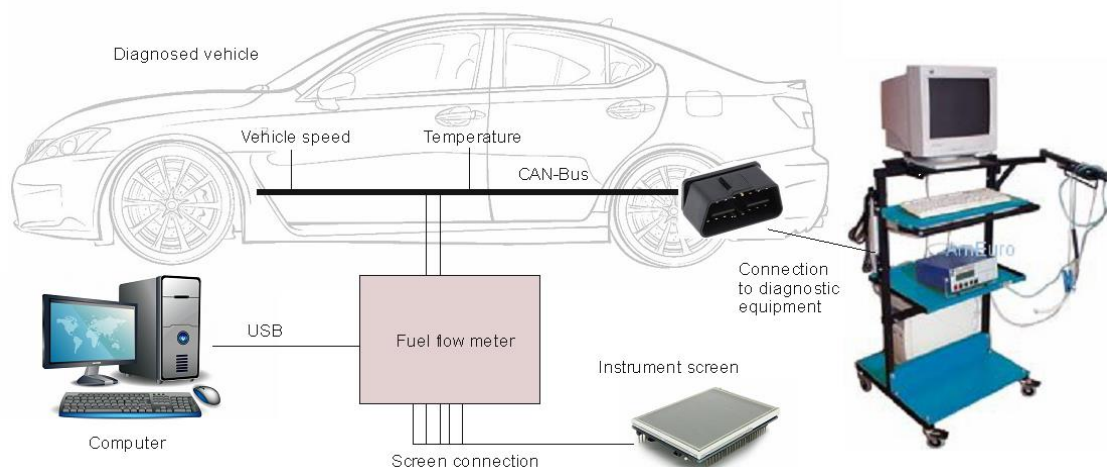


Рисунок 1. Система збору первинної інформації про витрату палива на автомобілі

Можливо реалізувати інші способи передачі даних від витратоміра палива на стаціонарну комп'ютерну систему: Wi-Fi, Bluetooth, LAN, GPRS та інші. Для цього необхідно до макетної плати мікроконтролера приєднати модулі, які реалізують відповідні протоколи передачі даних.

Приклади використання адаптерів для деяких протоколів:

- Wi-Fi – модуль ESP8266 на базі мікросхеми ESP8266EX;
- Bluetooth – модуль SPP-C JDY-31 на базі чіпа BK3231S;

- LAN – модуль W5500 Ethernet Shield;
- GSM - модуль SIMCom SIM800L.

Додаткову інформацію о швидкості руху транспортного засобу можливо отримати з CAN-шини або системи глобального позиціонування GPS. Взаємодія мікроконтролера витратоміра палива з системою GPS реалізована через використання модуля NEO-6M, а з CAN-шиною - модуль на основі CAN-контролера MCP2515 та трансівера TJA1050 для реалізації протоколу CAN за інтерфейсом SPI.

Данні витрати палива від витратоміра передаються на зовнішню комп'ютерну систему або

зберігається у хмарному середовищі для подальшого використання та обробки даних.

Для зберігання даних можна використовувати будь-яку стандартну систему управління базами даних (СУБД): Oracle Database, IBM DB2, Microsoft SQL Server, MySQL, PostgreSQL, InterBase та інших.

У розробленій системі моніторингу витрати палива використовувалася Firebird (FirebirdSQL) - вільна кросплатформова реляційна система управління базами даних (аналог InterBase).

Структура та взаємодія модулів (таблиць) бази даних наведено на рисунку 2.



Рисунок 2. Структура бази та схема взаємодії даних для обробки шляхових листів

В цій базі додатково зберігаються данні маршрутів руху, які отримані за допомогою системи глобального позиціонування GPS. Також тут розмішені довідникові данні з технічних характеристик автомобіля, за якими буде потім розраховані значення теоретичної витрати палива за методикою [3].

На автомобільному транспорті фактична витрата палива враховується у первинній документації перевізного процесу. Крім цього, там вказується пройдена відстань, час роботи, кількість перевезеного вантажу, використання причпного складу та інші данні. У дорожній

документації також розраховується нормативне значення витрати палива, яка може бути отримана за методиками [1-3].

Схема модулів програмного забезпечення, що реалізує облік та обробку первинної документації, наведено на рисунку 3.

Зміна витрат пального залежить від умов експлуатації транспортного засобу. Тому дані про фактичну витрату палива можуть бути використані для коригування періодичності технічного обслуговування та ресурсу транспортного засобу залежно від умов його роботи [5].

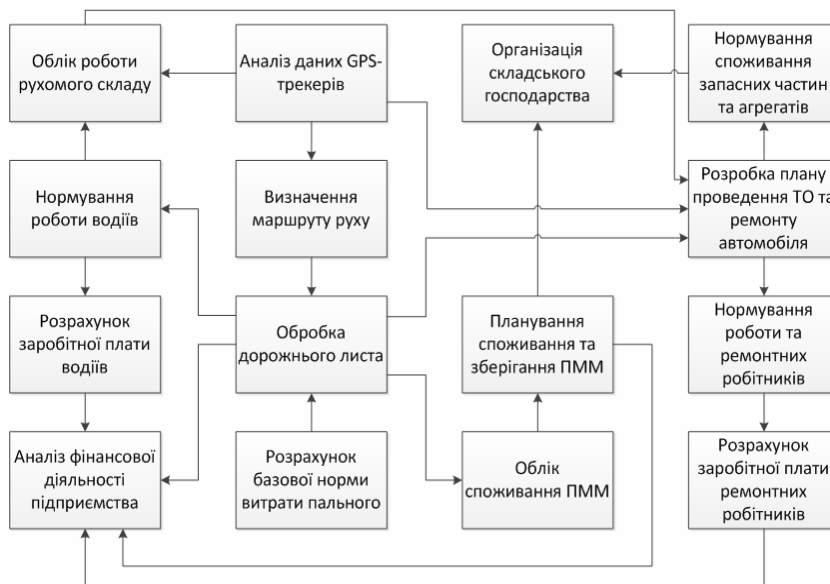


Рисунок 3. Схема інформаційних потоків з нормування витрати палива

Зміна витрат палива залежить від стану транспортного засобу. Якщо дані фактичної витрати пального суттєво відрізняються від теоретичного чи нормативного значення, то це вказує на порушення працездатності транспортного засобу. В цьому випадку необхідно виконати поглиблене діагностування систем, а за результатами – прийняти рішення з обсягами поточного ремонту транспортного засобу.

Зміна витрати пального впливатиме на ресурс шин, трудомісткість ремонту та обслуговування транспортних засобів, необхідних запасів на складах та інші показники діяльності підприємства.

Висновки

Наведена методологія дозволяє визначати дійсне споживання палива під час експлуатації транспортних засобів.

Порівнюючи витрати палива, які отримані на транспортному засобі, з нормативними або розрахунковими значеннями, дозволяє на ранніх стадіях виявити порушення працездатності паливної апаратури.

Побудова та втілення системи моніторингу з витрати палива може скоротити трудомісткість та підвищити оперативність планування матеріальних ресурсів на транспорті.

Апаратні та програмне забезпечення може бути адаптовано для інших видів транспорту: морського, річного або залізничного.

Зменшення витрати палива впливає на екологічну безпеку, знижуючи вміст шкідливих речовин у відпрацьованих газах, як наслідок скорочує інтенсивність забруднення навколишнього середовища та негативний вплив від експлуатації транспортного засобу.

Література

[1]. Норми витрат палива і мастильних матеріалів на автомобільному транспорті / Затв. наказом Міністерства транспорту України від 10 лютого 1998 р. N 43. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0043361-98>

[2]. Клименко О.А., Устименко В.С., Бондар О.В. та інші. Методичні рекомендації з

нормування витрат палива, електричної енергії, мастильних, інших експлуатаційних матеріалів автомобілями та технікою. Київ: ДП «Державто-трансНДІпроект», 2023, 52 с.

[3]. Говорущенко Н.Я., Туренко А.Н. Системотехника транспорта (на примере автомобильного транспорта). Харьков: РИО ХГАДТУ, 1998 – 474 с.

[4]. Krivoshepov S. Development of a Piston Fuel Flow Meter Based on a Microcontroller and Its Use for Vehicle Diagnostics, *SAE Technical Paper 2021-01-1150*, 2021. DOI: 10.33082/td.2022.1-12.06

[5]. Кривошапов С.І. Оцінка точності і достовірності вимірювання витрат палива / *Технічний сервіс агропромислового лісового та транспортного комплексів*. 2020. № 22. С. 90-97. DOI: 10.37700/ts.2020.22.90-97

[6]. Krivoshepov S., Marmut I., Nahliuk I., Nazarov A. and etc. Change in engine life and maintenance intervals depending on the fuel consumption of the vehicle during operation. *AIP Conf. Proc.* 2868, 020002 (2023). DOI: 10.1063/5.0165624.

Відомості про авторів

Сергій Кривошапов, к.т.н., доцент, доцент кафедри «Технічної експлуатації та сервісу автомобілів ім. проф. Говорущенко М.Я.», Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, [ORCID ID: 0000-0003-4605-6790](https://orcid.org/0000-0003-4605-6790)



Олександр Назаров, к.т.н., доцент, доцент кафедри «Технічної експлуатації та сервісу автомобілів ім. проф. Говорущенко М.Я.», Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна.



СЕКЦІЯ 2

**ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ,
НАДІЙНОСТІ ТА БЕЗПЕКИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ
УСТАНОВОК І ДОПОМІЖНОГО ОБЛАДНАННЯ НА
ТРАНСПОРТІ, НЕТРАДИЦІЙНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ
СИСТЕМИ**

ШЛЯХИ ЗМЕНШЕННЯ ТЕПЛООВОГО СЛІДУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З ДВЗ

Воронков О.І.¹, Авраменко А.М.^{1,2}, Левтеров А.М.^{1,2}

¹ Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

² Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, Україна

Анотація

Ключові слова: дизельний двигун, відпрацьовані гази, температура, тепловий слід, випускний колектор, гідравлічний опір.

В роботі розглянуто шляхи зменшення теплового сліду двигунів транспортних засобів. На прикладі 5-ти циліндрового двотактного дизельного двигуна типу 5 ДН 12/2х12 розглянуто роботу системи випуску відпрацьованих газів, доповненої пристроєм додавання повітря у тракт їх відведення для зниження температури. Використання запропонованого підходу дозволяє знизити температуру відпрацьованих газів на 10-12°C без додаткових енерговитрат.

Вступ

Робота поршневих ДВЗ у складі транспортних засобів (ТЗ) супроводжується нагріванням моторно-трансмісійного відділення та викидами відносно гарячих відпрацьованих газів (ВГ) у атмосферу. Це супроводжується виникненням так званого теплового сліду та є додатковим негативним чинником для небажаного виявлення ТЗ, що рухається [1]. Зниження температури ВГ шляхом оптимізації фаз газорозподілу, модернізацією системи охолодження та розбавленням потоку ВГ свіжим повітрям дозволяє знизити їх температуру, та відповідно, зробити менш помітним тепловий слід ТЗ. Вибір раціонального способу впливу на рівень температури ВГ та робочий процес дизельного двигуна дозволяє досягти поставленої мети без погіршення техніко-економічних показників двигуна [2].

Актуальність досліджень

Покращення експлуатаційних характеристик багатовісних автомобілів за критерієм теплового сліду дозволить виконувати поставлені завдання більш ефективно та зменшить загрозу виникнення позаштатних ситуацій.

Основними вимогами до систем придушення теплового сліду є: мінімальна вага і габарити, мінімальні витрати енергії на функціонування системи, висока ефективність, простота конструкції та надійність роботи. Запропонований в роботі підхід – по додавання свіжого повітря у потік гарячих ВГ є одним із ефективних шляхів зменшення температури ВГ та відповідає основним вимогам до системи придушення теплового сліду.

Дослідження впливу конструктивних та режимних факторів на ефективність роботи системи

придушення теплового сліду – є вкрай актуальним науково-практичним завданням.

Викладення основного матеріалу

Мета роботи – аналіз ефективності шляхів придушення теплового сліду ТЗ з ДВЗ.

В роботі ставилися наступні задачі:

- оцінити ефективність способу зниження температури ВГ транспортного двигуна без додаткових енерговитрат;
- вибрати допоміжні способи зниження температури ВГ з мінімальними енерговитратами для подальших досліджень.

В якості об'єкту дослідження в роботі розглядається дизельний двигун типу 5ДН 12/2х12.

Принципова схема системи придушення теплового сліду наведена на рис. 1.

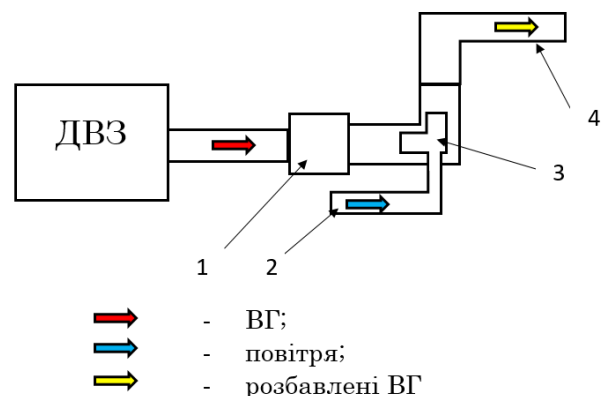


Рисунок 1. Принципова схема системи придушення теплового сліду ТЗ з ДВЗ: 1 – турбіна; 2 – патрубок відсмоктування пилу; 3 – сопло; 4 – вихід розбавлених ВГ

Основні технічні характеристики двигуна наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Основні технічні характеристики досліджуваного двигуна

№	Параметр	Од. вим.	Значення
1	Номінальна потужність, N_e	к.с.	1050
2	Частота обертання, що відповідає режиму номінальної потужності, n	$xв^{-1}$	2850
3	Діаметр циліндра, D	мм	120
4	Хід поршня, S	мм	120
5	Ступінь стиснення, ϵ	–	15,8
6	Габаритні розміри (ДхШхВ)	мм	1413x955x581

В представленій роботі для порівняльного аналізу ефективності роботи запропонованого способу роботи системи придушення теплового сліду було проведено серію чисельних експериментів.

Для цього було сформовано геометрію проточної частини елементів випускного тракту досліджуваного двигуна та елементів системи придушення теплового сліду. Загальний вигляд проточної частини наведено на рис. 2.

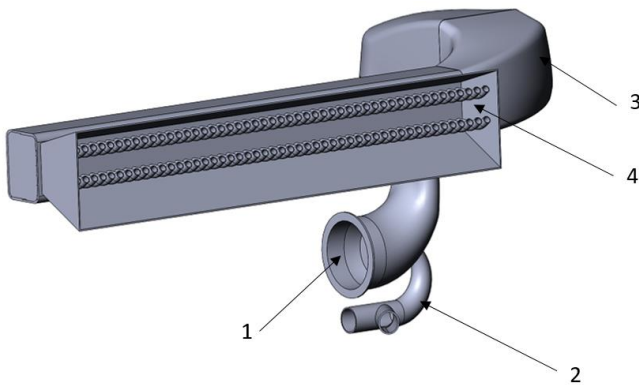


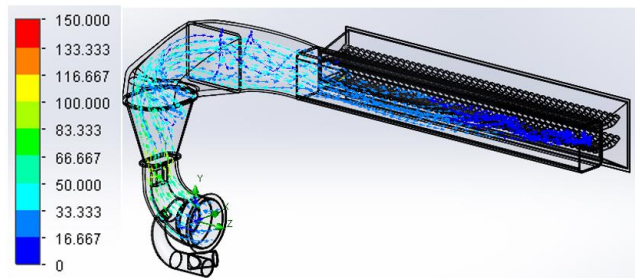
Рисунок 2. Загальний вигляд проточної частини елементів системи придушення теплового сліду: 1 – вхідний патрубок (компенсатор) після турбіни; 2 – патрубок відсмоктування пилу; 3 – з’єднувальний патрубок у кришці моторно – трансмісійному відділенні; 4 – сопла для виходу ВГ у навколишнє середовище

Далі для режиму номінальної потужності (табл. 1). Було проведено розрахунок робочого процесу для визначення витрат ВГ та їх температури після турбіни. Для порівняльного моделювання було створене нове робоче тіло – ВГ, з відповідними теплофізичними властивостями.

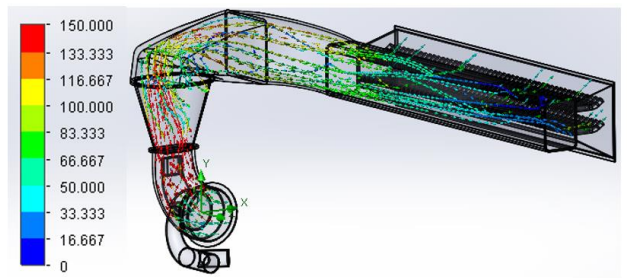
В подальшому з використанням сучасних чисельних методів було промодельовано процес течії гарячих ВГ в тривимірній нестационарній постановці для варіантів штатного та модернізованого виконання (з додаванням свіжого повітря у потік ВГ).

Процес додавання свіжого повітря було реалізовано з використанням штатної ежекційної системи, якою оснащуються двигунів типу 5 ДН 12/2х12.

Розподіл швидкості потоку ВГ для варіантів штатного та модернізованого виконання наведено на рис. 3.



а)



б)

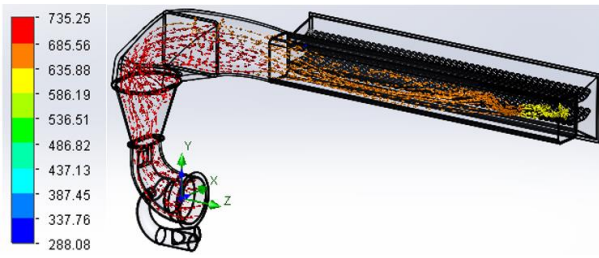
Рисунок 3. Розподіл швидкості потоку ВГ, м/с для варіантів штатного (а) та модернізованого виконання (б)

Як видно з наведених результатів (рис. 3) максимальна швидкість потоку ВГ для штатного варіанту досягає 138 м/с в зоні сопла ежектора, а для модернізованого – 150 м/с. На виході в атмосферу швидкість потоку ВГ досягає 65 м/с для штатного варіанту та 72 м/с. для модернізованого.

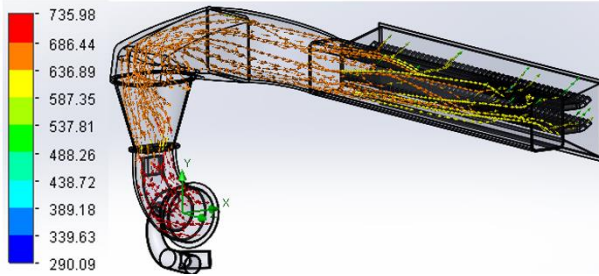
Розподіл температури потоку ВГ для варіантів штатного та модернізованого виконання наведено на рис. 4.

Як видно з наведених результатів (рис. 4) температура потоку ВГ на виході в атмосферу досягає 328 К для штатного варіанта та 316 К для модернізованого.

Основні результати порівняльного розрахункового дослідження наведено в табл. 2.



а)



б)

Рисунок 4. Розподіл температури потоку ВГ, К для варіантів штатного (а) та модернізованого виконання (б)

Таблиця 2. Основні результати порівняльного розрахункового дослідження

Параметр / Варіант	штатний	модернізований
Температура на виході, К	328	316

Висновки

За результатами проведеного порівняльного дослідження встановлено наступне:

- зниження температури відпрацьованих газів транспортного двигуна без додаткових енерговитрат – є перспективним напрямом покращення важливої експлуатаційної характеристики ТЗ шляхом придушення (зниження температури) його теплового сліду;

- вибір раціональних конструктивних і регулювальних параметрів роботи ДВЗ дозволяє позитивно впливати на зниження температури ВГ;

вибір способу зниження температури ВГ (додавання свіжого повітря у випускний тракт, упорскування спеціальної рідини у потік ВГ або використання термоелектричних генераторів) залежить від вимог до транспортного засобу, їх собівартості та ефективності роботи в умовах експлуатації.

Література

[1]. The Impact of Exhaust Plumes on the Infrared Signature of Combat Vehicles – an Experimental and Analytical Study / A. Pohl et al. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2023. P. 108649. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2023.108649> (date of access: 16.01.2024).

[2]. Infrared Signature Analysis on Armored Vehicle Applied with Emissivity Controlled Structure / T. Kim et al. Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea. 2017. Vol. 30, no. 2. P. 179–184. URL: <https://doi.org/10.7734/coseik.2017.30.2.179> (date of access: 16.01.2024).

Відомості про авторів

Олександр Воронков, д.т.н., професор, завідувач кафедри ДВЗ, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-8389-2459](https://orcid.org/0000-0002-8389-2459).



Андрій Авраменко, д.т.н., старший дослідник, провідний науковий співробітник відділу термогазодинаміки енергетичних машин, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, професор кафедри ДВЗ, Харківський національний автомобільно-дорожній університет Харків, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-8130-1881](https://orcid.org/0000-0001-8130-1881).



Антон Левтеров, к.т.н., старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу термогазодинаміки енергетичних машин, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, науковий співробітник кафедри ДВЗ, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-5308-1375](https://orcid.org/0000-0001-5308-1375).



ДО ПИТАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ У СФЕРІ ТЕПЛОВИКОРИСТАННЯ

Воїнов О. П. [✉], Кобалава Г.О., Самохвалов В.С.

Херсонський навчально-науковий інститут національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

Анотація

Ключові слова:

енергозабезпечення, енергозбереження, системи теплопостачання, енергоресурси, морська інфраструктура

Розглядається ключова енергетична проблема сучасності – раціональне та ефективне використання енергоресурсів та можливість її вирішення на основі інтенсивного енергозбереження, зокрема в сфері морської інфраструктури. Актуальним є пошук нових шляхів вирішення зазначеної проблеми. Метою дослідження є підвищення ефективності використання теплових технологій шляхом пошуку нових можливостей енергозбереження. Як основний метод дослідження використано системний аналіз. Розглядаються деякі шляхи вирішення задачі зниження споживання первинних енергоресурсів. Запропоновано удосконалення системи теплопостачання міст інтегруванням теплоенергетичних систем підприємств морської інфраструктури, енергосистеми та житлово-комунальної сфери. Показано, що розширення енергозберігаючої бази не лише забезпечує зниження споживання первинних енергоресурсів теплогенеруючими джерелами, а й суттєво покращує умови роботи енергосистеми країни.

Вступ

Відповідно до стратегії сталого розвитку України до 2030 р., важливим є критичний аналіз тенденцій розвитку систем тепло- та енергопостачання промисловості, підприємства якої використовують теплові технології. Найближчим часом у світі прогнозується зростання вартості ресурсів, що спричинить падіння виробництва в умовах зростання забруднення навколишнього середовища та викликаної ним зміни клімату [1, 2]. Тому необхідна розробка шляхів підготовки економічного механізму до майбутніх змін на сировинному та енергетичному ринках.

У цих умовах доцільно розширення взаємодії систем теплопостачання з іншими системами життєзабезпечення міст і з теплоенергетичними системами промислових підприємств, а також підприємств морської інфраструктури, з метою реалізації енергозберігаючого потенціалу міського господарського комплексу.

У напрямку ефективного розвитку систем централізованого теплопостачання метою їхнього енергозабезпечення має бути збереження довкілля, стабільність та успішне існування систем, мінімум споживання палива. Важливим є питання перспективи вибору палива, оскільки первинні енергоресурси є кінцевими, при цьому різняться темпи зміни їх вартості та втрат їх запасів. Прискорене зростання промислового виробництва, викликане збільшенням чисельності населення Землі та його потреб, визначило

лавиноподібне збільшення споживання енергоресурсів [3]. Енергетичний комплекс є інерційним - ресурси та час, необхідні на його зміну, - великі. У цих умовах ставка на паливо, яке з різних причин може стати недоступним, пов'язана із серйозними ризиками. Тому гранично допустима вага одного первинного енергоресурсу в енергобалансі країни не повинна перевищувати 50% [4].

Розвиток систем теплопостачання має бути пов'язаний з енергозбереженням на всіх стадіях – виробництва, передачі та споживання енергоресурсів.

Актуальність досліджень

Структура енергобалансу господарського комплексу України характеризується розвинутою твердопаливною інфраструктурою, що історично склалася: транспортна система; теплові технології; фахівці, підготовлені до роботи з цим паливом.

Для підвищення ефективності використання первинних енергоресурсів необхідно покращити облік енергоефективності; підвищити її значущість під час прийняття рішень на усіх рівнях; використовувати моніторинг та забезпечення виконання заходів економії; збільшити інвестиції в управління енергоефективністю [5].

У нинішній період поглибилася проблема раціонального та високоєфективного використання енергетичних ресурсів, використання ще

нереалізованого потенціалу енергозбереження. Актуальним є пошук нових шляхів вирішення зазначеної проблеми.

Формулювання цілей. Метою дослідження є підвищення ефективності використання теплових технологій шляхом пошуку нових можливостей енергозбереження, зокрема, в сфері морської інфраструктури.

Викладення основного матеріалу

В умовах, що склалися, є найбільш доцільним подальші кроки з розвитку енергозбереження в нашій країні орієнтувати як на використання традиційного палива, розвіданих запасів якого, за оцінками світових інститутів, вистачить: вугілля - на більш ніж 1000 років, урану - майже на 300 років, газу та нафти - на 50 років, так і на розвиток відновлюваних джерел енергії [6]. Слід прагнути неминуче зростання ціни на вугілля, нафту, газ компенсувати істотним підвищенням ефективності їх використання. Крім того, перспективним є розвиток атомної енергетики.

Потужним резервом енергозбереження є розвиток систем акумулювання енергії для компенсації нерівномірності піків вироблення та споживання електрики з традиційних джерел. Подібна нерівномірність характерна і для відновлюваних джерел енергії. Стрімкий розвиток зеленої енергетики та її інтеграція до енергосистеми стане одним з основних стимулів розвитку технології накопичувачів енергії, в яких використовується «надлишкова» електрика мережі для нагріву робочого тіла з подальшим використанням накопиченої теплоти за допомогою теплового насоса, зокрема, на сонячних електростанціях з концентратором.

У сфері матеріального виробництва передумовою радикального зсуву у вирішенні проблеми енергозбереження є впровадження його нової методичної основи, що базується на системному підході. Він передбачає розгляд як об'єкта енергетичного аналізу замкнених галузевих технологічних комплексів матеріального виробництва, в тому числі морської інфраструктури, які мають забезпечувати великомасштабний енергозберігаючий ефект. При цьому засобом досягнення такого ефекту є сукупність виявлених доцільних технологічних та енергетичних заходів інтенсивного енергозбереження. Масштаби енергозберігаючого ефекту тут вирішальною мірою визначаються як рівнем системності енергетичного аналізу, так і змістом комплексу енергозберігаючих заходів.

У цих умовах підприємствам доцільно знижувати витрати на енергозабезпечення, а для цього виявляти та розробляти нові енергозберігаючі рішення існуючих теплових технологій,

зокрема в сфері морської інфраструктури; а також модернізувати використовувані технології та їхнє енергозабезпечення, насамперед на базі когенерації [7].

Доцільним також є розширення енергозберігаючої бази з виходом за межі підприємств морської інфраструктури шляхом інтеграції їх теплоенергетичних систем із системами теплопостачання та іншими системами енергозабезпечення сполучених населених пунктів [8]. Можливе використання в системі централізованого теплопостачання побічних енергетичних потоків промислового виробництва, виробництва сфери морської інфраструктури, і насамперед низькотемпературних теплових потоків, що утворюються як при реалізації промислових теплових технологій, так і в житлово-комунальному господарстві та традиційно нині розсіюються у навколишньому середовищі. Це заощадить первинні енергоресурси, покращить екологічну обстановку, полегшить покриття добових графіків генерації електрики.

Висновки

Розвиток енергозабезпечення та енергозбереження слід орієнтувати на підвищення ефективності теплових технологій.

На шляху виконання завдань енергозбереження важливо розвивати використання як традиційного палива, так і відновлюваних джерел енергії.

Потужним резервом енергозбереження є розвиток систем акумулювання енергії.

Реалізація енергозберігаючого потенціалу має базуватись на принципах системного підходу, які закладені в основу концепції інтенсивного енергозбереження.

Необхідно вдосконалити систему теплопостачання міст інтеграцією теплоенергетичних систем промислових підприємств та підприємств морської інфраструктури, енергосистеми та житлово-комунальної сфери з використанням у системі централізованого теплопостачання побічних енергетичних потоків.

Література

[1]. В ООН прогнозують колапс екосистем через зміни клімату [Електронний ресурс] 24.06.2021. URL: <https://www.epravda.com.ua/news/2021/06/24/675305/>.

[2]. Медоуз Д., Рандерс Й., Медоуз Д. Межі зростання. 30 років по тому. - К.: Равурум. 2018. 464 с.

[3]. Когут-Ференс О.І. Світовий ринок енергетики: сучасний стан / Таврійський науковий вісник. Серія: Економіка, 2022, № 13. С. 30-36. URL: doi.org/10.32782/2708-0366/2022.13.3.

[4]. Рябцев Г.Л. Актуальні виклики та загрози енергетичній безпеці України [Електронний ресурс] / Національний інститут стратегічних досліджень. URL: <https://niss.gov.ua/sites/default/files/2019-01/111Zagrozi---AZ-%28fin%29-40cb6.pdf>.

[5]. Прогноз світової енергетики до 2035 року [Електронний ресурс] / LB.ua. URL: https://lb.ua/economics/2012/11/23/180045_konspekt_prognoz_mirovoy.html.

[6]. Графік дня: на скільки років Україні вистачить запасів корисних копалин [Електронний ресурс] / Довідник «Енергетика України». Інтернет-проект BusinessViews. URL: <https://businessviews.com.ua/ru/economy/id/na-skilki-rokiv-ukrajini-vistachit-zapasiv-korisnih-kopalin-2155/>.

[7]. Воїнов О.П., Кобалава Г.О., Самохвалов В.С., Воїнова С.О. Про підвищення енергетичної ефективності та екологічної безпеки суднових котельних установок / Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: XIV Міжнародна науково-технічна конференція. – Миколаїв: НУК. 2023. С. 123-126.

[8]. Воїнов А.П., Коновалов Д.В., Самохвалов В.С. Об управлении екологичностью централизованных систем теплоснабжения. Аналитический аспект /

Енергетика та електрифікація. 2020. № 11-12 (445-446). С. 58 – 61.

Відомості про авторів

Олександр Воїнов, д.т.н., професор, професор кафедри теплотехніки, Херсонський навчально-науковий інститут НУК ім. адмірала Макарова, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-7548-4212](https://orcid.org/0000-0001-7548-4212).




Галина Кобалава, к.т.н., доцент, завідувач кафедри теплотехніки, Херсонський навчально-науковий інститут НУК ім. адмірала Макарова, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-0634-5814](https://orcid.org/0000-0002-0634-5814).



Віктор Самохвалов, к.т.н., доцент, доцент кафедри теплотехніки, Херсонський навчально-науковий інститут НУК ім. адмірала Макарова, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0003-0264-4881](https://orcid.org/0000-0003-0264-4881).



APPLICATION OF THE HOLT METHOD FOR BUILDING A FORECAST MODEL OF THE DEVELOPMENT OF SELECTED STRUCTURAL COMPONENTS OF RENEWABLE ENERGY INDUSTRY OF UKRAINE

Stefan Zaichenko, Andriy Trachuk 

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine

Abstract

Keywords: forecasting systems, the Holt method, biomass, solar energy, wind energy, TPP on biomass, RES (renewable energy).

This article is devoted to the analysis of modern trends in the development of renewable energy sources and their impact on the country's energy system. The authors evaluate the technological maturity of renewable energy technologies and their efficiency compared to traditional energy sources. Thanks to a broad analysis, the article makes an important contribution to the understanding of the prospects and factors for the successful implementation of renewable national energy in the conditions of modern energy challenges. The obtained results emphasize the strategic importance of intensifying efforts in the direction of the development of the revision of the energy policy with the aim of its transformation in the direction of a carbon-neutral economy. As part of this, relevant recommendations are made regarding the revision of the Energy Strategy of Ukraine and improvement of the legal framework for effective control over the proper state of the system's energy capacities.

Introduction

New problems arise in society, especially complex ones at the intersection of sciences, the solution of which is possible only by taking into account the system of interrelationships of objects in the real world. Therefore, systematicity becomes one of the main aspects of practical activity, provides effective ways to overcome problematic situations with the help of systemic research, implemented on the basis of a systemic approach [1].

The basis of system research is the development of general methods and means of analysis and synthesis of research objects, formalization of the description of their integral characteristics, analysis of connections between system components and the environment. Thus, systematicity becomes one of the main aspects of practical activity, which determines the conduct of comprehensive research when solving practical tasks. One of these tasks is the efficiency of the functioning of energy supply systems, which is one of the most important characteristics of ensuring the livelihood and development of the region. Increasing energy efficiency and energy security, transitioning to a rational model of resource consumption with minimal costs for production, transformation, transportation and consumption of energy carriers are priorities of the strategic development of the regions. A necessary condition for the implementation of this strategy is the introduction of renewable energy sources (RES) into the energy balance of Ukraine [2].

Ukraine has many years of experience in the practical use of renewable energy sources. According to the estimated data of the long-term program "Energy conservation and improvement of energy efficiency of Ukraine until 2050". due to the realization of the full potential of the use of renewable energy sources in Ukraine, there are real prospects for increasing the level of generating capacity based on RES. In this regard, the development of a methodology for comprehensive assessment of RES potential and their involvement in the country's energy balance on the basis of system studies is relevant, which requires the development of methods of analysis and synthesis of energy systems with RES [3-6].

A number of articles are devoted to the study of methods of analysis and synthesis of energy systems, which can be classified and grouped according to the types of energy sources: wind, solar, hydropower, and bioenergy.

Relevance of research

Works [4-10] are devoted to the study of the issue of the gradual and sufficiently planned development of renewable energy in the world. The transition of world energy to renewable energy sources is analyzed. Hybrid renewable energy systems can provide heating, cooling and electricity for industrial processes using a significant proportion of renewable energy. Renewable energy sources can include fuels derived from bioenergy sources,

geothermal, solar thermal, and renewable electricity from solar, wind, hydro, and geothermal energy. Clearer local integration of renewable energy is needed to overcome spatial and transport challenges. New perspectives that contribute to the introduction of new clean energy technologies are being explored. Research can guide the development and implementation of strategies to support the transition to a sustainable and low-carbon future. It has been studied that the use of renewable energy can contribute to the development of mankind. The positive relationship between the adoption of renewable energy and human development was examined in three dimensions: health, education and income. The development of renewable energy is very closely related to the development of all humanity in general, which, taking into account the theoretical and practical implications, will contribute to more intensive and effective use of renewable energy to achieve the goals of sustainable development. Energy efficiency targets have been proven to reduce fossil fuel consumption and excess pollutant emissions through the development of renewable energy sources, as evidenced by available research. The impact of energy intensity targets on the development of renewable energy at different levels of the economy was analyzed by applying a partially linear functional coefficient model with panel data. Renewable energy sources can contribute to achieving the goals of reducing energy intensity. Political will is needed to adopt targeted management policies and tools adapted to local conditions for the development of renewable energy. Urbanization and population growth cause carbon emissions, as well as the need to transition to renewable energy sources, which requires research on the impact of hybrid renewable energy storage systems on achieving sustainable development goals. The technical and economic assessment of an autonomous hybrid system in a rural community with a network deficit is considered. But a comprehensive forecast assessment of the development of renewable sources based on several sources is insufficiently taken into account. Therefore, this question needs a deeper study, especially from the perspective of the realities of Ukraine.

Works [11-16] are devoted to the study of the development of wind energy. The reasons why some countries give wind energy an important role in decarbonizing their electricity systems, while others pay much less attention to this technology, are analyzed. An assessment is made of the current status, challenges and limitations of building-integrated wind turbines and micro- or small-scale wind-induced vibration technologies to improve their performance, efficiency, reliability and cost-effectiveness. The state-of-the-art, applications and technical characteristics that optimize these technologies for effective operation in conditions of non-uniform wind flows and a wide range of wind

speeds are explored. Renewable ocean energy sources (such as offshore wind and waves) are being explored, which are abundant and important energy resources to support future zero carbon goals. However, their energy intermittency and high cost hinder the commercialization and large-scale implementation of these ocean energy technologies. The main focus is on the problems of increasing the dispatchability of ocean energy farms by exploring the potential of a hybrid wind and wave energy platform with energy storage systems. Integrating wind energy into energy systems can effectively reduce operating costs and energy consumption. Globally, the share of wind energy is growing rapidly and is projected to reach or even exceed 40% of all energy generation in the coming decades in many parts of the world. Techno-economic approaches can be combined with more holistic approaches that consider societal and environmental impacts as we move towards deeply decarbonized networks. A review of research on environmental hydrogen, which is seen as a fundamental component in accelerating the energy transition and expanding opportunities for a sustainable future, is conducted.

Works [17-21] are devoted to the study of the development of solar energy. The feasibility of using concentrated solar energy through the development of a new sustainable process for the production of metal components and the combination of additive manufacturing and solar energy has been analyzed. Factors affecting the household's ability to accept solar energy were studied. Ensuring equitable access to solar energy builds support for the energy transition and contributes to energy poverty efforts. In recent decades, solar technology has shown a promising future in green energy. The solar energy potential of 235 countries and territories was studied as a first step towards the development of solar energy in these regions. A comparison of solar energy status between countries and territories was provided, taking into account concentrated solar energy and installed PV capacity for each continent. And the solar energy industry still has clear gaps in creating forward-looking forecasting models. In the next three decades, solar energy may become the second largest source of energy. The construction of new solar power plants will allow countries to produce approximately 25% of the world's total electricity demand by 2050. For many years, stand-alone solar PV systems have received much attention because they can provide clean and cheap electricity for communities, in rural areas, especially in developing countries. In the European Union, there is an ecological transition with the use of renewable energy sources.

Considering the above, in the analyzed works, insufficient attention is paid to the issue of forecasting a complex indicator of electricity production

with simultaneous consideration of four types of energy: wind, solar, hydropower, and bioenergy. That is why the authors decided to pay special attention to the solution and consideration of this issue as a strategic component of the development of the renewable national energy industry of Ukraine.

Taking into account the above, it is possible to conclude about the need to study the issue of forecasting the recovery of the national economy of Ukraine according to certain determinants.

Presentation of the main material

The purpose and tasks of the research. The purpose of this study is to evaluate comprehensive indicators for forecasting the strategic development of renewable energy sources (RES) in Ukraine and their impact on the structure of the country's renewable energy industry. The study is aimed at the analysis and assessment of the development of four key components of RES - wind energy, solar energy, hydropower and bioenergy. Research tasks include:

- development and application of forecasting methods, including the Holt method, to determine the expected growth of the installed capacities of each RES component.
- analysis and interpretation of forecasting results, in particular, identification of strategically important trends in the development of each type of RES.
- formulation of recommendations for improving Ukraine's energy strategy until 2050, taking into account global trends towards carbon neutrality.

Research results. On the basis of previous studies, the following strategic types of renewable energy were chosen for the construction of predictive parameters using the Holt method: solar, wind, hydro and bioenergy.

The Holt method is used to forecast time series when there is an upward or downward trend in the time series values. And also, for series when the data is not for a complete cycle (for example, for an incomplete year for a monthly forecast). Constant smoothing's in Holt's method ideologically play the same role as constants in simple exponential smoothing. Holt's method is used to forecast time series when there is a tendency to increase or decrease the values of the time series. The main dependencies and regularities of the Holt method are as follows [22]:

Exponentially smoothed series:

$$L_t = kY_t + (1 - k)(L_{t-1} - T_{t-1}), \tag{1}$$

where L_t – smoothed value for the current period;

- k - coefficient of smoothing of the series;
- Y_t - current values of the series;
- L_{t-1} - smoothed value for the previous period;
- T_{t-1} - trend value for the previous period.

Determination of the trend value:

$$T_t = b(L_t - L_{t-1}) + (1 - b)T_{t-1}, \tag{2}$$

- where T_t – trend value for the current period;
- b – trend smoothing factor;
- L_t – exponentially smoothed value for the current period;
- L_{t-1} – exponentially smoothed value for the previous period;
- T_{t-1} - trend value for the previous period.

Building a forecast using the Holt method:

$$\hat{Y}_{t+p} = L_t + pT_t, \tag{3}$$

- where \hat{Y}_{t+p} – forecast by the Holt method for the period;
- L_t - exponentially smoothed value for the last period;
- p – serial number of the period for which the forecast is prepared;
- T_t – the trend for the last period.

Constant smoothing's in Holt's method ideologically play the same role as a constant in simple exponential smoothing. They are selected, for example, by iterating over these parameters with some step. Algorithms that are less complex in terms of the number of calculations can also be used. The main thing is that you can always choose such a pair of parameters that gives high accuracy of the model on the test set, and then use this pair of parameters in real forecasting.

The main thing is that you can always choose such a pair of parameters that gives high accuracy of the model on the test set, and then use this pair of parameters in real forecasting. In the Holt model, the smoothing parameters characterize the degree of adaptation of the model to changes in a number of observations. They determine the speed of the model's response to changes occurring in development. The more of them, the faster the model reacts to changes. Of course, their value is greater for stable series, and less for unstable series. Different forecasting methods use a different approach to their determination. They can be taken as fixed, and the best value can be determined by the selection method, so that the error of the forecast one step ahead is the smallest. An alternative

to this approach is the dynamic change of smoothing parameters. In evolutionary and simplex planning methods, the adaptation parameters are constantly changing at each step. Several values are generated for the smoothing parameter [22].

Analysis of data from sources [23], in particular Ukrstat, made it possible to form the initial database for forecasting in the table. 1.

Table 1. The dynamics of the development of installed RES capacity in Ukraine for 2012-2021, MW)

Year	Installed capacity (by types of renewable energy sources), MW			
	VITROVA	SUNNY	HPP	TPP on biomass
2012	230	326	5410	20
2013	320	616	5410	23
2014	380	411	5780	27
2015	410	432	5810	32
2016	301	568	6220	38
2017	330	742	6330	43
2018	530	1388	6100	48
2019	1150	4925	6150	51
2020	230	6320	5849	67
2021	230	8541	7350	109

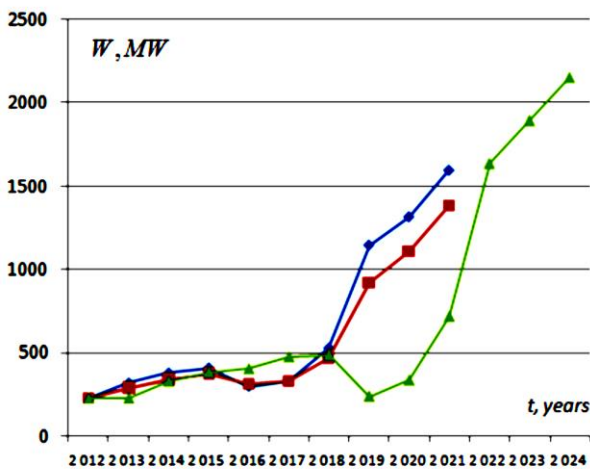


Figure 1. Forecasting the dynamics of the development of the installed capacity of the wind power industry of Ukraine using the Holt method:

- ▲— \hat{Y}_{t+p} series with a predictive model, MW;
- ◆— wind energy, installed capacity, MW;
- L_t exponentially smoothed series, MW

As can be seen (Fig. 1), the following results of the construction of the forecast model were obtained from the constructed schedule regarding the installed capacity of wind energy in Ukraine: by 2026, the increase in the amount of installed capacity of wind energy is predicted to the level of 2500 MW, which confirms that in Ukraine it is necessary

to pay special attention to the activation of development new generating capacities in the field of wind energy.

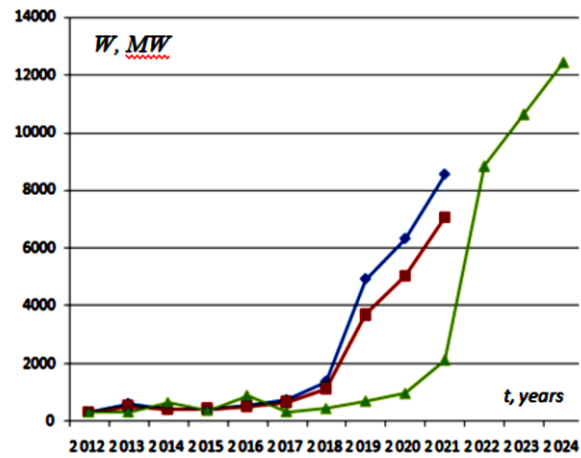


Figure 2. Forecasting the dynamics of the development of the installed capacity of solar energy in Ukraine using the Holt method:

- ▲— \hat{Y}_{t+p} series with a predictive model, MW;
- ◆— solar energy, installed capacity, MW;
- L_t exponentially smoothed series, MW

As you can see (Fig. 2) - the constructed graph shows that among all types of RES, the development of solar energy is the most promising, because by 2026, with the help of the forecast, we obtained such results that show the growth of the installed capacity of solar energy to the level of 14,000 MW. This indicates the need to focus special attention on attracting additional investments in the development of solar energy in Ukraine.

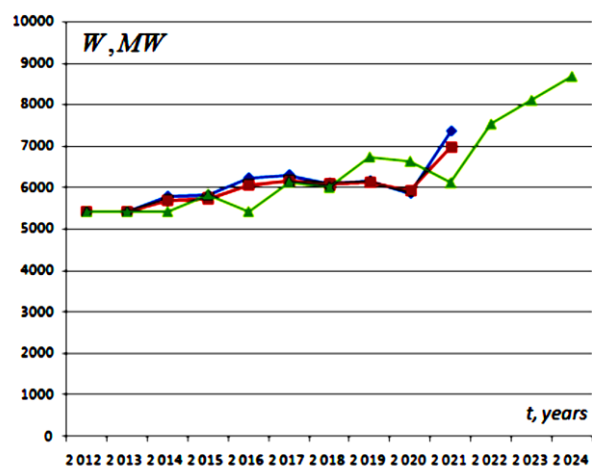


Figure 3. Forecasting the dynamics of the development of the installed capacity of hydroelectric power plants of Ukraine using the Holt method:

- ▲— \hat{Y}_{t+p} series with a predictive model, MW;
- ◆— HPP, installed capacity, MW;
- L_t exponentially smoothed series, MW

As you can see (Fig. 3) - after conducting the relevant calculations and analyzing the dynamics of the development of hydroelectric power plants (HEP) in Ukraine, we came to the conclusion that this direction of renewable energy is also very important, since the forecast calculations show that by 2026 the installed capacity of hydroelectric power plants in Ukraine will grow to the level of 9000 MW. This confirms that the hydropower sector is the second in Ukraine in terms of development compared to other strategic components of RES in Ukraine.

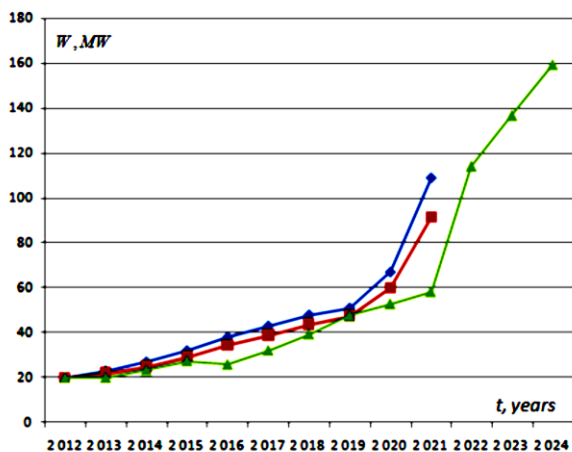


Figure 4. Forecasting the dynamics of development of the installed capacity of TPPs of Ukraine based on biomass using the Holt method:

—▲— \hat{Y}_{t+p} series with a predictive model, MW;
 —◆— - TPP on biomass, installed capacity, MW;
 —■— $-L_t$ exponentially smoothed series, MW

As we can see from (Fig. 4) – the results of the analysis of the graph showing the installed capacity of biomass thermal power plants in Ukraine indicate that despite the fact that the bioenergy sphere is still in its infancy in terms of installed capacity, with the active support of the state there is a significant the probability that this industry will develop rapidly in the near future: the forecast model predicts an increase in the installed capacity of biomass thermal power plants to 180 MW by 2026. This proves for us the strategic importance and environmental friendliness of this type of RES, which can and should be developed in the near future.

The development of the energy system directly affects the competitiveness of the national economy and the standard of living of the entire population of Ukraine. Accordingly, a strategic task for any country is to provide the country with economically justified and ecologically safe energy resources.

Today, wind and solar energy is one of the most promising directions for the development of the

country's energy independence. It is appropriate to pay attention to the fact that the use of energy from biomass is also growing steadily. At the same time, for Ukraine, taking into account the global challenges in the field of decarbonization of the energy sector, it is necessary to pay special attention to the modernization of hydroelectric power plants in Ukraine, which is the rehabilitation of hydroelectric power plants, improvement of regulatory and legal support, and intensive development of energy companies.

Conclusions

With the help of Holt's method, appropriate predictive models were built for four strategically important RES components: wind, solar, hydro, and biomass.

As a result of calculations and construction of predictive models, the authors reached the following conclusions:

The following results of building a predictive model were obtained:

- by 2026, the installed wind energy capacity is forecast to increase to the level of 2,500 MW, which confirms the need to pay special attention in Ukraine to the activation of the development of new generation capacities in the field of wind energy;

- among all types of RES, the development of solar energy is the most promising, because by 2026, with the help of a forecast, we obtained such results that indicate the growth of the installed capacity of solar energy to the level of 14,000 MW. This indicates the need to focus special attention on attracting additional investments in the development of solar energy in Ukraine;

- after conducting the relevant calculations and analyzing the dynamics of the development of hydroelectric power plants (HEP) in Ukraine, we came to the conclusion that this direction of RES is also very important, as forecast calculations show that by 2026 the installed capacity of hydroelectric power plants in Ukraine will increase to 9,000 MW. This confirms that the hydropower industry is the second in Ukraine in terms of development compared to other strategic components of RES in Ukraine;

- the results of the calculations of the forecast values of the installed capacity of thermal power plants (TPP) on biomass in Ukraine indicate that, despite the fact that the field of bioenergy is still in the stage of formation in terms of installed capacity, with the active support of the state, there is a significant possibility that in the near future this industry will develop rapidly: the forecast model predicts an increase in the installed capacity of

biomass thermal power plants to 180 MW by 2026. This proves for us the strategic importance and environmental friendliness of this type of RES, which can and should be developed in the near future.

Taking into account the systematization of scientific research and the results of forecasting changes in the use of energy from renewable sources, it is important to take the following measures:

- review the Energy Strategy of Ukraine until 2050 and develop new strategic directions of development taking into account global trends in the direction of carbon-neutral development of the national economy;

- to develop communal electric transport in order to improve the state of the environment and reduce fuel dependence on other countries;

- to optimize and modify the regulatory and legal environment for effective control and supervision of maintenance of the proper state of energy enterprises.

Literature

[1]. Okhrimenko O.O., Bigun U.V. Economic security of Ukraine through the prism of energy strategy. 2015.

[2]. Zaichenko, S., Derevyanko, D. Comparison of the energy efficiency of a synchronous generator with a spark ignition engine on different types of fuel. In *Systems, Decisions and Control in Energy V* (pp. 155-177). Cham: Springer Nature Switzerland. 2023.

[3]. Shevchuk, S., Zaichenko, S., Opryshko, V., & Adjebi, A. (2019, April). Determination of the diagnostic system inertial parameters for power generating station combustion engine. In *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)* (pp. 88-91). IEEE.

[4]. Kulbovskiy I., Holub G., Sklyarenko I., Sorochynska O., Gurenkova O., Kiyashko V., Haruta V. (2020). Study of the functioning model of the production and technological potential of the metro's power supply departments. In *vehicles - materials of the international conference* (pp. 416-420).

[5]. [Golub G., Kulbovskiy I., Skok P., Bambura O., Melnychenko O., Kharuta V., Tretinichenko Yu. (2020). System model of information flows in power supply networks in transport infrastructure projects. In *vehicles - materials of the international conference* (pp. 132-135).

[6]. Walmsley, TG, Philipp, M., Picón-Núñez, M., Meschede, H., Taylor, MT, Schlosser, F., & Atkins, MJ (2023). Hybrid renewable energy utility systems for industrial sites: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 188, 113802.

[7]. Onu, P., Pradhan, A., & Mbohwa, C. (2023). The potential of industry 4.0 for renewable energy and materials development—The case of multinational energy companies. *Heliyon*, 9(10).

[8]. Nguyen, TTH, Phan, GQ, Tran, TK, & Bui, HM (2023). The role of renewable energy technologies in enhancing human development: Empirical evidence from selected countries. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8, 100496.

[9]. Ge, T., Ge, Y., Lin, S., & Ji, J. (2023). Do energy intensity reduction targets promote renewable energy development? Evidence from partially linear functional-coefficient models. *Energy Strategy Reviews*, 49, 101165.

[10]. Wali, SB, Hannan, MA, Ker, PJ, Abd Rahman, MS, Tiong, SK, Begum, RA, & Mahlia, TI (2023). Techno-economic assessment of a hybrid renewable energy storage system for rural communities towards achieving sustainable development goals. *Energy Strategy Reviews*, 50, 101217.

[11]. Schneider, N., & Rinscheid, A. (2024). The (de-)construction of technological legitimacy: Contending storylines surrounding wind energy in Austria and Switzerland. *Technological Forecasting and Social Change*, 198, 122929.

[12]. Calautit, K., & Johnstone, C. (2023). State-of-the-art review of micro to small-scale wind energy harvesting technologies for building integration. *Energy Conversion and Management: X*, 100457.

[13]. Gao, Q., Bechlenberg, A., Vakis, AI, Ertugrul, N., Jayawardhana, B., & Ding, B. (2022). Techno-economic assessment of offshore wind and hybrid wind-wave farms with energy storage systems. Available at SSRN 4358078.

[14]. Qu, LN, Ji, BX, Lim, MK, Shen, Q., Li, LL, & Tseng, ML (2023). A hybrid static economic dispatch optimization model with wind energy: Improved pathfinder optimization model. *Energy Reports*, 10, 3711-3723.

[15]. Loth, E. (2023). Wind energy value and deep decarbonization design, what's next?. *Next Energy*, 1(4), 100059.

[16]. AlZohbi, G., AlShuhail, L., & Almoaikel, A. (2023). An estimation of green hydrogen generation from wind energy: A case study from KSA. *Energy Reports*, 9, 262-267.

[17]. Cañadilla, A., Rodríguez, G., Romero, A., Caminero, MA, & Dura, OJ (2023). Sustainable production of copper components using concentrated solar energy in material extrusion additive manufacturing (MEX-CSE). *Sustainable Materials and Technologies*, e00799.

[18]. Arroyo, Á., Basurto, N., Casado-Vara, R.,

Timiraos, M., & Calvo-Rolle, JL (2024). A Hybrid Intelligent Modeling approach for predicting the solar thermal panel energy production. *Neurocomputing*, 565, 126997.

[19]. Kraaijvanger, CW, Verma, T., Doorn, N., & Goncalves, JE (2023). Does the sun shine for all? Revealing socio-spatial inequalities in the transition to solar energy in The Hague, The Netherlands. *Energy Research & Social Science*, 104, 103245.

[20]. Sayed, MA, Ahmed, MM, Azlan, W., & Kin, LW (2023). Peer to Peer Solar Energy Sharing System for Rural Communities. *Cleaner Energy Systems*, 100102.

[21]. Pourasl, HH, Barenji, RV, & Khojastehnezhad, VM (2023). Solar energy status in the world: A comprehensive review. *Energy Reports*, 10, 3474-3493.

[22]. Kotsialos, A., Papageorgiou, M., & Poulimenos, A. (2005). Holt-winters and neural-network methods for medium-term sales forecasting. *IFAC Proceedings Volumes*, 38(1), 133-138.

[23]. State Statistics Service of Ukraine [Electronic resource]. Available at: <http://www.ukrstat.gov.ua>.

Authors' Information

Stefan Zaichenko, Doctor of Technical Sciences, Prof., Department of Automation of Electrotechnical and Mechatronic Complexes, Institute of Energy Saving and Energy Management, National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, [ORCID ID: 0000-0002-8446-5408](https://orcid.org/0000-0002-8446-5408).



Andriy Trachuk, PhD student, Department of Automation of Electrotechnical and Mechatronic Complexes, Institute of Energy Saving and Energy Management, National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, [ORCID ID: 0000-0001-7882-3208](https://orcid.org/0000-0001-7882-3208).



ДО ПИТАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ БЕЗПЕКИ КОРИСТУВАЧІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

Скосар В.Ю.[✉], Комаров С.В., Бурилов С.В.

Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Україна

Анотація

Ключові слова: низькочастотні магнітні поля, електромагнітна безпека, стан здоров'я людини.

Мета роботи – звернути увагу наукової спільноти на проблему електромагнітної безпеки щодо іррегулярних низькочастотних магнітних полів на водному транспорті. Здійснено оцінку можливості впливу слабких електромагнітних полів на людину, зокрема, іррегулярних низькочастотних магнітних полів. Запропоновані деякі заходи щодо електромагнітної безпеки на водному транспорті.

Вступ

Останнім часом все більше уваги приділяється питанням електромагнітної безпеки [1], у тому числі на сучасному електричному транспорті [2], на електроходах та на інших суднах [3].

Насамперед нас цікавитимуть низькочастотні електромагнітні поля на електроходах - суднах, рушії яких приводяться в дію електричними двигунами. До електроходів належать: різні атомходи; дизель-електроходи; електроходи на паливних елементах; електроходи на сонячних батареях; різні прогулянкові електроходи на акумуляторах та інші [4].

Авторами порушується питання про необхідність досліджень щодо впливу низькочастотних електромагнітних полів на самопочуття та здоров'я людини, у томі числі слабких магнітних полів, а також наводиться короткий аналіз наукових публікацій з цієї проблеми.

Актуальність досліджень

Змінні електромагнітні поля, статичні магнітні та електричні поля можуть бути шкідливими і навіть небезпечними для здоров'я людини. У повсякденності нас пронизує безліч електромагнітних полів від великої кількості різних техногенних джерел, і вся ця сукупність полів отримала гучну назву «електромагнітний смог» (electrosmog) [5].

Для судів дослідження зосереджені в основному на електромагнітному випромінюванні від судових антен, яке характеризується діапазоном 30 кГц-300 ГГц [3].

Проте, на електроходах працюють електродвигуни та судові електрообладнання, які випромінюють на набагато нижчих частотах (50 Гц і менше). Для наднизьких і вкрай низьких частот

автори [3] рекомендують вважати гранично допустимою величину магнітної індукції 0,2...0,3 мкТл. Але, наскільки це обґрунтовано?

Актуальність електромагнітної безпеки на водному транспорті слід розглядати у контексті загальної проблеми безпеки на водному транспорті України, яка (безпека), на жаль, перебуває у незадовільному стані [6].

Викладення основного матеріалу

Для більш глибокого розуміння питання корисно залучити досвід вивчення електромагнітної безпеки на електричному наземному транспорті, включаючи магнітолевітаційні поїзди.

Також необхідно залучити досвід вивчення впливу слабких техногенних електромагнітних полів, та варіацій геомагнітного поля на самопочуття та стан здоров'я людини. Також беремо до уваги, що постійне геомагнітне поле має малу величину ~50 мкТл, 0 Гц, але деякі організми здатні його відчувати та використовувати для навігації, наприклад, перелітні птахи, зокрема, мігруючі вільшанки [7-8].

В табл. 1 приведені дані щодо характеристик низькочастотних магнітних полів, які здатні погіршити самопочуття та стан здоров'я людини.

Таблиця 1. Характеристики магнітних полів, та їх біологічний ефект

Індукція і частота магнітного поля	Біологічний ефект
~ 0,1-1,0 мкТл, іррегулярне низькочастотне	Погіршення самопочуття або стану здоров'я під час магнітних збурень [9]
35-5000 мкТл, 50-60 Гц	Генотоксичність (пошкодження ДНК) [1]

Слабкі низькочастотні електричні поля легко екрануються навіть шкірою людини, і тому вони не є небезпечними. В табл. 2 приведені максимальні значення магнітної індукції всередині таких транспортних засобів, як: трамвай; метро; тролейбус; електрокар і легкий електробус. Також в табл. 2 приведені максимальні значення магнітної індукції всередині вагонів у високошвидкісних рейкових системах на сталевих колесах, таких як ICE, TGV і Shinkansen, а також у високошвидкісних системах Маглеву – германської Transrapid та японської системи надпровідного SC Maglev.

Таблиця 2. Характеристики магнітних полів, які досліджено на електротранспорті

Transrapid [2]	16 мкТл, іррегулярне низькочастотне (далі - ІН)
Легкий електробус [10]	80 мкТл, ІН
Електрокар [10]	104 мкТл, ІН
Електропоїзд [10]	120 мкТл, ІН
Електромобіль (габріридний авто) [10]	140 мкТл, ІН
Рейково-колійний поїзд ICE 3 [2]	<200 мкТл, 0-200 Гц, ІН
Тролейбус [10]	350 мкТл, ІН
Метро [10]	450 мкТл, ІН
Трамвай [10]	500 мкТл, ІН
Транспортний засіб SC Maglev [2]	90-12720 мкТл (без екранування), 58-1331 мкТл (з екрануванням), ІН

Система SC Maglev вимагає та застосовує ефективні заходи магнітного екранування, які пов'язані з важкими матеріалами, що дозволяє суттєво зменшити магнітне поле.

На водному транспорті необхідно провести аналогічні дослідження щодо низькочастотних магнітних полів, як це виконано для наземного електротранспорту. Згідно [2; 10], значення індукції магнітного поля в електротранспорті укладаються в гранично допустимі норми, з одного боку. Але, з другого боку, набагато менш інтенсивні варіації геомагнітного поля (~ 0,1-1,0 мкТл) здатні погіршити самопочуття і навіть стан здоров'я людини, якщо вона має хронічні хвороби. При цьому частотні характеристики техногенного магнітного поля від електротранспорту і частотні характеристики варіацій

геомагнітного поля дуже схожі, це частоти переважно в діапазоні 0-20 Гц, а характер поля – іррегулярний. Крім того, як сказано вище, магніторецепція мігруючих вільшанок [7-8] працює при геомагнітному полі ~50 мкТл, 0 Гц.

І тут виникає фундаментальне питання: яким чином організм здатен відчувати і реагувати на дуже слабкі магнітні поля? Оскільки в межах класичної фізики такі феномени пояснити неможливо, дослідники розробляють моделі чутливості організмів до слабого магнітного поля в рамках квантової біології [9], котра вже має деякі успіхи у дослідженні магніторецепції птахів [7, 8]. В будь-якому випадку, іррегулярні низькочастотні магнітні поля техногенної природи повинні впливати на організм людини, оскільки вони на багато порядків сильніші за варіації геомагнітного поля. Якщо буде виявлено фізичні механізми впливу іррегулярних низькочастотних магнітних полів на живі організми, і можливу шкоду від цих полів, у тому числі, довгостроковий негативний вплив, то на нас чекає кардинальний перегляд питання електромагнітної безпеки. А це означає, що нормативи на гранично допустимі норми впливу низькочастотного, іррегулярного магнітного поля повинні будуть переглянуті.

Висновки

Звернено увагу наукової спільноти на проблему електромагнітної безпеки на водному транспорті, зокрема – безпеки щодо іррегулярних низькочастотних магнітних полів. Проведено попередні дослідження щодо можливості слабких електромагнітних полів впливати на живі організми, зокрема, на людину. Підкреслено необхідність досліджень щодо низькочастотних магнітних полів на водному транспорті, як це вже зроблено на транспорті наземному. Автори планують продовжити дослідницькі роботи у цьому напрямку, а також – роботи зі створення електромагнітного захисту.

Література

- [1]. Баленко Н. В., Соверткова Л. С., Черниченко І. О., Бабій В. Ф., Думанський Ю. Д., Литвиченко О. М., Сердюк Є. А., Кондратенко О. Є. Дослідження генотоксичності електромагнітного поля низькочастотного діапазону. Сучасний стан. *Environment & Health*. 2018. № 1 (85). С. 14–19. [doi:10.32402/dovkil2018.01.014](https://doi.org/10.32402/dovkil2018.01.014).
- [2]. Kircher R., Palka R., Fritz E., Eiler K., Witt M., Blow L., Klühspies J. Electromagnetic Fields of High-Speed Transportation Systems: Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail. *The International Maglev Board, Research Series*. 2018. Vol. 2. P. 1–20. / URL:

<https://ru.scribd.com/document/463369609/2018-Int-Maglev-BoardISBN978-3-947957-01-9> (дата звернення 05.02.2024).

[3]. Корзун В.В. Електромагнітне поле суднових антен і його вплив на здоров'я членів екіпажа / В.В. Корзун, П.П. Маменко // *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2016. № 1 (14). С. 185-195.

[4]. Скосарь В.Ю. Пассажирский электроход / В.Ю. Скосарь, А.С. Ворошилов, С.В. Бурилов // Матеріали 7 Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування», 22-23 вересня 2016, м. Херсон. С. 148-149.

[5]. Bernhard J.H. Electrosmog, cellular phones, sunbeds etc. - adverse health effects from radiation? Health aspects of non-ionizing radiation. *Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz*. 2005. 48(1): 63-75. doi:[10.1007/s00103-004-0969-2](https://doi.org/10.1007/s00103-004-0969-2).

[6]. Фердман Г.П. Забезпечення безпеки на водному транспорті України: державно-управлінський аспект / Г.П. Фердман // *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. 2020. Том 31 (70), №2. С. 236-240. doi:[10.32838/2663-6468/2020.2/39](https://doi.org/10.32838/2663-6468/2020.2/39).

[7]. Magnetic sensitivity of cryptochrome 4 from a migratory songbird. Jingjing Xu, et. al. *Nature*, vol. 594, pages 535–540 (2021). doi:[10.1038/s41586-021-03618-9](https://doi.org/10.1038/s41586-021-03618-9).

[8]. Маркуш К. Магніторецепцію птахів пояснили світлочутливим білком сітківки (24 Червня 2021). [Електронний ресурс] // Режим доступу: <https://nauka.ua/news/magnitoreceptiyu-ptahiv-poyasnili-svitlochutlivim-bilkom-sitkivki> (дата звернення 05.02.2024).

[9]. An Introduction to Quantum Biology - with Philip Ball / URL:

<https://www.youtube.com/watch?v=bLeEsYDIXJk> (дата звернення 26.02.2024).

[10]. Електромагнітне випромінювання від електромобіля (2014). [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://electroavtosam.com.ua/forums/viewtopic.php?f=55&t=180> (дата звернення 05.02.2024).

Відомості про авторів

Вячеслав Скосар, к.ф.-м.н., с.н.с. відділу №6, Інститут транспортних систем і технологій НАНУ, Дніпро, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-2151-3417](https://orcid.org/0000-0002-2151-3417).



Сергій Комаров, провідний інженер відділу №6, Інститут транспортних систем і технологій НАНУ, Дніпро, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-6065-9478](https://orcid.org/0000-0002-6065-9478).



Сергій Бурилов, к.ф.-м.н., с.н.с., провідний науковий співробітник, завідувач відділом №6, заступник директора з наукової роботи, Інститут транспортних систем і технологій НАНУ, Дніпро, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-8070-6764](https://orcid.org/0000-0001-8070-6764).



Скосар В.Ю.[✉], Бурилова Н.В., Ворошилов О.С., Комаров С.В.

Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Україна

Анотація

Ключові слова: дефіцит прісної питної води, аерація і флоатація води, автономна установка очищення води.

Мета роботи – звернути увагу наукової спільноти на проблему дефіциту прісної води, на небезпеку мікро- та наночастинок пластика, а також – проведення досліджень у галузі способів очищення води в умовах автономного будинку. Проведені попередні дослідження ефективності аерації та флоатації при очищенні води від дрібних частинок пластика. Зроблено оцінку потужності автономної установки очищення води, а також необхідної потужності сонячної панелі та вітротурбіни, енергоємності акумуляторної батареї – для живлення автономної установки.

Вступ

Людство робить зусилля, щоб перейти до екологічно чистої форми техногенної цивілізації, наскільки це можливо. Використання відновлюваних джерел енергії є лише одним із напрямів зазначеного переходу. Не менш важливим напрямком є вирішення проблеми дефіциту прісної води.

Добре відомо, що переважна частина води на Землі непридатна для пиття та технічних потреб, оскільки сильно мінералізована (це вода океанів, морів та багатьох підземних джерел). Значна частина води прісної також не є якісною, і потребує доочищення.

Автори проводять розробку автономної установки доочищення прісної води методами аерації, флоатації, яка зможе працювати від поновлюваних джерел енергії.

Актуальність досліджень

На Землі досить багато доступної солоної морської води. Але, на жаль, людство сьогодні страждає від дефіциту води прісної, якісної, питної [1-4].

На жаль, вода з підземних джерел (через малу кількість кисню в ній) може містити: метали (залізо, марганець); органічні речовини; мікроорганізми; газоподібні речовини (сірководень, хлор, аміачні сполуки). Аналогічно, неякісною може бути водопровідна вода, оскільки далеко не всі станції водоочищення задовольняють сучасні вимоги [5].

Для підвищення якості води, очищення (доочищення) від розчинених металів, органічних сполук та газових сумішей широко застосовується

метод аерації. Суть методу: воду подають у герметичний бак (аераційну колоду), після чого компресор під тиском качає повітря через бак із водою. Кисень повітря окислює залізо, марганець, гази та органіку, розчинені у воді. При досягненні критичного тиску в баку відбувається скидання частини повітря через клапан скидання. Окислені метали з води переходять у нерозчинний стан. Потім воду випускають із бака через фільтр для очищення від окислених металів. Завдяки окисленню розчинених металів і органічних речовин виходить вода, очищена від частинок заліза і марганцю, і навіть від частини органічних речовин, і газів [5; 6].

За допомогою метода флоатації (або електрофлоатації) зазвичай очищують стічні води. Метод флоатації передбачає утворення водоповітряної суміші, яка сприяє видаленню твердих домішок та органічних речовин на поверхню у складі піни, за рахунок групування дрібних частинок у більшій агломераті. Але, при необхідності, методом флоатації можливо досягти високої якості звичайної прісної води [7-9].

Останнім часом виявилася ще одна проблема, пов'язана з низькою якістю питної (прісної) води. Це забрудненість води частинками мікро- та нанопластику. Йдеться про частинки розмірами від 0,001 мм (до 5 мм), та розмірами менш 0,001 мм, які містяться у питній воді. Причому, за злою іронією, саме бутильована вода, яка вважається найбільш чистою, містить найбільше мікрота нанопластика, як це нещодавно виявили вчені [10].

На жаль, ці частинки пластику шкідливі для здоров'я людини, оскільки проникають у тканини організму і там практично назавжди залишаються, стаючи джерелом різноманітних хвороб.

Викладення основного матеріалу

Починаючи з 1950-х років, людство виробило 8,3 млрд тон пластмаси, причому близько 80% потрапило до навколишнього середовища. Пластикові відходи хімічно майже не розкладаються, але поступово фрагментуються на дрібні і дуже дрібні частинки, що йдуть у ґрунт, гідросферу та систему водопостачання. Сьогодні від найглибших частин світового океану до висот стратосфери і до найдрібніших структур людських органів і тканин — мікропластик і нанопластик проник усюди. Частинки пластику проникають у рибу, у наземних тварин, у фрукти та овочі. Існує й інше важливе джерело мікропластику – косметика та засоби особистої гігієни. Справа в тому, що у більшості випадків виробники навмисно додають у продукцію мікроскопічні пластикові кульки, щоб покращити її технічні характеристики. Цей мікропластик теж проникає в організм людини - після подорожі у каналізації і, далі, навколишньому середовищу. Фахівці оцінили масу мікропластику, що потрапляє в нас із їжею та водою. Виявляється, середньостатистична людина вживає всередину близько п'яти грамів на тиждень (приблизно, як банківська карта, перемелена в блендері) пластика [11-12].

Дослідники встановили, що проходження мікропластика через шлунково-кишковий тракт змінює його мікробіом. А це викликає порушення метаболізму: ожиріння, діабет та хронічні захворювання печінки. Мікропластик може викликати місцеві запальні реакції та імунну відповідь, а нанопластик здатний запускати ланцюжки хімічних реакцій, що викликають рак. Фахівці пропонують кілька простих порад як захистити себе від мікропластику. Вони рекомендують розігрівати в мікрохвильовій печі продукти, поміщаючи їх у керамічну, а не пластикову посудину. Також корисно частіше провітрювати кімнату, при можливості обходитися без пластикової упаковки і особливо забруднених мікропластиком продуктів на кшталт чайних пакетиків. Але першорядне значення має обмеження використання пластикової тари для води. Зменшуючи обсяги використання полімерних пакетів та синтетичних тканин, ми допомагаємо збереженню довкілля та громадського здоров'я [11-12].

Нещодавно виявили нову хворобу — «пластикоз», яка пов'язана з накопиченням мікропластику в тканинах організму. На прикладі морських буревісників дослідники показали, що, потрапляючи в організм з водою та їжею, частки пластику ведуть до рубцювання тканин внутрішніх органів та тяжких порушень травлення. Справа в тому що повільне розкладання сміття, прання синтетичних тканин, стирання автомобільних шин об поверхню дороги та інші процеси

наповнюють довкілля частинками мікропластику, у тому числі, світовий океан. Потрапляючи в живі організми з їжею, водою і навіть повітрям, частинки мікропластику здатні проникати в тканини та клітини, накопичуватися та запускати небезпечні процеси, які часто ведуть до загибелі. «Пластикоз» (plasticosis) названий за аналогією з іншими фіброзами - патологічними розростаннями сполучних тканин через хронічне запалення. Нова хвороба може вражати людей. Про результати докладно розповідається у статті [13].

А тепер ще раз повернемося до дослідження води у пластикових пляшках. Автори наукової роботи [10] протестували три популярні бренди бутильованої води. Після цього вони вивчили пластикові частинки, що містяться в пляшках, розмірів до 100 нм. Виявилося, що в середньому у пляшці з водою присутні приблизно 240 тисяч пластикових частинок на літр порівняно з 5,5 частинками на літр у водопровідній воді. Це у 100 разів більше, ніж раніше припускали фахівці. Максимальне значення становило 370 тисяч частинок на літр води. Приблизно 90% виявлених частинок – нанопластик. Найбільше знайшли наночастинок поліетилентерефталату (ПЕТ). Він використовується у виробництві пляшок, газованих та спортивних напоїв, а також кетчупу та майонезу. Швидше за все, ПЕТ потрапляє у воду при стисканні або дії тепла, коли шматочки відшаровуються. Також вчені виявили багато частинок поліаміду (різновиду нейлону). На думку авторів дослідження [7], він потрапляє у воду через пластикові фільтри, які використовуються для очищення води перед її розливом у пляшки. Крім того, до списку увійшли полістирол, полівінілхлорид (ПВХ) та поліметилметакрилат (оргскло).

Таким чином, необхідно дотримуватися порад щодо захисту себе та ближніх від мікропластику, а також робити доочищення води, навіть бутильованої води. Для реалізації такого захисту автори цього доповіді проводять дослідження та розробки у сфері автономних установок доочищення прісної води методами аерації, флотації, які зможуть працювати від поновлюваних джерел енергії. Автономна установка доочищення не залежатиме від електричної мережі, але зможе використовувати електрику від сонячних панелей, вітроелектричних турбін, або паливних елементів. Для безперебійного електропостачання установки також передбачається наявність акумуляторних батарей.

Оскільки флотацію проводитимуть з нагнітанням повітря під тиском, то електрична силова частина автономної установки повинна бути достатньо потужною. Для цього передбачені досить енергоємні акумуляторні батареї, які після закінчення очищення води будуть переключені в

режим зарядки від фотопанелей та/або вітроелектричної турбіни.

Бутильовану воду планується доочищувати від мікро- та нанопластика тільки за допомогою флоатації, яка виведе із води значну частину пластику. Прісну воду з інших джерел планується доочищувати за допомогою двох послідовних операцій: аерації та флоатації, які будуть відрізнятися режимом подання повітря у воду.

Проведено попереднє лабораторне дослідження ефективності аерації та флоатації при обробці води с частинками пластику. Аерація здатна очистити воду обсягом 2 л від частинок ПЕТ розміром 1-5 мм за 30-50 хв. на 40-50%. При цьому аерацію необхідно проводити послідовно 4-5 разів, щоб знизити вміст таких частинок на порядок. Однак, для віддалення більш дрібних частинок цього недостатньо.

Тому проведено попереднє дослідження ефективності флоатації. Водно-повітряну суміш готували за допомогою флоатаційного насосу серії 180 фірми INPROMINOX під тиском 6 атм., лабораторний зразок води, обсягом 2 л, був штучно засмічений дрібним порошком ПВХ. Флоатація за 15-20 хв. дозволила винести до складу піни 90-95% дрібних частинок ПВХ. Але повне дослідження вмісту мікро- та наночастинок пластику у воді можливо виконати тільки при застосуванні спеціальної апаратури, яка здатна на прецизійні вимірювання. Наші оцінки вказують, що невеликий насос для флоатації на 10 л води потребує енергоживлення ~10 Вт (380 В). Для роботи насосу протягом 20 хв. потрібна акумуляторна батарея ~4,4 Вт год.

Для повного заряду такої батареї протягом доби достатньо сонячної панелі потужністю 1 Вт, та/або маленької вітроелектричної турбіни аналогічної потужності.

Висновки

Звернено увагу наукової спільноти на проблему дефіциту прісної, питної води, на небезпеку мікро- та нанопластика у бутильованій воді. Проведені попередні дослідження ефективності аерації та флоатації при очищенні води від дрібних частинок пластику. Зроблено оцінку основних технічних параметрів автономної установи очищення води, яка зможе працювати від акумуляторної батареї та відновлюваних джерел енергії. Автори планують проводити роботи у напрямку розробки та вдосконалення автономної установки очищення води.

Література

[1]. Нестача води - головний ризик від зміни клімату для України (2021). The New York

Times. / Режим доступу: <https://ecoaction.org.ua/nestacha-vody-ryzyk-ukrainy.html> (дата звернення 05.02.2024).

[2]. Khilchevskiy V., Karamushka V. (2022) Global Water Resources: Distribution and Demand. In: Leal Filho W., Azul A.M., Brandli L., Lange Salvia A., Wall T. (eds) Clean Water and Sanitation. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals. Springer. pp. 240-250. doi:10.1007/978-3-319-95846-0_101.

[3]. Water – at the center of the climate crisis (2022). / United Nations // URL: <https://www.un.org/en/climatechange/science/climate-issues/water> (дата звернення 05.02.2024).

[4]. World Water Report warns of an imminent water crisis (2023) / Unesco // URL: <https://www.unesco.org/en/articles/world-water-report-warns-imminent-water-crisis> (дата звернення 05.02.2024).

[5]. Очищення води за допомогою напірної аерації (2019). Сайт ecosoft-market.com.ua / Режим доступу: <https://ecosoft-market.com.ua/ua/ochistka-vody-s-pomoshchyu-napornoj-aeracii> (дата звернення 05.02.2024).

[6]. Методи аерації води для очищення від заліза, марганцю, сірководню (2020). Сайт: aqua-life.ua / Режим доступу: <https://aqua-life.ua/ua/metody-aeratsii-vody/> (дата звернення 05.02.2024).

[7]. Чмельов І.Ю. Використання напірної флоатації у водопідготовці / І.Ю. Чмельов, О.Г. Ісакієва, В.Ю. Сорокіна // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2017. Вип. № 68. С. 173-178.

[8]. Флотатори для очищення промислових стічних вод (2023) / Режим доступу: <https://ziko.com.ua/ochischennya-promislovih-stokiv-article-flotatory-dlya-ochyshchennya-vody/> (дата звернення 05.02.2024).

[9]. George Z. Kyzas, Kostas A. Matis. Electrofloation process: A review // Journal of Molecular Liquids. 2016-08. Vol. 220. P.657–664. doi:10.1016/j.molliq.2016.04.128

[10]. Rapid single-particle chemical imaging of nanoplastics by SRS microscopy. Naixin Qian, Xin Gao, Xiaoqi Lang, and Wei Min / PNAS. Edited by Eric O. Potma, University of California, Irvine, CA; January 8, 2024. 121 (3) e2300582121. doi:10.1073/pnas.2300582121.

[11]. How much plastic do you eat? It could be as much as a credit card a week (2022) / URL: <https://www.euronews.com/green/2022/04/11/how-much-plastic-do-you-eat-it-could-be-as-much-as-a-credit-card-a-week> (дата звернення 05.02.2024).

[12]. To Waste or Not to Waste: Questioning Potential Health Risks of Micro- and Nanoplastics with a Focus on Their Ingestion and Potential Carcinogenicity. Elisabeth S. Gruber, et. al. *Exposure and Health* (2023), Volume 15, pages 33–51. / URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12403-022-00470-8> (дата звернення 05.02.2024).

[13]. ‘Plasticosis’: Characterising macro- and microplastic-associated fibrosis in seabird tissues. Hayley S. Charlton-Howard, Alexander L. Bond, Jack Rivers-Auty, Jennifer L. Lavers / *Journal of Hazardous Materials*. 2023. Volume 450, 131090. [doi:10.1016/j.jhazmat.2023.131090](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131090).

Відомості про авторів

Вячеслав Скосар, к.ф.-м.н., с.н.с. відділу №6, Інститут транспортних систем і технологій НАНУ, Дніпро, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-2151-3417](https://orcid.org/0000-0002-2151-3417).



Наталія Бурилова, к.ф.-м.н., с.н.с., с.н.с. відділу №7, Інститут транспортних систем і технологій НАНУ, Дніпро, Україна, [ORCID ID: 0000-0003-0474-0236](https://orcid.org/0000-0003-0474-0236).



Олексій Ворошилов, м.н.с. відділу №6, Інститут транспортних систем і технологій НАНУ, Дніпро, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-9937-3637](https://orcid.org/0000-0002-9937-3637).



Сергій Комаров, провідний інженер відділу №6, Інститут транспортних систем і технологій НАНУ, Дніпро, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-6065-9478](https://orcid.org/0000-0002-6065-9478).



ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕМБРАННОГО БЛОКУ ПАЛИВНОГО ЕЛЕМЕНТА

Скосар В.Ю.[✉], Редчиць Д.О., Бурилов С.В., Дзензерський В.О.

Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Україна

Анотація

Ключові слова: паливний елемент, мембранний блок, каталізатор, нікель у вуглецевій оболонці.

Метою дослідження було вдосконалення мембранного блоку воднево-кисневого паливного елемента, за рахунок заміни платини, яка дорого коштує, на механоактивований нікель у вуглецевій оболонці. Проведено попередні випробування лабораторної моделі паливного елемента з вдосконаленим мембранним блоком. Результати свідчать про перспективність подальших досліджень в цьому напрямку.

Вступ

Паливні елементи мають хороші перспективи для застосування як джерела живлення на транспортних засобах, у тому числі, на водному транспорті. Найбільш важлива частина паливного елемента - мембранний блок, де за допомогою каталізаторів відбувається перетворення хімічної енергії палива та окислювача на електричну енергію. Для воднево-кисневих паливних елементів як каталізатори використовують платину та/або платинові метали, що задає високу ціну паливного елемента.

Тому багато розробників намагаються замінити платину більш дешевими і достатньо ефективними каталізаторами. Автори пропонують свою розробку, яка спрямована на вдосконалення мембранного блоку паливного елемента. Замість платини запропоновано використовувати механоактивований нікель у вуглецевій оболонці.

Актуальність досліджень

Розглянемо мембранний блок. Сучасні паливні елементи містять іонообмінну мембрану типу Nafion, або її аналог (МФ-4СК), і шари платинових каталізаторів, які нанесені на обидві сторони мембрани. Це виконується наступними методами: спочатку на вуглецевий носій осаджують платину хімічним методом, або золь-гель методом; потім за допомогою термомеханічного пресування платиновий карбоновий матеріал наносять на обидві поверхні мембрани. При цьому золь-гель метод осадження платини характеризується більш високою якістю, ніж хімічний метод, оскільки він дозволяє досягти більш рівномірного по площі поверхні осадження металу, що призводить до більш ефективного використання металу [1-2].

До протонообмінної мембрани з обох сторін притиснуті пористі газодифузійні шари. Вони не тільки забезпечують підвід і відвід газів, але й працюють як колектори електричного струму. Матеріалами газодифузійних шарів можуть бути: гідрофобізований вуглецевий папір, або вуглецева тканина, котрі непогано проводять електричний струм і такі гази, як водень, кисень або повітря. Далі. До пористих газодифузійних шарів притиснуті біполярні пластини з каналами, за якими підводять гази (водень, кисень або повітря) та відводять продукти реакцій (пари води). Біполярні пластини виготовлені з вуглецевого матеріалу, або металу: нержавіючої сталі, або титану. Звичайно паливні елементи послідовно з'єднують у фільтр-пресовану конструкцію – батарею паливних елементів. В батареї сусідні елементи фізично розділені, але електрично з'єднані біполярною пластиною, яка є часткою катодної камери одного паливного елемента і, одночасно, є часткою анодної камери другого паливного елемента. До останнього часу в якості каталізаторів використовують дорогу платину, або дорогі сплави платини з іншими благородними металами. Для отримання вуглецевого носія з платиною потрібні деякі технологічні операції. Спочатку необхідно платину осадити на вуглецевий носій, наприклад, на вуглецеві нанотрубки, або ацетиленову сажу, або графіт. Потім такий платинований вуглецевий носій необхідно нанести на поверхні протонообмінної мембрани. Крім того, потрібно внести гідрофобізатор (до 10 мас.% фторопласту) для запобігання затоплення каталітичного шару (насамперед, кисневого) водою та видалення води. Недоліком таких паливних елементів все ще залишається висока вартість через високу вартість платинових каталізаторів. У цих паливних елементах витрата платини становить величину приблизно 0,2-0,5 мг/см² [3-8].

Скажемо додатково про каталізатори. Дослідники спробували інші метали, не настільки дорогі як платина, наприклад: Ni, Co, Cr, Al, вони виявляються хімічно нестійкими, особливо на кисневому електроді. До сьогодні крапці лабораторії проводять розробки ефективних і недорогих каталізаторів [3-8].

Викладення основного матеріалу

Як основу для вдосконалення нами взято спосіб виготовлення паливного елемента з розсікачем потоку реагентів та охолоджуючої рідини, згідно патенту [9]. Мембранний блок паливного елемента виготовляють з тонкої протонообмінної мембрани типу Nafion, на котру з обох сторін наносять шари каталізаторів з платини, причому витрата платини становить величину $0,14 \text{ мг/см}^2$. Периферію мембрани навколо активної області затискують між двома жорсткими листами, наприклад, з нержавіючої сталі товщиною $0,254 \text{ мм}/0,010 \text{ дюйма}$, які нарізані у конфігурацію фоторамки, та скріплюють промисловим клеєм. Потім до мембрани з обох сторін притискують пористі провідні, газодифузійні підкладки (з вуглецевої тканини).

Основна ідея авторів полягає в тому, що замість платини використовуються наночастинки нікелю у вуглецевої оболонці, які обробляються за рахунок механоактивації. Такі наночастинки можуть бути отримані способами (технологіями), які вказані, наприклад, у [10]. Причому витрату нікелю встановлюємо в межах $0,20\text{-}0,25 \text{ мг/см}^2$ для водневого каталізатора і $0,80\text{-}1,00 \text{ мг/см}^2$ для кисневого каталізатора. Нікель на три порядку (у ~ 1000 разів) дешевше платини. Тому при вказаних витратах нікелю досягається значне здешевлення паливного елемента. Розмелювання та механоактивація призводить до часткового зняття вуглецевих оболонок з наночастинок нікелю, що створює зони контакту трьох речовин: нікелю, вуглецю, реагентів (водню чи кисню), що, у свою чергу, значно покращує умови каталізу. Крім того, відбувається механоактивація нікелю, що також посилює його каталітичну активність. Оскільки процес ведуть в умовах технічного вакууму менш 100 Па , то запобігається окиснення нікелю, яке різко погіршило б його каталітичну активність. Для кисневого (катодного) каталізатора потрібно менш тривале розмелювання та механоактивація, ніж для водневого (анодного) каталізатора, оскільки кисень сам по собі хімічно агресивний газ, здатний швидко вивести з ладу кисневий каталізатор. Розмелювання та механоактивацію ми проводимо в планетарному кульовому млині PQ-N04.

Вуглецеві нанотрубки в складі каталітичних шарів виконують роль струмопровідного та іонопровідного матеріалу. Крім того, вуглецеві

нанотрубки значно поліпшують проникнення водню чи кисню на всю глибину каталітичних шарів, що забезпечує ефективну роботу нікелю, як каталізатора. При цьому вміст нікелю в суміші наночастинок і нанотрубок повинен бути в межах $20\text{-}35 \text{ мас.}\%$ у водневому і кисневому каталізаторах.

Для перевірки технічного рішення було виготовлено лабораторна модель паливного елемента, робочою площею $1 \times 1 \text{ см}^2$. На одну поверхню протонообмінної мембрани наносено водневий каталізатор з нанотрубками, після чого проведено термомеханічне пресування протягом 5 хв. при 200°C і 65 кгс/см^2 ($6,37 \text{ МПа}$). Потім через $20\text{-}30$ хв. на другу поверхню мембрани нанесено кисневий каталізатор з нанотрубками, після чого проведено аналогічне термомеханічне пресування. Периферію мембрани навколо активної області стиснено між двома металевими листами з нержавіючої сталі товщиною $0,3 \text{ мм}$, які нарізані у конфігурацію фоторамки, та скріплено промисловим клеєм. Потім до мембрани з обох сторін притиснуті пористі провідні, газодифузійні підкладки з вуглецевої тканини Aero (200 г/м^2) при температурі навколишнього середовища і тиску $\sim 120 \text{ кПа}$. Потім до газодифузійних підкладок, тобто – до каталізованого мембранного вузла, притиснуті металеві сітки з нержавіючої сталі, як в [9]; це розсікачі потоків реагентів: водню та кисню. Металеві сітки розташовано усередині прокладок, що у конфігурації фоторамки, які вироблені з силіконової стрічки товщиною $1,5 \text{ мм}$. Також до металевих сіток, які усередині прокладок, притиснуті тонкі металеві фольги з нержавіючої сталі, товщиною $0,3 \text{ мм}$, як в [9]. Електричні контакти випробувальної апаратури приєднано до пари металевих пластин з фольги.

Зразок 1, згідно [9]. Використовували платиновий каталізатор, якій нанесено на порошок графіту (сорту М ГОСТ 10274-79). Нанесення платини виконано шляхом просочення графіту у розчині платино-хлористо-водневої кислоти з наступним термічним відновлення платини у муфельній печі при 310°C . В порошок каталізаторів додавали $5 \text{ мас.}\%$ фторопласту. Витрата платини становила величину $0,13\text{-}0,16 \text{ мг/см}^2$ для обох каталітичних шарів. Шари каталізаторів фіксували на протонообмінній мембрані МФ-4СК за допомогою термомеханічного пресування. Перед проведенням випробувань каналізовану мембрану паливного елемента просочували в 2M розчині сірчаної кислоти. Водень і кисень (реагенти) подавали на рамки з металевими сітками. Тиск реагентів підтримувався в 3 атм . Залежність напруги на паливному елементі від густини електричного струму вказано на рис. 1. Вона практично не змінювалась протягом 500 годин роботи паливного елемента.

Зразок 2. Спочатку виготовлено нікелевий каталізатор, згідно [10]. Вміст нікелю в отриманому порошку досягав 60-65 мас.%. Потім наночастинки нікелю у вуглецевої оболонці піддавали розмелу та механоактивації в планетарному кульовому млині PQ-N04 в умовах технічного вакууму менш 100 Па. Для водневого каталізатора розмелювання і механоактивацію проводили протягом 40 хв, а для кисневого каталізатора - протягом 10 хв.

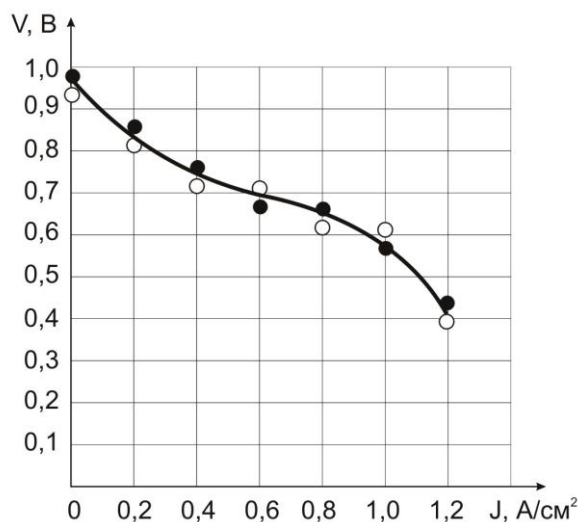


Рисунок 1. Залежність напруги на паливному елементі від густини електричного струму: ● – зразок 1; ○ – зразок 2».

Кожен з двох отриманих порошоків каталізаторів змішували з карбоновими нанотрубками таким чином, що вміст нікелю був в межах 25 і 32 мас.% у водневому і кисневому каталізаторах, відповідно. В порошки каталізаторів додавали 5 мас.% фторопласту.

Розрахункова витрата нікелю становила величини 0,25 і 0,90 мг/см² для водневого і кисневого каталізаторів, відповідно. Шари каталізаторів фіксували на протонообмінній мембрані МФ-4СК за допомогою термомеханічного пресування. Перед проведенням випробувань каналізовану мембрану паливного елемента просочували в 2М розчині сірчаної кислоти. Водень і кисень подавали на рамки з металевими сітками. Тиск реагентів підтримувався в 3 атм. Залежність напруги на паливному елементі від густину електричного струму вказано на рис. 1. Вона практично не змінювалась протягом 500 годин роботи паливного елемента. Як ми бачимо з рис. 1, робота моделі паливного елемента, виготовленого згідно нашому технічному рішенню (зразок 2), практично не відрізняється від роботи паливного елемента, виготовленого згідно [9] (зразок 1). Але, оскільки в [9] використовувалась платина з витратою 0,13-0,16 мг/см², а в нашому технічному рішенні використовувався нікель з витратою 0,25-0,90 мг/см², який в ~ 1000 разів

дешевше платини, то наше технічне рішення має перевагу і перспективу.

Для більш ефективного використання каталізатора необхідно забезпечити більш рівномірний потік водню та кисню на мембранний блок. А це потребує вдосконалення розсікачів потоків реагентів.

Висновки

Авторами вдосконалено мембранний блок воднево-кисневого паливного елемента, проведено попередні випробування лабораторної моделі паливного елемента. Результати свідчать про перспективність подальших розробок у напрямку вдосконалення мембранного блоку, а також розсікачів потоків реагентів, що дозволить більш ефективно використовувати каталізатор.

Література

- [1]. Смирнова, Е.В. Ионизация водовода в анодно-мембранном блоке водород-кислородного топливного элемента [Текст] / Е.В. Смирнова, В.М. Серебринский // *Питання хімії та хімічної технології*. 2011, №4 (2). С. 188-190.
- [2]. Silicon oxide Nafion composite membranes for proton-exchange membrane fuel cell operation at 80-140 °C / K. T. Adjemian, S. J. Lee, S. Srinivasan, J. Benziger, A. B. Bocarsly // *J. Electrochem. Soc.* 2002. №3. P. A256-A261.
- [3]. Смирнова, Е.В. Влияние носителя платинового катализатора на характеристики кислородно-водородного мембранного топливного элемента [Текст] / Е.В. Смирнова, Н.Д. Кошель // *Питання хімії та хімічної технології*. 2013, №2. С. 134-138.
- [4]. Chen, S.-L., Krishnan, L., Srinivasan, S., Benziger, J., Bocarsly, A.B. Ion exchange resin/polystyrene sulfonate composite membranes for PEM fuel cells [Text] // *Journal of Membrane Science*. 2004. No 243. P. 327-333. [doi:10.1016/j.memsci.2004.06.037](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2004.06.037).
- [5]. Passalacqua, E., Lufrano, F., Squadrito, G., Patti, A., Giorgi, L. Nafion content in the catalyst layer of polymer electrolyte fuel cells: effects on structure and performance [Text] // *Electrochimica Acta*. 2001. No. 46. P. 799-805. [doi:10.1016/S0013-4686\(00\)00679-4](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(00)00679-4).
- [6]. Pat. № 5482792 US. МПК⁶ H01M 8/00, H01M 2/20. Electrochemical cell provided with ion exchange membranes and bipolar metal plates [Text] / Giuseppe Faita; Claudio Mantegazza / - № 227,006. Apr.13, 1994. Date of Patent: Jan.9, 1996.
- [7]. Loffler, M. S. Preparation and characterization of Pt-Ru model electrodes for the direct methanol fuel cell [Text] / Loffler M.S., Natter H.,

Hempelmann R., Wippermann K. // *Electrochimica Acta*. 2003. No. 48. P. 3047-3051.

[8]. Identification of carbon-encapsulated iron nanoparticles as active species in non-precious metal oxygen reduction catalysts / Jason A. Varnell, Edmund C. M. Tse, Charles E. Schulz, Tim T. Fister, Richard T. Haasch, Janis Timoshenko, Anatoly I. Frenkel⁵ & Andrew A. Gewirth // *Nature Communications*. Published 19 Aug 2016. URL: <https://www.nature.com/articles/ncomms12582>.

(дата звернення 26.02.2024).

[9]. Pat. № 6207310 US. МПК⁷ H01M 8/04. Fuel cell with metal screen flow-field [Text] / Mahlon S. Wilson; Christine Zawodzinski. - № 09/449,514. Nov.24, 1999. Date of Patent: Mar.27, 2001.

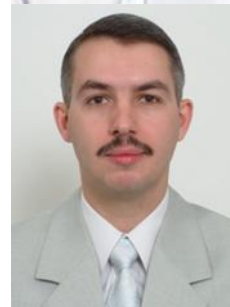
[10]. Пат. № 109666 Україна. МПК (2015.01) B82M 30/00, B82M 40/00, B22F 9/22 (2006.01), B22F 9/30 (2006.01), C01G 53/00 (2015.01), C01B 31/00 (2015.01). Спосіб одержання нікель-карбонного нанокompозита [Текст] / В.А. Литвин, Р.В. Галатан, Я.Д. Король - № а201303094, 13.03.2013. Опубл. 25.09.2015. - Бюл.№18.

Відомості про авторів

Вячеслав Скосар, к.ф.-м.н., с.н.с. відділу №6, Інститут транспортних систем і технологій НАНУ, Дніпро, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-2151-3417](https://orcid.org/0000-0002-2151-3417).



Дмитро Редчиць, д.ф.-м.н., с.н.с., завідувач відділом №7, заступник директора, Інститут транспортних систем і технологій НАНУ, Дніпро, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-8538-6026](https://orcid.org/0000-0001-8538-6026).



Сергій Бурилов, к.ф.-м.н., с.н.с., провідний науковий співробітник, завідувач відділом №6, заступник директора з наукової роботи, Інститут транспортних систем і технологій НАНУ, Дніпро, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-8070-6764](https://orcid.org/0000-0001-8070-6764).



Віктор Дзензерський, д.т.н., професор, головний науковий співробітник, завідувач відділом №2, директор, Інститут транспортних систем і технологій НАНУ, Дніпро, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-5504-4524](https://orcid.org/0000-0002-5504-4524).



ВИКОРИСТАННЯ ТРИФАЗНИХ АКТИВНИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ НАПРУГИ З ФУНКЦІЄЮ РЕКУПЕРАЦІЇ ЄНЕРГІЇ

Багач Р.В.[✉], Гнатів А.В.[✉], Аргун Ш.В.[✉]

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Анотація

Ключові слова: трифазні активні випрямлячі напруги, функція рекуперації, широко-імпульсна модуляція, коефіцієнт потужності, перетворювач частоти, автономний інвертор напруги

У статті розглянуто призначення активних випрямлячів. Проаналізовано переваги та недоліки різних типів активних випрямлячів, зокрема трифазних активних випрямлячів (AFE), що забезпечують функцію рекуперації енергії. Розглянуто методи управління енергією під час експлуатації частотних електроприводів, з акцентом на покращення коефіцієнта потужності за допомогою впровадження модулів AFE. Наведено приклади практичного використання трифазних випрямлячів AFE з функцією рекуперації енергії в силових електричних пристроях, що підтверджують їх високу ефективність та потенціал для оптимізації енергоспоживання в різноманітних електротехнічних системах.

Вступ

Зі зростанням кількості електромобілів актуальною проблемою є наявність енергоефективних зарядних станцій. Тому завдання дослідників полягає у створенні зарядних станцій, які б дозволили забезпечити низький рівень втрат потужності у перетворювачі зарядної станції, забезпечили вимоги електромагнітної сумісності та мали змогу забезпечити режим швидкого заряджання. Питання покращення параметрів енергоефективності перетворювачів зарядних станцій електромобілів, підвищення ККД, зниження рівня вищих гармонік струмів та реалізація режиму швидкого заряджання тягових акумуляторних батарей електромобілів можуть вирішувати трифазні активні випрямлячі напруги [1-3].

Актуальність досліджень

Трифазні активні випрямлячі напруги AFE відносяться до порівняно нового класу перетворювачів, які можуть працювати у режимі випрямлення та інверторному режимі, передаючи енергію з мережі змінного струму в ланцюг постійного та назад, тобто змінюючи напрямок потоку потужності. При цьому змінюється напрямок струму при незмінній полярності напруги.

У цих перетворювачах покращено гармонійний склад струму, що споживається з мережі, а також є можливість отримання бажаного

значення коефіцієнта потужності, зокрема близького до одиниці [4].

Трифазні активні випрямлячі напруги AFE можуть застосовуватися у трьох випадках:

- для отримання стабільної постійної напруги від змінної мережі з можливістю рекуперації енергії;
- в якості першої ланки у дволанкових перетворювачах для живлення двигунів постійного струму з можливістю регулювання швидкості та рекуперативного гальмування;
- в якості першої ланки у дволанкових перетворювачах для живлення асинхронних двигунів з можливістю регулювання швидкості та рекуперативного гальмування.

Метою роботи є дослідження практичного використання трифазних випрямлячів напруги з функцією рекуперації енергії в сучасних електротехнічних системах.

Викладення основного матеріалу

Випрямляч – це пристрій для перетворення змінної напруги в постійну. Існують некеровані випрямлячі, які використовують діоди, та керовані випрямлячі, що застосовують тиристори або інші керовані напівпровідникові прилади. Випрямлення ґрунтується на здатності цих елементів проводити струм в одному напрямку, дозволяючи ефективно перетворювати змінний струм на постійний з мінімальними втратами енергії.

Однак, через те що випрямлячі споживають з мережі несинусоїдальний струм, виникає спотворення форми напруги живлення, що може призвести до різних несправностей [4].

Управління випрямлячем збільшує коефіцієнти несинусоїдальності струму та напруги, викликаючи такі проблеми:

- спотворення форми напруги живлення;
- падіння напруги в розподільчій мережі;
- резонансні явища на частотах вищих гармонік;
- наведення перешкод в телекомунікаційних та керуючих мережах;
- підвищений акустичний шум в електромагнітному обладнанні;
- вібрації в електромашинних системах;
- зниження електричної та механічної ефективності навантажень;
- погіршення характеристик захисних автоматів;
- завищення необхідної потужності для автономних електроенергетичних установок;
- нагрів та додаткові втрати в трансформаторах та електричних машинах;
- підвищення температури конденсаторів;
- нагрівання кабелів розподільної мережі.

Для вирішення вищезазначених проблем рекомендується використовувати активний випрямляч, рис. 1 [5].



Рисунок 1. Активний випрямляч з функцією рекуперації

Такі випрямлячі комплектуються повністю керованими вентилями із зворотними діодами. За допомогою широтно-імпульсної модуляції реалізуються режими примусового формування мережного струму. Форму струму наближають до синусоїдальної з регульованою початковою фазою, що забезпечує бажаний результат (форму кривої струму і коефіцієнт потужності). За допомогою корекції коефіцієнта потужності можливо не

тільки організувати споживаний струм мережі, що збігається за формою та фазою з напругою, але й забезпечити заданий рівень постійної напруги на конденсаторі. Крім того, в електроприводі за рахунок зв'язку інвертора-випрямляча з мережею живлення, можлива зворотна рекуперація енергії, одержувана при роботі приводу в генераторному режимі [5].

Найбільш масове практичне застосування в системах регульованих електроприводів змінного струму отримали дволанкові перетворювачі частоти з проміжною ланкою постійного струму, а з них – перетворювачі з автономними інверторами напруги.

У цих перетворювачах не повністю вирішені деякі питання енергозбереження, якості електроспоживання та електромагнітної сумісності. При використанні пасивного випрямляча, що складається з діодного моста і фільтруючого конденсатора, незважаючи на малі пульсації випрямленої вихідної напруги, на вході отримуємо несинусоїдальний струм з великими піковими значеннями. Це призводить до значного зниження коефіцієнта потужності системи та викликає суттєві радіоперешкоди. Форму струму можна поліпшити, додаючи до ланцюга додаткові пасивні елементи, але це збільшує масогабаритні параметри пристрою через роботу реактивних компонентів на відносно низьких частотах. Крім цього, випрямляч передбачає потік енергії тільки в одному напрямку – від мережі до навантаження. Проблема перенапруги у ланцюзі постійного струму, що виникає при гальмуванні приводу (особливо за великої потужності), у цьому типі перетворювача зазвичай вирішують за допомогою гальмівного резистора великої потужності, перетворюючи зайву енергію в тепло, рис. 2.

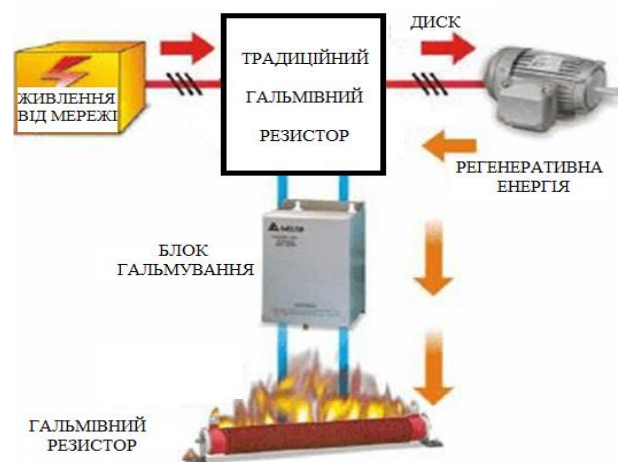


Рисунок 2. Стандартне підключення ПЧ

На рис. 3 представлені методи управління енергією під час роботи частотного електропривода.

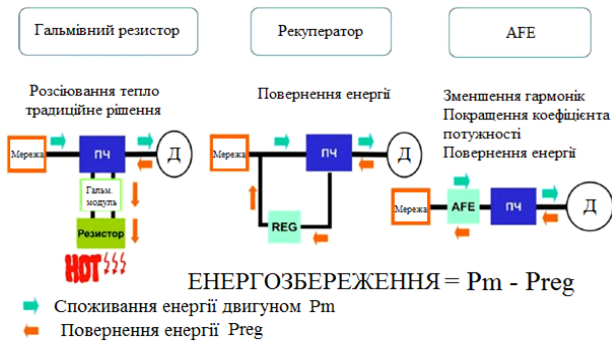


Рисунок 3. Управління енергією

Використання в ланці постійного струму випрямлячів з примусовою комутацією може значно покращити характеристики перетворювачів частоти (ПЧ). Це дозволяє активно управляти процесом перетворення енергії, зменшуючи втрати потужності та покращуючи якість електроенергії на виході. Структура силових ланцюгів дволанкового ПЧ з активним випрямлячем напруги представлена на рис. 4.

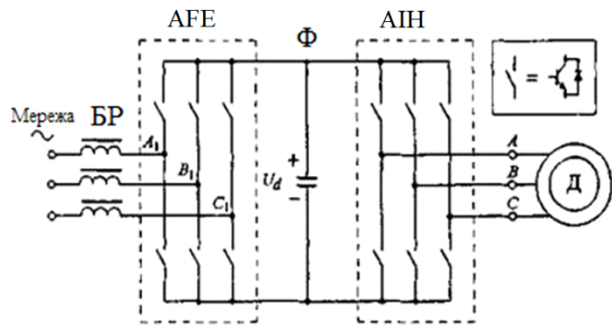


Рисунок 4. Структура силових ланцюгів дволанкового ПЧ

В силовому ланцюзі послідовно увімкнений активний випрямляч напруги AFE, фільтр Φ та автономний інвертор напруги АН формують комплексну систему управління електроенергією. Силові напівпровідникові перемикачі випрямляча та інвертора, здатні до повного управління і забезпечують двосторонню провідність струму, символічно зображені у вигляді ключів. AFE, реалізований на основі трифазної мостової схеми, перетворює вхідну змінну напругу мережі в стабілізовану напругу постійного струму U_d на конденсаторі фільтра. Трифазна мостова схема АН, працюючи в режимі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), перетворює стабілізовану постійну напругу назад у змінну напругу на виході з потрібними параметрами частоти та амплітуди основної гармоніки. Це дозволяє забезпечити оптимальну форму струму для двигуна та забезпечує його плавну роботу при різних швидкостях, що значно підвищує ефективність і надійність роботи системи [6-7].

Активний випрямляч, реалізований за схемою, що повністю ідентична схемі інвертора, фактично є інвертованим автономним інвертором напруги, який також працює в режимі ШІМ. Подібно до автономного інвертора, активний випрямляч перетворює постійну напругу фільтруючого конденсатора U_d в імпульсну напругу на своїх виводах змінного струму А, В і С. Ці виводи підключені до мережі живлення через буферні реактори (БР). Відмінність полягає в тому, що, на відміну від автономного інвертора, де регульована робоча частота напруги на виводах змінного струму (A_1, B_1 і C_1) може змінюватися, робоча частота напруги на виводах змінного струму активного випрямляча AFE залишається постійною і відповідає частоті мережі живлення.

Різниця між миттєвими значеннями синусоїдальної напруги мережі живлення та імпульсної напруги на виводах змінного струму AFE компенсується за допомогою буферних реакторів (БР), які є ключовими компонентами системи. Їх індуктивність не тільки допомагає у підвищенні ефективності роботи перетворювача, але й сприяє згладжуванню перепадів напруги, забезпечуючи стабільну роботу системи.

Завдяки використанню режиму ШІМ, імпульсна напруга, що формується активним випрямлячем на стороні змінного струму, характеризується сприятливим гармонійним складом. В цьому складі основна гармоніка (корисна) та вищі гармоніки відзначаються значними відмінностями за частотою, що спрощує процес фільтрації вищих гармонік струму, споживаного з мережі, за допомогою буферних реакторів. Такий підхід дозволяє забезпечити споживання майже ідеально синусоїдального струму з мережі. Фазовий кут споживаного струму визначається взаємозв'язком амплітуд і фазових кутів напруг, прикладених до реакторів з боку мережі та активного випрямляча, а також параметрами самого реактора, зокрема його індуктивністю та активним опором.

Варіюючи за допомогою системи управління AFE параметрами основної гармоніки його змінної напруги на затискачах A_1, B_1 і C_1 , можна забезпечити споживання з мережі необхідного струму з заданим фазовим кутом [6-7]. Це означає, що можливе управління перетворювачем частоти таким чином, щоб забезпечити роботу з оптимальним коефіцієнтом потужності, який може бути як нейтральним (рівним одиниці), так і з випередженням або відставанням, залежно від потреб системи.

Як перетворювач енергії постійного струму в енергію змінного струму, автономний інвертор володіє особливо цінною здатністю до двостороннього енергетичного обміну між мережами постійного та змінного струму. Ця унікальна

властивість також притаманна інвертору, коли він функціонує як активний випрямляч в інверсній схемі включення. Отже, дволанковий перетворювач частоти з активним випрямлячем дозволяє здійснювати двосторонній енергообмін між мережею живлення та електричним двигуном, включаючи режими рекуперації енергії назад в мережу. Це відкриває можливості для створення енергозберігаючих систем електроприводу, які можуть бути застосовані у різноманітних сферах з високим рівнем ефективності використання електроенергії, рис. 5.

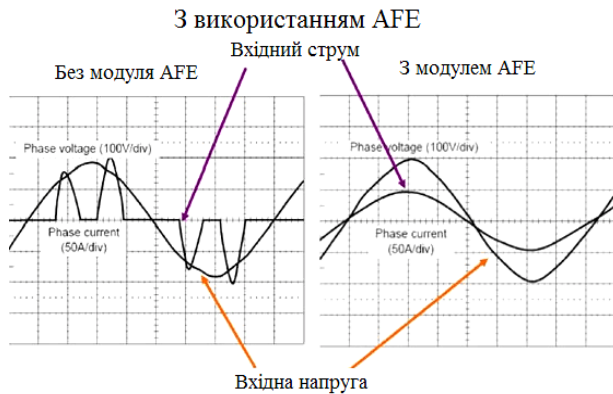


Рисунок 5. Корекція коефіцієнта потужності

Delta Electronics представила на вітчизняному ринку модуль AFE, що є важливим кроком у напрямку енергоефективності та інноваційних технологій. Компанія SECOM розробила серію перетворювачів AFE з потужністю 100 кВт, демонструючи можливості сучасних технологій у сфері управління енергією. Регенеративний модуль AFE від SECOM зберігає переваги модульності моделей ФЗЕ та інверторів низької напруги, дозволяючи паралельне підключення до 8 модулів, що робить ці системи дуже гнучкими та ефективними для широкого спектру застосувань, зокрема в секторі важкої промисловості [8].

В умовах зростання цін на енергоресурси та підвищення вимог до якості електроенергії, українські підприємства активно шукають способи економії енергоспоживання. Використання трифазних активних випрямлячів AFE з функцією рекуперації енергії відкриває нові можливості для зниження енерговитрат і покращення екологічних показників виробництва. Застосування цих технологій особливо актуальне при створенні зарядних станцій та розробці силових електричних пристроїв, де ефективність використання електроенергії та можливість її відновлення мають критичне значення.

Висновки

Проведені дослідження трифазних випрямлячів AFE з функцією рекуперації енергії підтверджує, що ці пристрої відкривають реальні

можливості для підвищення енергоефективності в широкому спектрі силових електричних систем. Застосування таких випрямлячів дозволяє не лише підвищити ефективність перетворення енергії в зарядних станціях для електромобілів, забезпечуючи високий ККД і зниження впливу вищих гармонік на електромережу, але й реалізувати ефективні режими швидкого заряджання тягових акумуляторних батарей.

Ці технології знаходять своє застосування не тільки в автомобільній промисловості, але й у важкій промисловості, де процеси гальмування або інші динамічні навантаження можуть генерувати значні кількості рекуперованої енергії. Таким чином, випрямлячі AFE забезпечують ефективне використання цієї енергії, перетворюючи навантаження в потенційні джерела живлення, що може включати в себе батареї, суперконденсатори чи великі магніти.

Головною перевагою використання таких систем є значна економія енергоресурсів, що в умовах зростання цін на енергоносії та збільшення вимог до екологічності виробництва є актуальним для багатьох галузей промисловості. Впровадження технологій з використанням випрямлячів AFE дозволяє не тільки знизити вартість виробництва за рахунок зменшення споживання енергії, але й сприяє підвищенню загальної енергетичної ефективності економіки, що є ключовим фактором сталого розвитку.

Література

- [1]. Гнатів О.В. Електромобілі – майбутнє, яке вже настало / О.В. Гнатів, Щ.В. Аргун, О.А. Ульянець // Автомобіль та електроніка. Сучасні технології: електронне наукове спеціалізоване видання. - Х.: ХНАДУ, 2017. - № 11. - С. 24-28. – ISSN 2226-9266.
- [2]. Нерубацький, В.П., Плахтій, О.А., Машура, А.В., & Гордієнко, Д.А. (2019). Аналіз технічних характеристик акумуляторних батарей і систем заряджання електромобілів. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, 24(6), 11-19. DOI:10.18664/iksz.v24i6.185510
- [3]. Будько, В.І. (2016). Аналіз доцільності впровадження зарядних станцій електромобілів на основі відновлюваних джерел енергії в Україні. Відновлювана енергетика, (4), 32-41. ISSN 1819-8058.
- [4]. Енергетична електроніка: навчальний посібник / О.О. Павльокін. – К. : КНУТД, 2017. – 396 с. ISBN 978-966-7972-75-2. УДК 621.314.1/.6(075.8)
- [5]. RTS - Ukraine - офіційний дистриб'ютор та сервісний центр компанії Delta Electronics в

Україні. Режим доступу: <https://delta-electronics.com.ua/ua/>

[6]. Багач, Р. (2023). Дослідження акумуляторних блоків електромобілів та зарядних станцій на основі активного трифазного випрямляча струму. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*, (24), 62–71. DOI: [10.30977/VEIT.2023.24.0.2](https://doi.org/10.30977/VEIT.2023.24.0.2).

[7]. Нерубацький, В.П., Плахтій, О.А., Машура, А.В., Гордієнко, Д.А., Варв'янська В.В. (2021). Синтез регулятора вихідної напруги активного чотириквADRантного випрямляча. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, 198, 131-144. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.198.2021.256643>

[8]. Secom. Power Electronic Equipment & Components. Режим доступу: <https://www.secompower.com/ru/ac-dc-power-converters/>

Відомості про авторів

Руслан Багач, асистент кафедри автомобільної електроніки, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, [ORCID ID: 0000-0003-0157-5933](https://orcid.org/0000-0003-0157-5933).



Андрій Гнатов, д.т.н, професор, завідувач кафедри автомобільної електроніки, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, [ORCID ID: 0000-0003-0932-8849](https://orcid.org/0000-0003-0932-8849).



Щасяна Аргун, д.т.н, професор, професор кафедри автомобільної електроніки, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-6098-8661](https://orcid.org/0000-0001-6098-8661).



ДОСЛІДЖЕННЯ І МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ЗАРЯД/РОЗРЯДНИХ ПРОЦЕСІВ $\text{Fe}/\text{Fe}(\text{OH})_2$ ЕЛЕКТРОДІВ ЛУЖНИХ АКУМУЛЯТОРІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Костиря М.В.[✉], Кошель М.Д., Корпач С.В.

Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Україна

Анотація

Ключові слова: Акумулятор, вуглецеві матеріали, електрод, заряд/розряд, ємність, оксид заліза.

Методом потенціодинамічного циклювання досліджено електрохімічну поведінку пресованих залізних електродів. Представлено спрощена математична модель та результати моделювання заряд/розрядних процесів залізо-оксидних електродів. Математична модель призначена для обробки та аналізу експериментальних вольт-амперограм.

Вступ

Лужні акумулятори досі використовуються, де потрібна стабільність, потужність та довге життя акумулятора. Перспективність лужних акумуляторів визначається не лише великим ресурсом, а також високою механічною міцністю та простотою експлуатаційного обслуговування. Лужні акумулятори є більш екологічно безпечними, оскільки не містять важких металів (свинцю та кадмію, ртуті).

Актуальність досліджень

Останнім часом характеристики лужних акумуляторів значно покращено: зросла ємність акумуляторів при низьких щільності струму розряду, збільшено допустимі розрядні струми, тому завданням подальшого підвищення цих характеристик може бути удосконалення технології виготовлення активного матеріалу залізо-оксидних електродів лужних акумуляторів, а також застосування нових матеріалів.

Викладення основного матеріалу

Функціональні характеристики акумуляторних електродів визначаються властивостями матеріалів, з яких виготовляють електроди. Активним матеріалом негативних електродів нікель-залізного акумулятора є порошок заліза та його оксиди.

У повідомленні [1] була представлена техніка мультифрактального аналізу на прикладі одного порошку оксиду заліза. У [2] наведені результати мультифрактального аналізу порошоків оксиду заліза, виготовлених за різними технологіями. Встановлено зв'язок між фрактальними і функціональними властивостями пресованого залізного електрода лужного акумулятора [3].

Доведено, що функціональні властивості електродів $\text{Fe}/\text{Fe}(\text{OH})_2$, залежать від поверхні порошоків.

Мета даній роботи – дослідження і моделювання динаміки заряд/розрядних процесів акумуляторних залізо-оксидних електродів $\text{Fe}/\text{Fe}(\text{OH})_2$.

Одержано залізні порошки за трьома технологіями.

Синтез 1. Процес синтезу порошку гідроксиду заліза проводили з концентрованих розчинів FeSO_4 і NaOH швидким змішуванням при 16°C .

Синтез 2. Процес проводили з розбавлених розчинів FeSO_4 і NaOH .

Синтез 3. Оксид заліза синтезували змішуванням розчинів $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ і NaOH з молярним співвідношенням FeSO_4 до NaOH 1:2 і з добавкою в розчин 3% мас. вуглецевих нанотрубок. Утворений порошок $\text{Fe}(\text{OH})_2$ після сушки при 120°C був відновлений в кварцовій трубці в струмені осушеного водню при 580°C протягом 90 хвилин.

Фотографії залізних порошоків виконували за допомогою оптичного мікроскопа МБІ-11 з оптичним збільшенням $\times 400$. На рисунку 1 наведені фотографії залізних порошоків, які синтезовані різними способами.

Електрохімічні властивості пресованих залізних електродів в процесах заряду/розряду вивчали методами потенціодинамічного циклювання. Першу групу дослідів з метою з'ясування характеристик основних процесів виконували на електродах із чистого полірованого заліза (рис. 2а).

Друга група дослідів була виконана на пористих електродах. Були синтезовані електродні

матеріалі залізних електродів, що містять в активній масі добавки різних вуглецевих матеріалів (графіт, сажа, вуглецеві нанотрубки і нановолокна). Як приклад, на рис. 2б зображено потенціодинамічні криві пресованого залізного електроду, що містить вуглецеві нанотрубки, на

рис. 3 – потенціодинамічні криві електрода (ПДК), який виготовлений з порошку гідроксиду заліза і потім відновлений при 800°C у водні (а), та електрода з невідновленого порошку гідроксиду заліза (б).

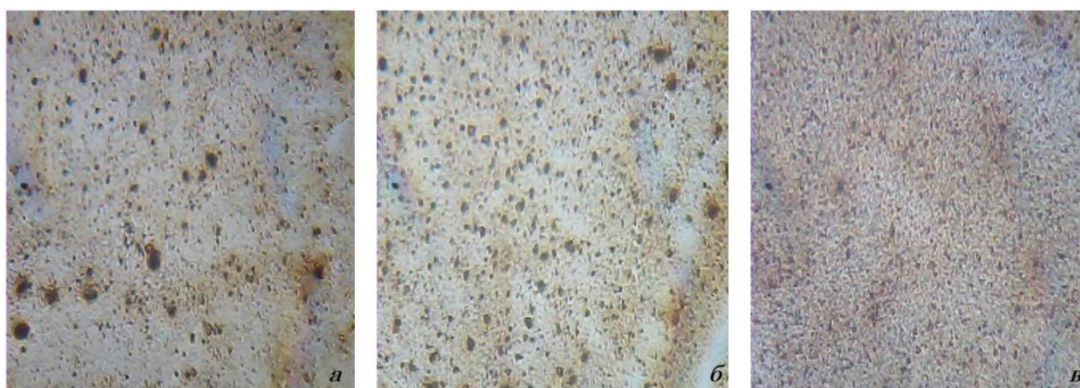


Рисунок 1. Фотографії залізних порошоків, що виготовлені способами: а – синтез 1, б – синтез 2, синтез 3

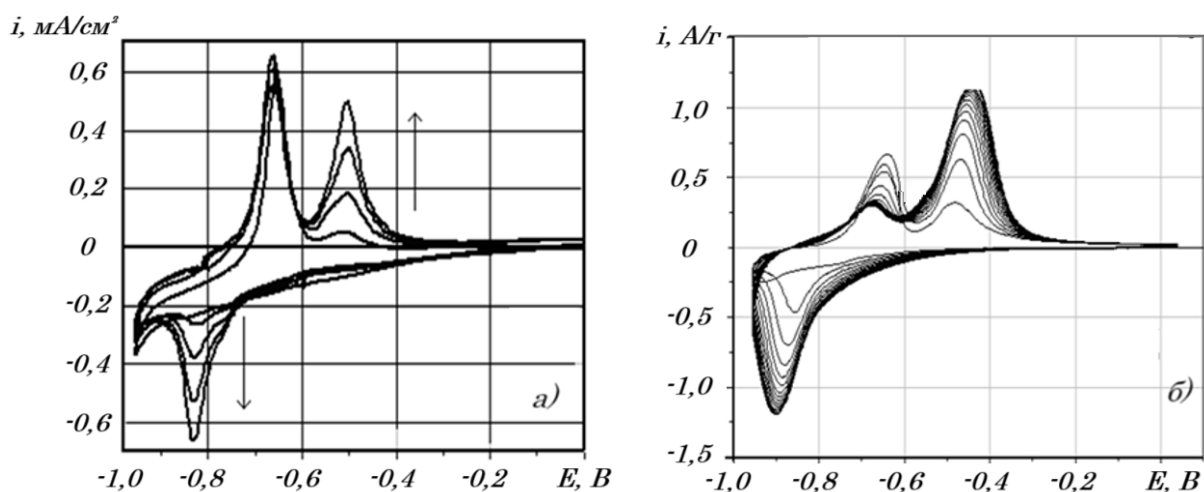


Рисунок 2. Потенціодинамічні криві гладкого (а) та пористого залізних електродів (б)

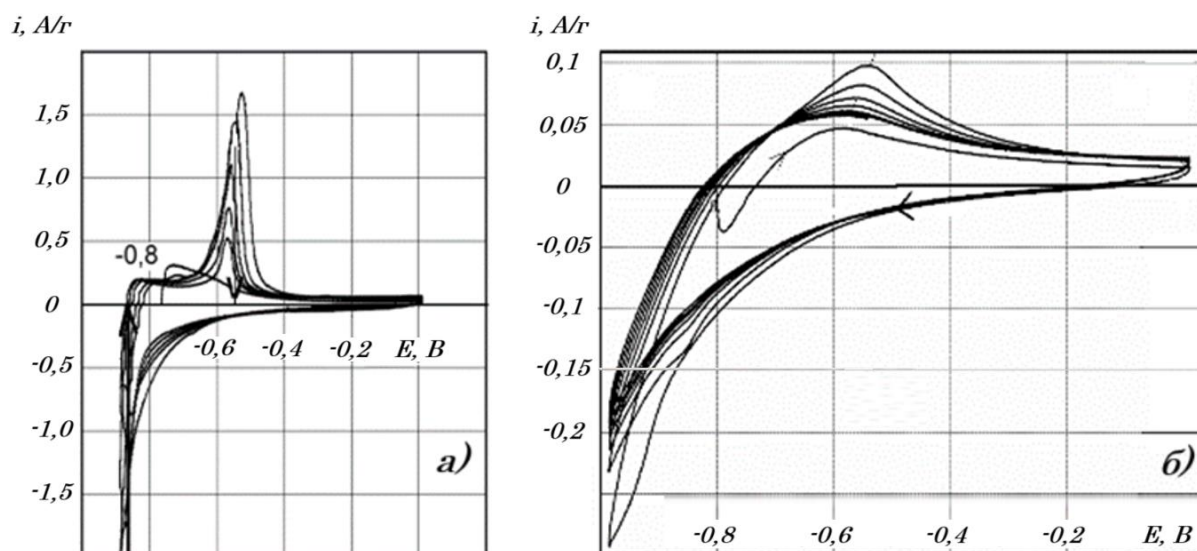


Рисунок 3. Потенціодинамічні криві електродів, які виготовлені з відновленого у водні порошку гідроксиду заліза (а), і з невідновленого порошку гідроксиду заліза (б)

Як демонструють рисунки, форми потенціодинамічних залежностей суттєво відрізняються між собою, вони різняться залежно від дисперсності порошку, фазового складу, який у свою чергу визначається технологією виготовлення залізного порошку та інше.

Для розуміння механізмів процесів, що мають місце в електроді, та їх взаємодії при заряд/розряді, корисно проаналізувати динаміку заряд/розрядних процесів на математичній моделі та оцінити кореляції між спостережуваними та модельованими властивостями електродів. Для опису процесів активну масу електрода розглядали як одиничний сферичний фрагмент із заданим радіусом r_s (рис. 4).

У середині елементарного фрагмента в електроді, що заповнює, розташовуються сферичні твердофазні елементи чотирьох фаз - двох форм гідроксидів, електропровідної добавки і металу. Об'єми окремих твердих фаз задані початковими радіусами одиничних сфер. Сума об'ємів всіх фаз постійна, об'єм електроліту визначається за її різницею з об'ємом моделі. Структура системи початку процесу задається розподілом первинного елемента кожної твердої фази на довільне задане число, за збереження постійного обсягу.

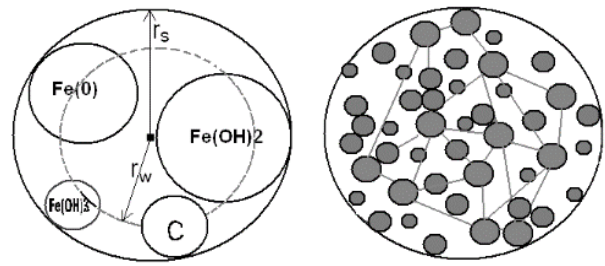


Рисунок 4. Схема емульсійної моделі активної маси залізного електрода (перетин)

Така модель дозволяє конструювати довільну структуру – з будь-якими розмірами частинок та співвідношеннями, інакше кажучи, структуру у стані довільного ступеня зарядженості.

У процесі заряджання або розрядження співвідношення обсягів фаз, що реагують, і розміри частинок безперервно змінюються відповідно до матеріального балансу і щільностей фаз. Фаза вуглецевої добавки бере участь у всіх процесах, крім анодного розчинення заліза.

На рис. 5 наведено модельні заряд/розрядні залежності при потенціодинамічному циклюванні електродів Fe/Fe(OH)₂.

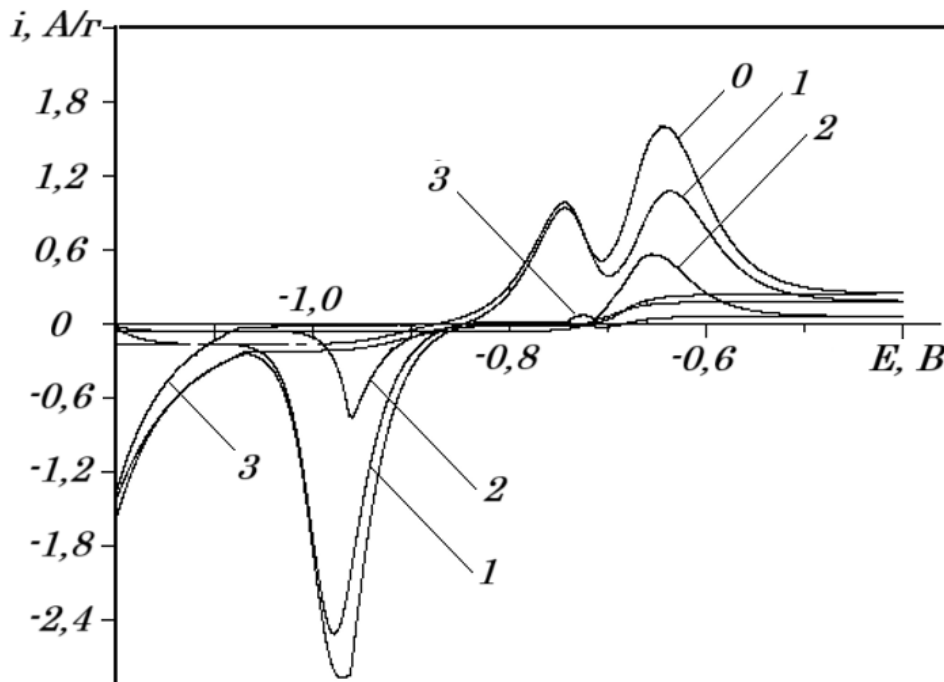


Рисунок 5. Модельні потенціодинамічні криві при щільності струму обміну 10^{-6} A/cm^2

Результати моделювання процесів на описаній спрощеній моделі дозволяють оцінити механізм формування деяких елементів потенціодинамічних характеристик електрода та зробити певні висновки, наприклад, формування піків струму відбувається внаслідок зниження та збільшення концентрації розчинної форми заліза на межах поверхні частинок активної маси електродів.

Висновки

Наведені результати свідчать, що комп'ютерне моделювання заряд/розрядних процесів на залізному електроді може бути корисним для аналізу експериментальних даних. Однак описана найпростіша модель не охоплює більш тонких елементів процесів, таких як відмінності в

поведінці різних форм твердофазних оксидів заліза, пасивної та активної форм поверхні кристалів металу та інше, і потребує подальшого вдосконалення.

Література

[1]. Кошель Н.Д., Костыря М.В., Корпач С.В. Мультифрактальний аналіз порошоків оксидів заліза. Вопросы химии и химической технологии. 2018. Т. 1. С. 22-30.

[2]. Костыря М.В., Корпач С.В., Кошель М.Д. Порівняння геометричних властивостей порошоків оксидів заліза методами мультифрактального аналізу // Електрохімія сьогодні: здобутки, проблеми та перспективи: збірник матеріалів колективної монографії ІХ Українського з'їзду з електрохімії. Київ, 2021. С. 116-117.

[3]. Костыря М.В., Корпач С.В., Кошель М.Д. Мультифрактальний аналіз і функціональні властивості акумуляторних електродів Fe/Fe(OH)₂ транспортних засобів // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування: збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції. Херсон, 2023. С. 173-175.

Відомості про авторів

Марина Костыря, к.т.н., с.н.с., провідний науковий співробітник, Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-6076-4481](https://orcid.org/0000-0001-6076-4481).



Микола Кошель, д.х.н., професор, головний науковий співробітник, Інститут транспортних систем і технологій НАН України, м. Дніпро, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-6979-7546](https://orcid.org/0000-0001-6979-7546).



Світлана Корпач, провідний інженер, Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна, [ORCID ID: 0000-0003-4945-9632](https://orcid.org/0000-0003-4945-9632).



ДЕЯКІ ПИТАННЯ ВИКОРИСТАННЯ АМІАКУ ЯК ПАЛИВО НА СУДНІ

Кісетов Ю.В.✉

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

Анотація

Ключові слова: ІМО, декарбонізація, аміак, резервуари зберігання аміаку, типи резервуарів, вимоги до резервуарів, ризики використання аміаку.

Беручи до уваги майбутні норми викидів та вимоги до альтернативних видів палива, необхідним є аналіз впливу таких нових технологій на навколишнє середовище, людей, суднове обладнання. У доповіді розглянуто питання особливостей зберігання на судні аміаку при використанні його як палива для енергетичної установки.

Вступ

Міжнародна морська організація (ІМО), яка регулює і контролює дію світового судноплавства на навколишнє середовище, регламентує зменшення викидів в процесі експлуатації флоту з часом за рахунок використання нових видів палива, зокрема аміаку [1, 2]. При цьому виникає низка специфічних питань, пов'язаних з проблемами безпеки для нових паливних технологій.

Актуальність досліджень

Використання аміаку як паливо створює деякі додаткові проблеми на етапі проектування судна, двигунів та пов'язаних із ними систем. Для цього необхідно провести оцінку ризиків, пов'язаних з аміачним паливом, що впливають на людей на борту, довілля та суднове обладнання [3].

Викладення основного матеріалу

Розглянемо деякі питання, пов'язані зі зберіганням аміаку на судні.

До резервуарів (паливних цистерн) для зберігання аміаку необхідно враховувати такі вимоги [3, 4]:

- резервуари повинні бути захищені від механічних пошкоджень, які можуть виникнути під час експлуатації судна.
- резервуари повинні бути захищені від зовнішніх пошкоджень, які можуть виникнути у разі зіткнення або посадки на мілину.
- з'єднання резервуарів повинні розташовуватися вище за найвищий рівень рідини в резервуарі;
- повинні бути передбачені впускні та випускні клапани резервуара з аміаком. Рекомендується

розміщувати ці клапани якомога ближче до резервуарів;

- необхідно враховувати можливе розрідження в резервуарі для аміаку;

- під час нормальної роботи резервуари не можна скидати безпосередньо в атмосферу. Скидання парів палива для регулювання тиску в баку не допускається, за винятком аварійних ситуацій;

- запобіжний клапан (клапани) для зберігання аміаку повинен відкриватися тільки у разі надлишкового тиску, що виник внаслідок пожежі поблизу резервуара;

- максимально допустимий робочий тиск (MAWP) паливного бака не повинен перевищувати 90% від максимально допустимого налаштування запобіжного клапана (MARVS);

- за винятком резервуарів типу С, що знаходяться під повним тиском, резервуари для аміаку мають бути забезпечені лінією повернення пари.

Аміак може зберігатися як у напівкриогенній системі, так і у системі під тиском. Найбільш підходящий тип резервуара залежить від системних вимог, таких як необхідний розмір, розрахунковий тиск, очікувана тривалість резервуара для зберігання аміаку (і, як наслідок, «випарний» газ).

Для аміаку можуть використовуватись різні типи резервуарів для зберігання, такі як:

- незалежні (типи А, В та С);
- інтегральний (мембранного типу);
- переносний (незалежний резервуар типу С).

Резервуари інтегрованого типу, такі як мембранний резервуар, вбудовані в корпус як частина мембранного резервуару конструкції судна для забезпечення ефективного використання простору (рис.1).

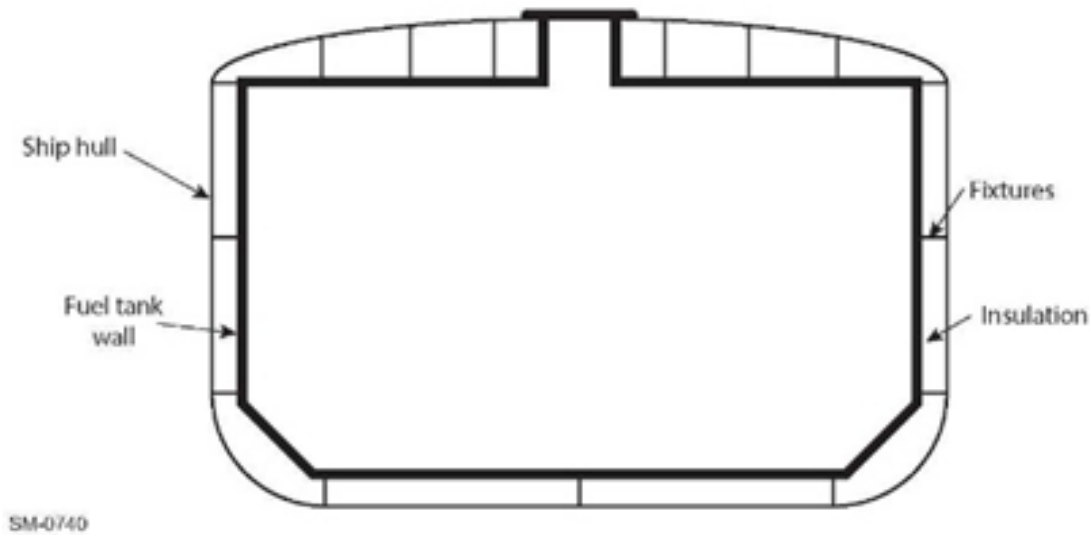


Рисунок 1. Вид розрізу інтегрованого мембранного танка

Цей тип резервуарів підходить для великих суден, що працюють на аміаку, таких як контейнеровози, суховантажні судна та нафтоналивні танкери.

Резервуар типу А повинен мати другий бар'єр, що запобігає витоку. Часто як другий шар використовується корпус судна, тому для максимізації ефективності використання обсягу резервуар

спроектований в призматичній формі, щоб найкращим чином поміститися всередині судна. Між стіною резервуару та вторинним бар'єром знаходиться суцільний ізоляційний шар та шар повітряного зазору. Це знижує тепловий вплив на аміак із навколишнього середовища. Цей зазор також допускає задане розширення стінки резервуару (рис. 2).

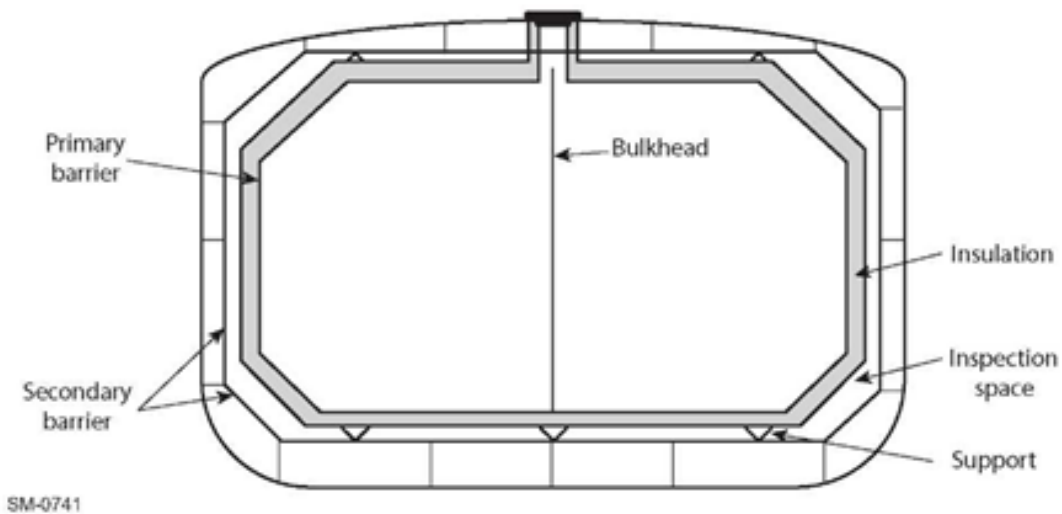


Рисунок 2. Вид у розрізі резервуара типу А

До резервуарів типу А висуваються такі додаткові вимоги.

- вторинний бар'єр має бути спроектований таким чином, щоб стримувати можливі витікання аміаку протягом 15 днів;
- якщо другий бар'єр забезпечується корпусом судна, він повинен бути виготовлений з відповідного матеріалу, щоб витримувати -33°C;
- у трюмі аміаку має бути передбачена дренажна система для перекачування рідкого аміаку у разі розливу або розриву резервуара;

- простір для зберігання аміаку має бути заповнений інертним газом, що забезпечується системою інертного газу.

Резервуар типу В реагує підвищення тиску шляхом розширення. Конструкція резервуара типу В заснована на стійкій до відмови концепції, яка означає, що втوما є прогресуючою і не катастрофічною. Таким чином, необхідно мати лише частковий вторинний бар'єр для утримання розрахованого максимального витоку.

Резервуари типу С, що окремо стоять, спроектовані з використанням стандартних кодів судин

під тиском для резервуарів типу С з тиском вище 2 бар. Найбільш поширеними формами для цього типу резервуарів є циліндричні та дволопатеві, які можуть бути встановлені як вертикально, так і горизонтально в залежності від наявного простору (рис. 3).

Для резервуарів типу С не потрібний вторинний бар'єр, натомість у трюмному відсіку розміщуються детектори витoku газу виявлення парів аміаку. Резервуар типу С також можна встановити на палубі (рис. 4).

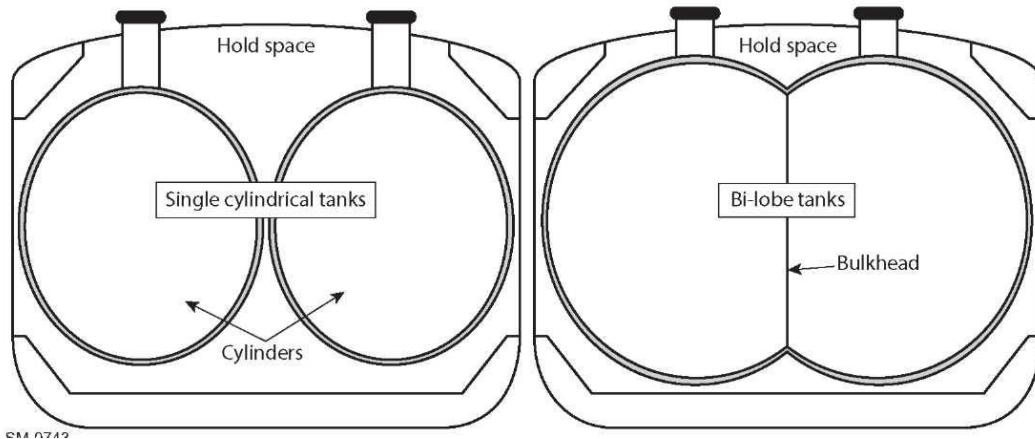


Рисунок 3. Вид у розрізі резервуарів типу С, що окремо стоять, встановлених під палубою

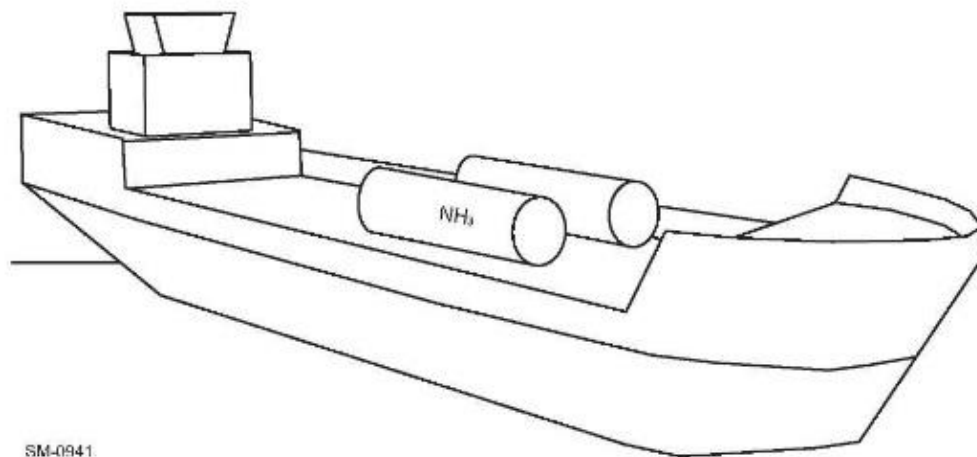


Рисунок 4. Цистерна типу С на палубі судна

До резервуарів типу С висуваються такі додаткові вимоги. Розрахунковий тиск резервуара типу С під повним тиском не повинен бути меншим за тиск пари аміаку при максимальній температурі навколишнього середовища, очікуваної в процесі експлуатації. Ця температура повинна бути не меншою за 45°C.

Відсіки для зберігання палива виступають як вторинний бар'єр, якщо резервуар розташований під відкритими палубами, а переборки паливного сховища знаходяться на відстані не менше 900 мм від зовнішньої оболонки резервуара.

Усі з'єднання резервуарів, фітинги, фланці та клапани резервуарів повинні бути закриті у газонепроникному просторі, за винятком випадків, коли з'єднання резервуарів знаходяться на

відкритій палубі. Приміщення повинно мати можливість безпечно збирати витік із з'єднань резервуара.

Крім того, залежно від розташування резервуарів можуть застосовуватись додаткові вимоги. Наприклад, якщо танк розташований на відкритій палубі, він має бути захищений від механічних пошкоджень та оточений комінгсами. Також має бути передбачена система розпилення води для аварійного охолодження, а також піддони для збирання пролитої рідини. Якщо резервуари розташовані під відкритими палубами, з'єднання резервуарів, клапани та фланці повинні знаходитись у просторі для підключення резервуара. Відсік для зберігання аміаку має бути відокремлений від машинного відділення категорії А перемичкою завтовшки не менше 900 мм.

Висновки

Як свідчить аналіз наявної інформації, до 2025 року виробники двигунів і суднового енергетичного обладнання будуть готові запропонувати суднові енергетичні установки, що працюють на аміаку і метанолі, а також модифікації двопаливних двигунів. Питання аналізу впливу нових палив на довкілля, людей та суднове обладнання і системи мають незаперечну актуальність.

Література

[1]. International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Sea farers as amended, including the 1995 and 2010 Manila Amendments. STCW Convention and STCW Code. 2011 edition. Language (s): ENG, FRE, SPA, RUS, CHI, ARA (IMO-IC938): http://SEARCH.LIGA-ZAKON.UA/L_DOC2.NSF/LINK1/ MU10242.html

[2]. Sulphur Cap 2020: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>.

[3]. <https://www.wingd.com/en/documents/w-2s/engine-installation/concept-guidances/dg9729-concept-guidance-for-x-df-a.pdf>

[4]. <https://www.wingd.com/en/fuel-flexibility/>

Відомості про авторів

Юрій Кісегов, к.т.н., доцент, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-5360-9376](https://orcid.org/0000-0002-5360-9376).



АНАЛІЗ РОБОТИ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ГЕНЕРАТОРА ПРИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННІ ВІД ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Зіпунніков М.М.[✉], Котенко А.Л.

Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України

Анотація

Ключові слова: Електролізер, фотоелектричний перетворювач, генерація водню, сонячна інсоляція.

Проведено експериментальні дослідження щодо отримання водню (кисню) методом електролізу при електроживленні від сонячної панелі в лабораторних умовах. Відпрацьовано спільні режими роботи фотоелектричного перетворювача з безмембранним електролізером високого тиску в залежності від змін сонячної інсоляції. Визначено шляхи підвищення продуктивності роботи електролізера з сонячним фотоелектричним перетворювачем.

Вступ

Для досягнення глобальної мети по скороченню шкідливих викидів в атмосферу основною альтернативою вуглецю є водень. Розкладання води на водень і кисень методом електролізу є ключовим рішенням щодо декарбонізації навколишнього середовища. Електроліз води з використанням відновлюваних джерел енергії (сонце, вітер) дає можливість мінімізувати енерговитрати і викиди на отримання зеленого водню. Це дозволяє розглядати електроліз води як перспективний метод виробництва водню для транспорту та енергоустановок з нульовим рівнем викидів [1]–[5].

У класифікації водню за кольором головним критерієм є його екологічність. Чим більше оксидів вуглецю виділяється при виробництві водню, тим менше екологічним він буде вважатися. Для простоти кожен "сорт" позначається кольором.

Зелений водень є найбільш екологічним тому, що отримують його за допомогою електролізу. При цьому електрика надходить від відновлюваних джерел енергії, таких як вітер, сонячна або гідроенергія, та викиди вуглецю відсутні. Жовтий (помаранчевий) водень як і зелений отримують шляхом електролізу, однак джерелом енергії є атомні електростанції, тобто викиди вуглецю відсутні, але метод не є абсолютно екологічним. Наступні "сорт" водню: бірюзовий, сірий, блакитний, коричневий (бурий) – є менш екологічними.

Для виробництва зеленого водню з використанням відновлюваних джерел енергії достатньо широко застосовуються лужні електролізери [1], [3]–[5]. Низькотемпературний електроліз води (до 90 °C) становить особливий інтерес для сфери

відновлюваної енергетики, так як цей метод може дозволити зберігати електроенергію з відновлюваних джерел в хімічних зв'язках в формі водню високої чистоти. Будівництво автономних геліоводневих станцій у зонах, що характеризуються значною сонячною інсоляцією внесе істотний вклад у створення інфраструктури водневих енергосистем, що дозволить в значній мірі вирішити проблеми, які пов'язані з виснаженням викопних енергоресурсів (нафта, газ, вугілля) та загостренням екологічних проблем, обумовлених використанням традиційних вуглецеводневих палив.

Актуальність досліджень

Комбінація електролізера з відновлюваними джерелами енергії необхідна для стійкого виробництва водню без значних викидів вуглекислого газу. У той час як сонячна енергія часто через її широку доступність використовується для базового навантаження, пряме використання відновлюваних джерел енергії в енергосистемі ускладнено через невідповідність між споживанням енергії та її виробництвом. Тому актуальним завданням є розробка електрохімічних технологій генерації водню з мінімальними витратами електроенергії, які можуть бути інтегровані до складу автономних енергетичних комплексів, що використовують відновлювані джерела енергії (сонце, вітер).

Експериментальні результати та їх обговорення

Експериментальні дослідження щодо визначення електрохімічної активності та електрохімічних характеристик електродних матеріалів проведено на лабораторній установці [6], яка

моделює процеси, що відбуваються в електрохімічній комірці.

На рис. 1 наведено розроблену принципову схему живлення електролізної комірки від сонячного фотоелектричного перетворювача. Перемикання полярності ЕК з газопоглинаючим електродом забезпечувалося тумблерами SA 1.1, SA 1.2. Вимірювання параметрів спожитої енергії, що виробляється ФЕП, здійснювалося амперметром та вольтметром. Підключення ЕК до ФЕП здійснювалося без вторинних перетворювачів.

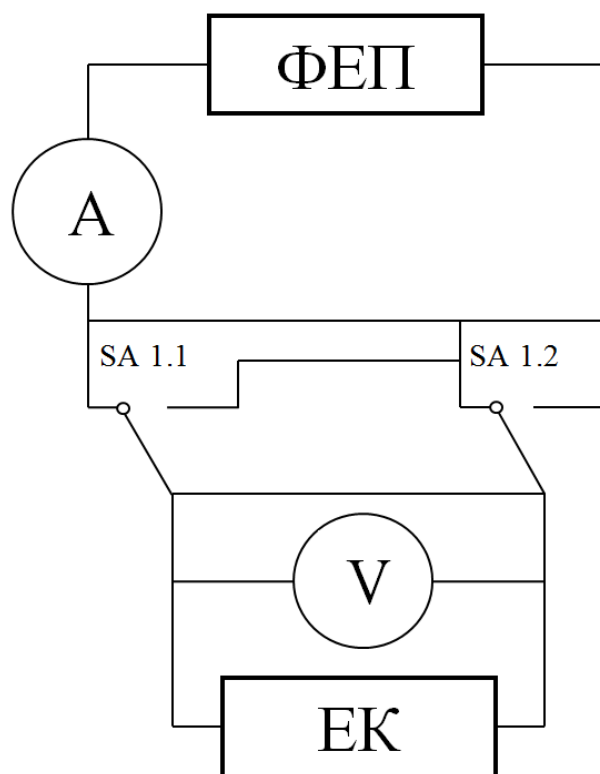


Рисунок 1. Принципова схема живлення ЕК від сонячного ФЕП: А – амперметр; V – вольтметр; ЕК – електролізна комірка; SA 1.1, SA 1.2 – тумблери

Основна ідея, яку покладено в основу досліджень, – це спроможність споживання та перетворення відновлюваної сонячної енергії. Нерегулярний первинний потік сонячної енергії тобто волатильність електрогенерації ФЕП компенсується в електролізері, котрий не є чутливим до якості електроживлення. Очевидно, що такий підхід є доцільним для створення автономних установок енергозабезпечення невеликої та середньої потужності.

Важливою складовою забезпечення надійної та ефективної роботи геліоводневих енергоустановок є синхронізація роботи ФЕП і системи генерації газів.

Експериментальні дані отримані при безпосередньому підключенні електролізної комірки до

ФЕП – TOPRAY SOLAR з загальною площею поверхні $S = 0,288 \text{ м}^2$:

- струм короткого замикання $I_{кз} = 1,07 \text{ А}$;
- напруга холостого ходу $U_{хх} = 22,4 \text{ В}$.

Середньомісячний питомий об'єм водню, що виділяється ЕК, при електроживленні від ФЕП представлено на рис. 2. Підключення електролізної комірки до ФЕП виконувалося безпосередньо (без вторинних перетворювачів).

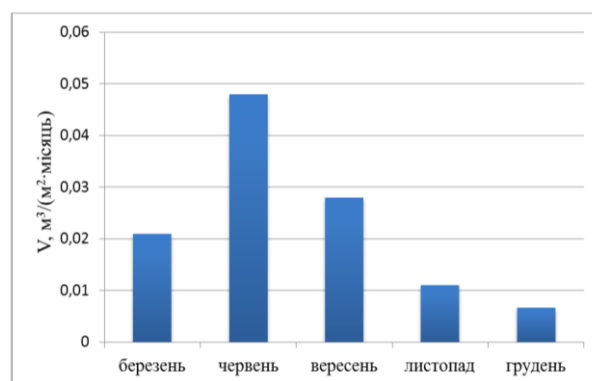


Рисунок 2. Середньомісячний питомий об'єм водню, що виділяється ЕК при електроживленні від ФЕП ($S = 0,288 \text{ м}^2$), для різної пори року (різних рівнів сонячної радіації) [7]

Найбільший приріст газовиділення з електролізної комірки за воднем спостерігається з травня по серпень, тобто в літній період року. Що приблизно в 7 разів більше ніж у зимовий час (січень-лютий). Зростання часу перебігу повного циклу газовиділення (H_2 та O_2) залежить від пори року та збільшується приблизно у 2 рази з червня до грудня. Зменшення тривалості циклів газовиділення водню та кисню свідчить про підвищення густини струму на електродах (тобто зростання струму живлення від ФЕП) зі збільшенням сонячної інсоляції в літній період. Зі зменшенням сонячної інсоляції відбувається збільшення тривалості напівциклів виділення водню та кисню.

Отримані експериментальні дані щодо адаптації роботи електролізної комірки з ФЕП дозволять розробити оригінальні алгоритми автоматичного керування основними елементами геліоводневих автономних установок енергозабезпечення і створити технічну базу для їх реалізації.

Висновки

Поєднання електролізу лужної води і поновлюваних джерел енергії для виробництва екологічно чистого водню – важливий крок на шляху до декарбонізації промислових процесів і транспортного сектору. Тоді як процес електролізу лужної води може визначатися характеристиками

струму, напруги, комбінація електролізера з відновлюваним джерелом енергії може забезпечити стійке виробництво водню без значних викидів вуглекислого газу. Фотоелектричні панелі повинні працювати в точці максимальної потужності.

Нерегулярний первинний потік сонячної енергії тобто волатильність електрогенерації ФЕП компенсується в електролізері, котрий не є чутливим до якості електроживлення. Очевидно, що такий підхід є доцільним для створення автономних установок енергозабезпечення невеликої та середньої потужності.

Для дослідження процесів електролізу при електроживленні генератора водню від сонячного фотоелектричного перетворювача розроблено схеми його підключення до електролізної комірки та визначено технічні характеристики основних базових елементів лабораторного сонячно-енергетичного комплексу. Розглянуто характер зміни напруги для різних рівнів сонячної радіації в поєднанні з типовими кривими поляризації лужного водного електролізера. Проаналізовано середньомісячну кількість водню, що виділяється з електролізної комірки, з урахуванням сонячної інсоляції від сонячної панелі загальною поверхнею $S = 0,288 \text{ м}^2$. Для підвищення продуктивності роботи електролізера з ФЕП слід виконати заходи з налаштування та оптимізації обох систем.

Література

[1]. The Intensification Technologies to Water Electrolysis for Hydrogen Production—A Review / M. Wang, Z. Wang, X. Gong, Z. Guo // *Renew. Sustain. Energy*. – 2014. – № 29. – P. 573–588.

[2]. Chin V.J. Cell Modelling and Model Parameters Estimation Techniques for Photovoltaic Simulator Application / V.J. Chin, Z. Salam, K. Ishaque // *A Review. Appl. Energy*. – 2015. – № 154. – P. 500–519.

[3]. Vergura S. A Complete and Simplified Datasheet-Based Model of PV Cells in Variable Environmental Conditions for Circuit Simulation / S. Vergura // *Energies*. – 2016. – № 9. – P. 326.

[4]. Brauns J. Alkaline Water Electrolysis Powered by Renewable Energy: A Review [Електронний ресурс] / J. Brauns, T. Turek; Processes: офіційний сайт. – 2020. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/2/248/pdf>.

[5]. Basic operation principles and control algorithm for a high-pressure membrane-less electrolyser [Електронний ресурс] / V.V. Solovey, A.L. Kotenko, I.O. Vorobiova, A.A. Shevchenko, M.M. Zipunnikov // *Journal of Mechanical Engineering*. – 2018. V. 21, № 4, P. 57–63. – Режим доступу: <https://doi.org/10.15407/jmach2018.04.057>.

[6]. Solovey V. Hydrogen technology of energy storage making use of wind power potential / V. Solovey, L. Kozak, A. Shevchenko, M. Zipunnikov, R. Campbell, F. Seamon // *Проблеми машинобудування*. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 62–68.

[7]. Rusanov A.V., Solovey V.V., Zipunnikov M.M. Improvement of the membrane-free electrolysis process of hydrogen and oxygen production. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. Dnipro: Dnipro University of Technology. 2021. № 1. P. 117-122. Режим доступу: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/117>.

Відомості про авторів


Микола Зіпунніков, к.т.н, старший науковий співробітник, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, Харків, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-0579-2962](https://orcid.org/0000-0002-0579-2962).



Анатолій Котенко, провідний інженер, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, Харків, Україна, [ORCID ID: 0000-0003-2715-634X](https://orcid.org/0000-0003-2715-634X).



ВИКОРИСТАННЯ АБСОРБЦІЙНО-ПАРОКОМПРЕСОРНОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ МАШИННОГО ЗАЛУ АВТОНОМНОЇ ТЕПЛОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Грич А.В. 

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

Анотація

Ключові слова: Двоступеневе охолодження, газові двигуни, абсорбційна холодильна машина, повітроохолоджувач.

Представлено систему кондиціонування машинного відділення газового двигуна автономної теплоелектростанції з двоступінчастим охолодженням повітря, що використовує каскадне абсорбційно-парокомпресорне охолодження і пряму подачу повітря. Запропоновано спосіб обробки припливного повітря машинного відділення, що забезпечує глибоке охолодження машинного відділення.

Вступ

Машинні відділення (МВ) автономних теплоелектростанцій на базі газових двигунів (ГД) відрізняються інтенсивними тепловиділеннями – від електрогенераторів, встановлених на ГД теплообмінників відведення теплоти на нагрів води, від корпусу самого двигуна, щитів управління і т.д., а також теплоприпливи в МВ ззовні, що призводить до підвищення температури повітря в МВ, звідки він надходить на вхід турбокомпресорів (ТК) наддуву ГД, і, як наслідок, до зниження паливної ефективності ГД. Тому припливне повітря МВ необхідно охолоджувати.

У стандартних системах кондиціонування МВ установок автономного енергопостачання тригенераційного типу передбачено охолодження всього припливного повітря в центральних кондиціонерах (ЦК) з холодопостачанням від абсорбційних холодильних машин, утилізують скидку теплоту ГД. Однак при підвищених температурах зовнішнього повітря стандартні системи охолодження в ЦК не в змозі забезпечити необхідну температуру повітря на вході ГД через значні теплопритоки і великих обсягів приточного повітря. Крім того, глибина охолодження припливного повітря обмежена температурою холодоносія (холодної води від АБХМ) 7 °С.

Для більш глибокого охолодження припливного повітря розроблена двоступенева система охолодження припливного повітря з парокомпресорної холодильної машини (ПКХМ), що служить для холодопостачання технологічних виробництв. Використання ПКХМ для кондиціонування МО вельми обмежена, особливо при дефіциті холоду на технологічні потреби.

Актуальність досліджень

У традиційних системах кондиціонування МВ таких установок автономного енергозабезпечення охолоджується все припливне повітря, яке надходить до МВ або зон розташування ГД, звідки воно всмоктується наддувним турбокомпресором (ТК) ГД. За теплового клімату через значні теплоприпливи до МВ ззовні, тепловиділення від ГД і навішених на ГД теплообмінників температура повітря на вході наддувних ТК ГД висока, що призводить до зростання витрат палива та зменшення електричної потужності. Тому завдання розробки системи кондиціонування припливного повітря МВ установок автономного енергозабезпечення, яка б підтримувала низькі температури повітря на їх вході за мінімальних витрат холоду, є актуальним.

Викладення основного матеріалу

З метою зведення до мінімуму споживання дефіцитного холоду від ПКХМ розроблена система двоступеневого охолодження повітря в повітроохолоджувачі (ПО) на вході ГД з холодопостачання другого ступеня ПО₂ від каскадної абсорбційно-парокомпресорної холодильної машини (КАПКХМ) (рис.1) [1, 2]. При цьому конденсатор ПКХМ охолоджується холодоносієм від АБХМ. Система дозволяє підвищити холодопродуктивність компресора і холодильний коефіцієнт ПКХМ (від $\epsilon_k=3,1$ до $\epsilon_k=7$ згідно характеристик компресора BITZER 4NES-12Y-40P) за рахунок зниження температури конденсації t_k від 45 °С до 20 °С. Таким чином можна скоротити витрати електроенергії на привід компресора ПКХМ на 40 ... 50%.

На рис. 1 представлені результати розрахунку характеристик системи двоступеневого

оохолодження припливного повітря на вході ГД в КАПКХМ. Як видно з графіків, зниження температури повітря становить $\Delta t_{10} = t_{зп} - t_{в.А} = 14...26 \text{ }^\circ\text{C}$, що значно більше, ніж в базовому варіанті $\Delta t_{10(60)} = t_{зп} - t_{10.2} = 5...13 \text{ }^\circ\text{C}$. Звідси можна зробити висновок, що застосування зональної системи кондиціонування з двоступеневим охолодженням повітря на вході ГД дозволяє

збільшити глибину охолодження Δt_{10} в півтора рази в порівнянні з базовим варіантом системи кондиціонування.

На рис. 2 представлені поточні значення холодопродуктивності (теплого навантаження на ПО) і скорочення питомої витрати палива протягом доби.

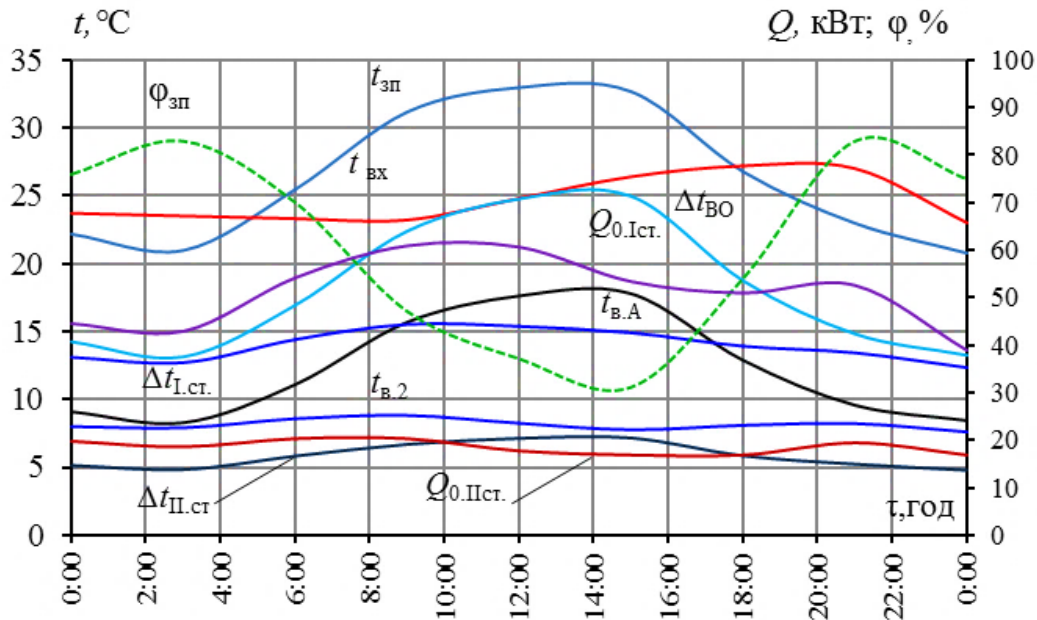


Рисунок 1. Температури зовнішнього повітря $t_{зп}$, на вході ТК ГД $t_{вх}$ при заборі повітря із МВ, на виході з першого ступеня ПО₁ $t_{в.А}$, зниження температури повітря в ПО₁ $\Delta t_{І.ст.} = t_{зп} - t_{в.А}$, на виході з другого ступеня ПО₂ $t_{в.2}$, зниження температури повітря в ступені ПО₂ $\Delta t_{ІІ.ст.} = t_{в.А} - t_{в.2}$, повна глибина охолодження припливного повітря в двоступеневому ПО $\Delta t_{10} = t_{зп} - t_{вх.ПО.2}$ протягом доби при витраті повітря $35000 \text{ м}^3/\text{год}$, холодопродуктивності першого ступеня ПО₁ $Q_{0.Іст.}$ і другого ступеня ПО₂ $Q_{0.ІІст.}$.

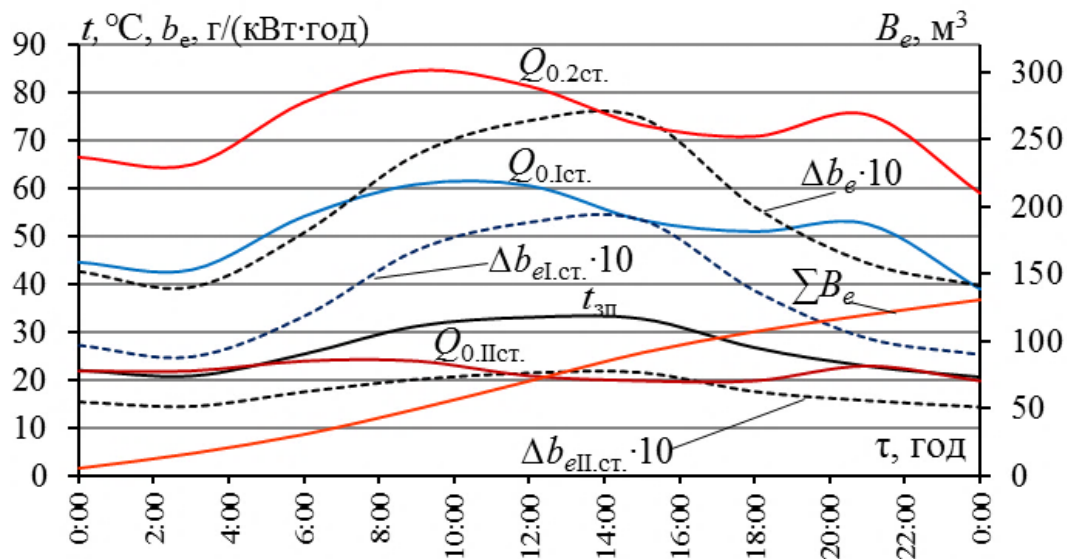


Рисунок 2 Зміна холодопродуктивності першого ступеня ПО₁ $Q_{0.Іст.}$, другого ступеня ПО₂ $Q_{0.ІІст.}$, сумарною холодопродуктивності ПО $Q_{0.по.}$, повного теплового навантаження ПО $Q_{0.2ст.}$, Δb_e – скорочення питомої витрати палива, $\text{г}/(\text{кВт} \cdot \text{год})$, $\Sigma \Delta B_e$ – добова економія природного газу, м^3

Як видно, максимальне теплове навантаження складає близько 112 кВт, що на 68% менше, ніж в базовому варіанті ($Q_{0(60)} \approx 350$ кВт), а навантаження на ПО зменшилася на 76%, що має велике значення в умовах дефіциту холоду на технологічні потреби.

Висновки

Представлено спосіб двоступеневого охолодження припливного повітря МВ ГД трансформацією скидний теплоти ГД в каскадній абсорбційно-парокомпресорній холодильній машині з холодопостачанням високотемпературного ступеня ПО_{ВТ} від АБХМ і низькотемпературного ступеня ПО_{НТ} від КАПКХМ, який забезпечує скорочення витрат палива на 10 ... 15% за рахунок глибокого (до 7 ... 10 °С) охолодження повітря на вході ГД в порівнянні з його охолодженням в АБХМ до 15 °С.

Література

[1]. Радченко А.М., Грич А.В. Охолодження приточного повітря машинного відділення газових двигунів тригенераційної установки. *Холодильна техніка та технологія*. 2014. № 6. С. 20-25.

<https://doi.org/10.15673/0453-8307.6/2014.30695>

[2]. Радченко А.М., Грич А.В., Портной Б.С. Ступенчатое охлаждение приточного воздуха машинного отделения автономной электростанции. *Холодильна техніка та технологія*. 2016. №

51(1). С. 71-77. <https://doi.org/10.15673/0453-8307.1/2015.36780>

[3]. Радченко Р.Н., Грич А.В. Двухступенчатое охлаждение приточного воздуха газовых двигателей тригенерационной установки. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2014. № 6. С. 103–107.

[4]. Радченко Н.И., Кантор С.А., Рамзи Ел Герби. Ступенчатое кондиционирование воздуха на входе рекуперативных ГТД утилизацией теплоты выпускных газов. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2014. № 3 (110). С. 86–90.

[5]. Ткаченко С.Й., Чепурний М.М., Пішеніна Н.В. Показники ефективності роботи енергетичних установок для сумісного виробництва теплової та електричної енергії. *Наукові праці ВНТУ*. 2010. № 1.


<https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/187>

Відомості про авторів

Артем Грич, к.т.н, доцент кафедри кондиціювання та рефрижерації, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-2142-3665](https://orcid.org/0000-0002-2142-3665).



ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ДВОСТУПЕНЕВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ МАШИННОЇ ЗАЛИ ГАЗОПОРШНЕВИХ ДВИГУНІВ

Грич А.В. 

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

Анотація

Ключові слова: охолодження, система кондиціонування, машинне відділення, газовий двигун, повітроохолоджувач.

Виконано аналіз ефективності охолодження припливного повітря машинного відділення когенераційних газових двигунів автономної теплоелектростанції. Розглянуто систему двоступеневого охолодження повітря з використанням абсорбційної холодильної машини і зональної повітроподачею. Запропоновано способи обробки їх припливного повітря машинного відділення, що забезпечують його глибоке охолодження.

Вступ

В результаті аналізу існуючих систем кондиціонування машинних відділень (МВ) установок автономного енергозабезпечення на базі газових двигунів (ГД) виявлено резерви підвищення їх ефективності, розроблені раціональні схемно-конструктивні рішення по вдосконаленню енерговитратних традиційних систем охолодження припливного повітря МВ в центральному кондиціонері. Згідно із запропонованим принципом локального повітропостачання глибоке охолодження доцільне тільки для циклового повітря на вході ГД, а до інших джерел тепловиділень в МВ (електрогенератор, головки циліндрів двигуна і т.д.) можна подавати або вентиляційне повітря, або припливне повітря, охолоджуване в кондиціонері, в який подають холодну воду від АБХМ.

Актуальність досліджень

Температура повітря в машинному відділенні впливає на паливну ефективність газових двигунів, особливо влітку, коли температура зовнішнього повітря досить висока. Тому важливо підтримувати температуру повітря на вході в турбокомпресор двигуна на рівні 5...10°C.

Для виявлення резервів підвищення ефективності охолодження припливного повітря в машинне відділення, було проведено аналіз впливу двоступеневого кондиціонування припливного повітря на ефективність роботи газових двигунів автономної теплоелектростанції.

Викладення основного матеріалу

Для скорочення витрат холоду на кондиціонування циклового повітря ГД і підвищення ефективності його охолодження була розроблена

схема системи двоступеневого кондиціонування повітря на вході в ГД. Особливістю такої системи є те, що повітря на вході в двигун охолоджується в двоступеневому повітроохолоджувачі (ПО). Повітроохолоджувач складається з високотемпературного ступеня ПО_{вт}, в який подається холодоносієм-вода з температурою 7 °С від абсорбційної бромистолітійової холодильної машини (АБХМ), і низькотемпературного ступеня ПО_{нт}, з температурою холодоносія-води 4 °С, охолоджуваної в пароконпресорній холодильній машині (ПКХМ) (рис.1.). При цьому зовнішнє повітря подають вентилятором спочатку в високотемпературний ступінь ПО_{вт}, де його температура знижується на величину $\Delta t_{\text{ПО.вт}} = 12 \dots 19 \text{ } ^\circ\text{C}$, а потім в низькотемпературний ступінь ПО_{нт}, де воно охолоджується на величину $\Delta t_{\text{ПО.нт}} = 5 \dots 7 \text{ } ^\circ\text{C}$, і через вологовідділювач подається на вхід в ГД з температурою 8 ... 10 °С.

На рис. 2 наведені поточні значення зниження температури припливного повітря Δt_b в ПО, вологовмісту повітря на вході ПО $d_{\text{нв}}$, після високотемпературного ступеня ПО_{вт} $d_{\text{в1}}$ і низькотемпературного ступеня ПО_{нт} $d_{\text{в2}}$, питоме теплове навантаження високотемпературного ступеня ПО_{вт} q_{01} , низькотемпературного ступеня ПО_{нт} q_{02} і всього ПО q_0 , зменшення питомої витрати палива за рахунок охолодження повітря на вході Δb_e і сумарне $\Sigma \Delta b_e$ з урахуванням витрат потужності, відповідно і палива, на подолання аеродинамічного опору ПО, а також Δb_{et} і сумарне $\Sigma \Delta b_{et}$ без урахування аеродинамічного опору ПО протягом доби 20.07.2018 р

Система зонального кондиціонування з двоступеневим охолодженням дозволяє ізолювати циклове повітря двигуна від повітря машинного відділення, що в свою чергу забезпечує збільшення глибини охолодження повітря і скорочення витрат холоду на кондиціонування припливного

повітря за рахунок значного скорочення його витрати (від 60000 м³/год до 7500 м³/год).

З рис. 2 видно, що глибина охолодження припливного повітря становить $\Delta t_b = 8...24$ °С. Це

свідчить про більш високу ефективність охолодження припливного повітря в порівнянні з базовим варіантом і стандартними системами кондиціонування повітря МВ.

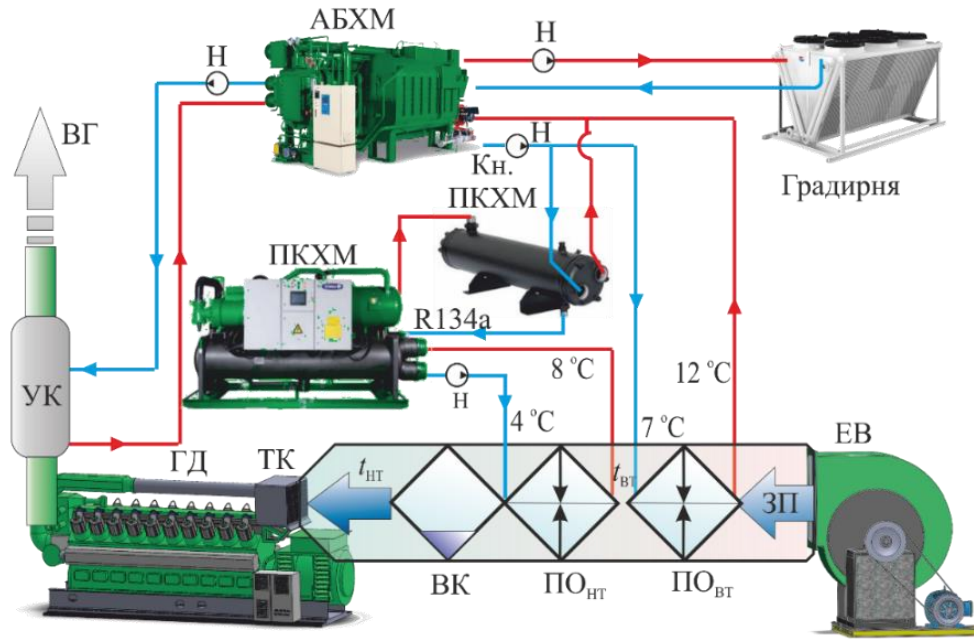


Рисунок 1. Схема системи кондиціонування повітря з двоступеневим повітроохолодженням та прямою подачею охолодженого повітря на вхід в ТК ГД. Де: ГД – газований двигун; АБХМ – абсорбційна бром-літєва холодильна машина; ПКХМ – парокompресорна холодильна машина; Кн. ПКХМ – конденсат ПКХМ; ПО_{ВТ} – повітроохолоджувач високотемпературного ступеня; ПО_{НТ} – повітроохолоджувач низькотемпературного ступеня; ЕВ – електровентильатор; ВК – відділювач конденсату; ТК – турбокомпресор; УК – утилізаційний котел; ЗП – зовнішнє повітря; ВГ – відхідні гази

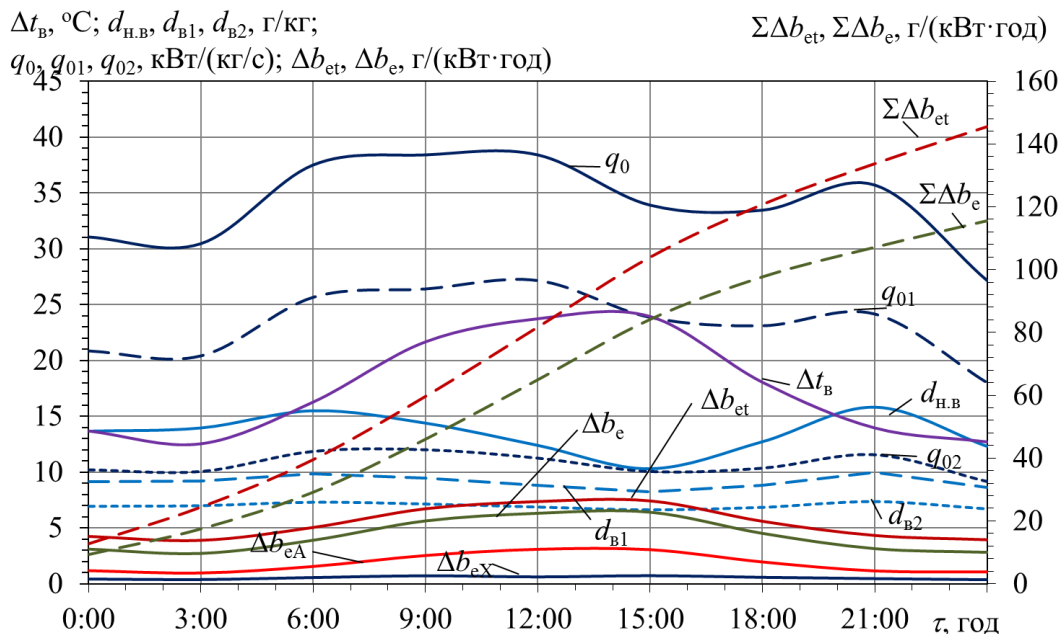


Рисунок 2. Поточні значення зменшення температури зовнішнього повітря Δt_b в ПО, вологовмісту повітря на вході ПО $d_{h,в}$, вологовмісту після високотемпературного ступеня ПО_{ВТ} d_{b1} і низькотемпературного ступеня ПО_{НТ} d_{b2} ; питомого теплового навантаження високотемпературного ступеня ПО_{ВТ} q_{01} , низькотемпературного ступеня ПО_{НТ} q_{02} і всього ПО q_0 ; поточне зменшення питомої витрати палива за рахунок охолодження повітря на вході Δb_e і сумарне $\Sigma \Delta b_e$ з урахуванням аеродинамічного опору ПО, а також Δb_{et} і сумарне $\Sigma \Delta b_{et}$ без урахування аеродинамічного опору ПО протягом доби 20.07.2018 р

Слід зазначити, що зональна система кондиціонування дозволяє також в разі необхідності використовувати в якості циклового повітря ГД зовнішнє неохоложене повітря, яке подається ізольованими каналами на вхід ГД. Пряма подача зовнішнього повітря допустима, коли його температура $10...18^{\circ}\text{C}$ та у разі дефіциту холоду, через його витрати на технологічні потреби. При цьому передбачене часткове або повне байпасування повітроохолоджувачів. Байпасування дозволяє скоротити аеродинамічний опір на величину $\Delta P = 280 \dots 490$ Па, зменшуючи тим самим споживання електроенергії вентилятором на $20 \dots 25\%$.

Висновки

Проаналізовано ефективність глибокого охолодження припливного повітря МВ автономної теплоелектростанції. Показано, що двоступенева охолодження припливного повітря холодною водою спочатку від АБХМ, а потім від ПКХМ з температурою відповідно 7 і 4°C забезпечує в $1,4...1,5$ рази більше зниження температури повітря в порівнянні з традиційним охолодженням водою від АБХМ.

Література

[1]. Трушляков Є.І., Радченко М.І., Радченко А.М., Фордуй С.Г., Кантор С.А., Ткаченко В.С., Портной Б.С. Підвищення ефективності систем кондиціонування повітря шляхом розподілу теплового навантаження за ступеневим принципом. *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. 2019. № 8 (160). С. 49–53. DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2019.8.07>

[2]. Радченко А.М., Грич А.В., Портной Б.С. Ступенчатое охлаждение приточного воздуха машинного отделения автономной электростанции. *Холодильная техника та технологія*. 2016. № 51(1). С. 71-77. <https://doi.org/10.15673/0453-8307.1/2015.36780>

[3]. Радченко А.М., Грич А.В. Охлаждение приточного воздуха машинного отделения газовых двигателей тригенерационной установки. *Холодильная техника та технологія*. 2014. № 6. С. 20-25. <https://doi.org/10.15673/0453-8307.6/2014.30695>

[4]. Радченко Р.Н., Грич А.В. Двухступенчатое охлаждение приточного воздуха газовых двигателей тригенерационной установки. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2014. № 6. С. 103–107.

[7]. Радченко А.Н., Зубарев А.А., Остапенко А.В., Грич А.В. Повышение эффективности утилизации теплоты газового двигателя ступенчатой трансформацией. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2018. № 6 (150). С. 39–43. <https://doi.org/10.32620/aktt.2018.6.06>

Відомості про авторів

Артем Грич, к.т.н, доцент кафедри кондиціонування та рефрижераторії, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-2142-3665](https://orcid.org/0000-0002-2142-3665).



ЕЖЕКТОРНО-АБСОРБЦІЙНА СИСТЕМА ТРАНСФОРМАЦІЇ ТЕПЛОТИ ГАЗОВОГО ДВИГУНА АВТОНОМНОЇ ТЕПЛОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Остапенко О.В. [✉]

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

Анотація

Ключові слова: тригенерація, абсорбційна холодильна машина, ежекторна холодильна машина, утилізація теплоти.

Виконано аналіз типової системи трансформації скидної теплоти газових двигунів в холод. Встановлено наявність значних втрат теплоти. Запропонована ступінчаста абсорбційно-ежекторна система, застосування якої забезпечує скорочення втрат теплоти і приріст холодопродуктивності понад 15%.

Вступ

У руслі загальносвітової тенденції децентралізації енергопостачання все більший попит отримують установки автономного електро-, тепло- та холодопостачання, в яких скидна теплота привідних двигунів електрогенераторів трансформується в холод тепловикористовуваними холодильними машинами, а холод використовується на технологічні потреби і кондиціонування повітря різних об'єктів. Особливо перспективним є застосування для приводу електрогенераторів газопоршневих двигунів, що випускаються в когенераційному виконанні - зі штатними теплообмінниками, в яких скидна теплота відводиться на нагрів води (теплоносія), теплота якої в свою чергу трансформується в холод абсорбційною бромистолітєвою холодильною машиною.

Актуальність досліджень

Відповідно до існуючої схеми роботи при температурі теплоносія, на виході з когенераційного модуля, що дорівнює 90°C, зниження температури теплоносія в АБХМ зазвичай становить не 15 °С, а реально навіть дещо менше, що не дозволяє охолоджувати теплоносії до температури на вході в ГД $t = 70 \text{ }^\circ\text{C}$, яка б забезпечувала підтримку теплового стану ГД на необхідному рівні, і викликає необхідність скидати надлишкову теплоту в атмосферу градирнею аварійного скидання. Через відповідні втрати теплоти теплові коефіцієнти системи утилізації теплоти ГД виявляються значно нижче теплових коефіцієнтів власне АБХМ, що зумовлює істотне зниження холодопродуктивності.

Викладення основного матеріалу

Рішення завдання підвищення ефективності трансформації теплоти газового двигуна в холод розглядалося на прикладі установки автономного електро-, тепло- і холодозабезпечення

заводу ТОВ "Сандора" - "Pepsico Ukraine" (м. Миколаїв, Україна). Установка включає два когенераційних газових двигуна JMS 420 GS-N.LC GE Jenbacher (електрична потужність одного ГД 1400 кВт, тепла потужність 1500 кВт), в якому теплота випускних газів, надувої газоповітряної суміші, що охолоджує сорочку двигуна води і мастила використовується для нагріву води. Теплота гарячої води трансформується абсорбційною бромистолітєвою холодильною машиною AR-D500L2 Century в холод (холодильна потужність 2000 кВт), який витрачається на технологічні потреби і для роботи центральних кондиціонерів, що забезпечують охолодження повітря в машинному відділенні (рис.1).

З метою виключення зазначених втрат тепла, було запропоновано використовувати в системі утилізації додаткову тепловикористовуючу ежекторну холодильну машину. Ежекторні ХМ відрізняються простотою конструкції, але їх ефективність роботи дуже сильно залежить від температури теплоносія на вході. Незначне падіння температури теплоносія призводить до значного падіння теплового коефіцієнта ЕХМ, в порівнянні з АБХМ. Тому ежекторний ступень запропоновано використовувати перед АБХМ щоб спрацювати в генераторі ЕХМ високопотенційне тепло теплоносія.

Згідно запропонованої схеми (рис.1) тепло теплоносія з температурою 90 °С використовується в випарній частині генератора ЕХМ. Потім зі зниженою до 85 °С температурою теплоносії подається в АБХМ в результаті чого на виході з АБХМ отримують теплоносії з температурою $\approx 72 \text{ }^\circ\text{C}$. Для дотримання умови підтримки температури зворотного теплоносія на вході в газопоршневий двигун не вище 70 °С, решта надлишкового тепла теплоносія відводиться в економайзерною частиною генератора ЕХМ для проміжного нагріву рідини перед випарною частиною генератора.

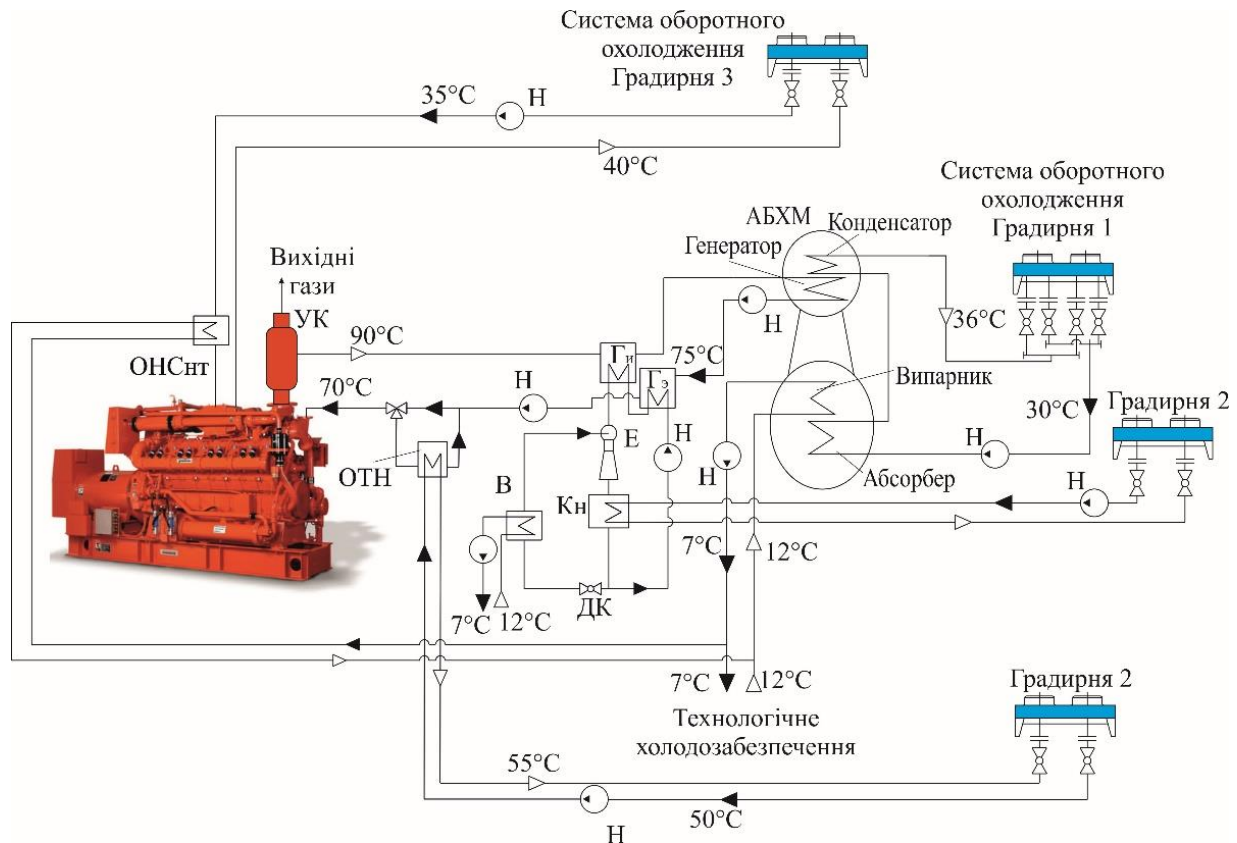


Рисунок 1 Схема запропонованої ступеневої системи трансформації скидного тепла ГПД в холод в ЕХМ і АБХМ: УК – утилізаційний котел; Гн, Ге – генераторна і економайзерна секції ЕХМ; ДК – дросельний клапан; Кн – конденсатор; В – випарник; Е – ежектор; градирня 2 – аварійного скидання тепла; ОН – охолоджувач теплоносія; ОНСнт – охолоджувач надувної суміші; Н – насос

Для запропонованої схеми були розраховані загальна холодопродуктивність, а також її складових - холодопродуктивності ЕХМ і АБХМ. При цьому було встановлено що, через використання частини теплоти теплоносія в генераторній секції ЕХМ перед АБХМ, і як результат зниження його температури, спостерігається зниження кількості теплоти використаного в АБХМ запропонованої схеми і трансформованого в холод. Але за рахунок додаткового холоду, одержуваного в ЕХМ, загальна холодопродуктивність трохи зростає.

Для запропонованої схеми системи трансформації скидного тепла ГД в холод були проведені розрахунки приросту холодопродуктивності при різних теплових коефіцієнтах ЕХМ. Було встановлено що використання ЕХМ в запропонованій схемі системи трансформації скидного тепла ГД в холод доцільно при її тепловому коефіцієнті 0,15 і вище. Так як при тепловому коефіцієнті ЕХМ 0,14 НЕ буде приросту холодопродуктивності в порівнянні з базовою схемою системи.

Висновки

Шляхом трансформації надлишкової теплоти, зазвичай скидається в атмосферу, в холод в ЕХМ можна збільшити холодопродуктивність установки автономного електро-, тепло- та

холодопостачання, при можливості експлуатації ЕХМ з підвищеним тепловим коефіцієнтом. При цьому при значенні теплового коефіцієнта ЕХМ $\zeta = 0,4$ можна досягти 18% приросту холодопродуктивності системи в порівнянні з базовим її значенням.

Література

- [1]. Economic utilization of Biomass and Municipal Waste for power generation. Some energy lasts for generations. *GE Jenbacher Company Overview*. June 13, 2007. 39 p.
- [2]. Elsenbruch T. Jenbacher gas engines a variety of efficient applications / T. Elsenbruch. București, October 28, 2010. 73 p.
- [3]. GTI Integrated Energy System for Buildings. Modular System Prototype/ G. Rouse, M. Czachorski, P. Bishop, J. Patel // GTI Project report 15357/65118: Gas Technology Institute (GTI). – January 2006. – 495 p.
- [4]. Радченко А.Н., Зубарев А.А., Остапенко А.В., Грич А.В. Повышение эффективности утилизации теплоты газового двигателя ступенчатой трансформацией. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2018. № 6 (150). С. 39–43. <https://doi.org/10.32620/akt.2018.6.06>

[5] Радченко А.М., Радченко Р.М., Остапенко О.В. Розділ 14. Трансформація теплоти когенераційних газопоршневих модулів установки автономного електро- тепло- та холодозабезпечення технологічного виробництва. *ПОВНОЦІННЕ ХАРЧУВАННЯ: інноваційні аспекти технологій, енергоефективного виробництва, зберігання та маркетингу: колективна монографія* / за ред. проф. В.В. Євлаш, проф. В.О. Потапова, проф. М.І. Радченко, проф. Н. Л. Савицької. – Х.: Світ книг, 2016. – С. 354-387.

Відомості про авторів

Олексій Остапенко, к.т.н, доцент кафедри кондиціювання та рефрижерації, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-7343-6743](https://orcid.org/0000-0001-7343-6743).



АБСОРБЦІЙНО-АДСОРБЦІЙНА ХОЛОДИЛЬНА МАШИНА З ТРАНСФОРМАЦІЄЮ СКИДНОЇ ТЕПЛОТИ ВІД ГАЗОВИХ ДВИГУНІВ

Остапенко О.В.✉

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

Анотація

Ключові слова: тригенерація, абсорбційна холодильна машина, адсорбційна холодильна машина, утилізація теплоти.

Виконано аналіз типової системи трансформації скидної теплоти газових двигунів в холод. Встановлено наявність значних втрат теплоти. Запропонована ступінчаста абсорбційно-адсорбційна система, застосування якої забезпечує скорочення втрат теплоти і приріст холодопродуктивності.

Вступ

Газові двигуни, що працюють на природному газі і альтернативних газоподібних паливах (біогаз і т.п.), знаходять все більш широке застосування в установках автономного енергозабезпечення. Провідні двигунобудівні фірми випускають когенераційні модулі - зі штатними теплообмінниками для отримання гарячої води або водяної пари за рахунок використання теплоти випускних газів, надувного повітря або газоповітряної суміші (ГПС), що охолоджує сорочку двигуна води і мастила. Хоча когенераційні модулі легко інтегруються в системи тепло- і холодопостачання конкретних об'єктів, однак аналіз енергетичної ефективності таких тригенераційних систем показує наявність втрат теплоти і обумовлену ними недовиробіток холоду.

Актуальність досліджень

З умови підтримки теплового стану двигуна, що забезпечує його надійну експлуатацію, температура зворотного (охолодженого) теплоносія, який повертається в когенераційну систему ГД від АБХМ, обмежується її специфікаційним значенням $t_{зв} = 70$ °С. При його перевищенні надлишок теплоти скидається в атмосферу, а при меншій температурі зворотного теплоносія $t_{зв}$ до нього поміщується частина гарячого теплоносія, який виходить з когенераційного модуля і повертається в нього, минаючи АБХМ.

Викладення основного матеріалу

Рішення завдання підвищення ефективності трансформації теплоти ГД в холод розглядалося на прикладі тригенераційної установки автономного електро-, тепло- і холодозабезпечення заводу ТОВ "Сандора" - "Pepsico Ukraine" (м. Миколаїв, Україна). Проектування і монтаж

установки виконані ПНВП "СІНАПС" "GE Energy" (м.Київ) та ТОВ "Хладотехника" (м.Миколаїв). Тригенераційної установка включає 2 когенераційних газових двигуна JMS 420 GS-N.LC GE Jenbacher (електрична потужність одного ГД 1400 кВт, тепла потужність 1500 кВт). Теплота, яка надходить від когенераційного модуля трансформується абсорбційною бромистолітєвою холодильною машиною (АБХМ) AR-D500L2 Century в холод, який витрачається на технологічні потреби і для роботи центральних кондиціонерів, що забезпечують охолодження повітря в машинному відділенні, з якого він надходить на всмоктування турбокомпресора ГД.

Відповідно до існуючої схеми при температурі зворотної (охолодженої) води на виході з АБХМ, наприклад $t_{зв} = 75...80$ °С, тобто вище її специфікаційного значення $t = 70$ °С на вході в теплообмінники ГД, що забезпечує оптимальний тепловий стан ГД, частина зворотної води охолоджується в охолоджувачі зворотного теплоносія (ОТН) з відведенням надлишкової теплоти в атмосферу градирнею 2. Повертати надлишкову теплоту в АБХМ недоцільно через її знижений температурний потенціал, $t_{зв} = 75...80$ °С, в порівнянні з температурою гарячого теплоносія на вході АБХМ: $t_{г} = 90...95$ °С, оскільки зниження температури гарячого теплоносія на вході АБХМ викликаючи погіршення ефективності трансформації тепла в холод - зниження теплового коефіцієнта ζ .

Зниження температури теплоносія в АБХМ зазвичай становить не більше $\Delta t = 15$ °С, а реально навіть дещо менше, що не дозволяє охолоджувати теплоносій до температури на вході в ГД $t = 70$ °С, що забезпечує підтримку теплового стану ГД на необхідному рівні, і викликає необхідність скидати надлишкову теплоту в атмосферу градирнею 2 аварійного скидання. Через відповідних втрат теплоти теплові коефіцієнти

системи утилізації теплоти ГД виявляються значно нижче теплових коефіцієнтів власне АБХМ, що зумовлює істотне зниження холодопродуктивності.

Для скорочення існуючих втрат тепла, можна встановити додатково адсорбційну холодильну машину (АДХМ) відразу після існуючої АБХМ. Робочий режим АДХМ такий, що вона здатна використовувати теплоносії невисокого потенціалу з температурою 70...80 °С який в наслідкивіє охолоджується в ній до 10 °С. В запропонованій схемі тригенераційної установки в АДХМ використовується теплоносії після абсорбційної машини з температурою 75 °С, охолоджуючись в ній до 67 °С. Подаючи на АДХМ частину, а саме 68,9% (85,3м3/год) від повної (123,8м3/год) витрати теплоносія, отримуємо 2 потоки зворотного теплоносія з температурами 75 °С після АБХМ і 67 °С після АДХМ. При змішуванні яких знову в один потік з температурою 70 °С. Вона відповідає специфікаційному значенню температури зворотного теплоносія, що подається на охолодження вузлів двигуна.

Висновки

За рахунок утилізації надлишкової теплоти, раніше скидається в атмосферу, можна збільшити холодопродуктивність тригенераційної установки на величину 400-450 кВт, доводячи холодильну потужність установки майже до номінальної величини у 2000 кВт.

Також за рахунок використання ступеневої трансформації підвищується ефективність (тепловий коефіцієнт) системи утилізації з $\zeta = 0,5$, для базового варіанту, до $\zeta = 0,7$ для варіанту з ступеневою абсорбційно-адсорбційною холодильною машиною.

Література

- [1]. Elsenbruch T. Jenbacher gas engines a variety of efficient applications / T. Elsenbruch. București, October 28, 2010. 73 p.
- [2]. Adsorption Heat Pump - Building Equipments // Mitsubishi Plastics, Inc. – 4 p.
- [3]. GTI Integrated Energy System for Buildings. Modular System Prototype/ G. Rouse, M. Czachorski, P. Bishop, J. Patel // GTI Project report 15357/65118: Gas Technology Institute (GTI). – January 2006. – 495 p.
- [4]. Радченко А.М., Радченко Р.М., Остапенко О.В. Розділ 14. Трансформація теплоти когенераційних газопоршневих модулів установки автономного електро- тепло- та холодозабезпечення технологічного виробництва. *ПОВНОЦІННЕ ХАРЧУВАННЯ: інноваційні аспекти технологій, енергоефективного виробництва, збереження та маркетингу: колективна монографія* / за ред. проф. В.В. Євлаш, проф. В.О. Потапова, проф. М.І. Радченко, проф. Н. Л. Савицької. – Х.: Світ книг, 2016. – С. 354-387.

Відомості про авторів

Олексій Остапенко, к.т.н, доцент кафедри кондиціонування та рефрижерації, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-7343-6743](https://orcid.org/0000-0001-7343-6743).



ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДЕН

Шостак В.П., Самохвалов В.С., Єлеонська О.С. ✉

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

Анотація

Ключові слова: суднові дизельні установки, відхідні гази, токсичні оксиди, експлуатація, Міжнародна морська організація.

Аналізується ситуація, що склалася останнім часом у впровадженні енергозберігаючих технологій на морські судна з прямою передачею потужності на гребний гвинт. Робиться акцент на більш розширене застосування цих технологій як засіб скорочення витрат палива та шкідливих викидів із суден.

Вступ

Суттєвим споживачем важкого палива і на порядок менше дизельного являються морські транспортні судна, які оснащуються переважно малооборотними двигунами і гвинтами фіксованого кроку, що забезпечують рух суден. Такі двигуни мають значну верхню температуру циклу (понад 1900 °С), завдяки цьому високий ККД (близько 50 %), практично мінімально досягнутому витрату палива і суттєві викиди токсичних оксидів. Зниження токсичного впливу на довкілля лежить, зокрема, через енергозбереження при русі судна. У даній роботі вказується один із засобів досягнення максимального енергозбереження.

Актуальність досліджень

В експлуатації транспортного судна домінують режими повного ходу. Саме на цих режимах відбувається основна витрата палива та викидається в навколишнє повітря значна кількість оксидів вуглецю, сірки й азоту, які мають в тій чи іншій мірі токсичний вплив на морське довкілля. Отже, енергоефективність силових установок суден заслуговує постійної уваги і невпинних пошуків її підвищення.

Викладення основного матеріалу

Енергоефективність суднової рухової установки, як основного споживача паливомасляних матеріалів, формується на стадії прийняття проектних рішень, а проявляється безпосередньо в експлуатації, більш за все на режимах повного ходу.

Серед основних проектних рішень, впроваджуваних або перспективних, для транспортних суден зазначимо наступні:

- оснащення додатковим рушієм – тяговим повітряним змієм (кайтом) значної площини [2];

- передбачення, планування й установлення часових рамок періодичного очищення й фарбування підводної частини корпусу судна;

- встановлення обладнання для глибокої утилізації вторинної теплоти головного двигуна [1, 2, 3];

- застосування валогенератора поряд з дизель-генераторами;

- розміщення обладнання й автоматизованої системи для визначення обставин, за яких доцільним (а, значить і обов'язковим!) стає режим економного ходу;

- встановлення спеціального адаптованого до конкретного судна програмного забезпечення для вибору раціонального маршруту на рекомендованій рейсовій лінії.

Перелічений список проектних рішень, звичайно, не є вичерпним. Проте, на наш погляд, він цілком реальний, а рішення, з огляду на їх реалізацію і енергоефективність, не можуть впроваджуватися по залишковому принципу. Не має підстав вважати ці рішення нездійсненними, або занадто обтяжливими для суднобудівників і судновласників. Не виникає сумнівів і щодо зниження рейсових витрат палива та токсичного впливу на морське довкілля. Сучасний рівень кваліфікації суднового екіпажу та систем автоматизації на базі мікропроцесорної техніки достатній для безперечного використання нового додаткового (назвімо його екологічним) суднового обладнання. Також не буде зайвим відмітити, що при налагодженні справи у розглядаємому аспекті зменшення затрат на паливо компенсуватиме додаткові витрати на впровадження екологічного обладнання, ба більше, ще й матиме позитивний економічний ефект, тобто знизить собівартість морських перевезень.

Проте, по факту маємо ситуацію, хочеться вірити, неусвідомленого супротиву впровадження паливозберігаючих й економічно доцільних ідей, до яких відносяться перелічені вище

проектні рішення. На наш погляд, це може бути пояснено відсутністю стимулів, які б заохочували осіб, причетних до транспортування вантажів морем, застосовувати відповідне екологічне обладнання.

Наголосимо, що енергозбереження проявляється в сфері експлуатації судна, а не в проектній організації й суднобудівному заводі чи верфі. А тому згадані стимули повинні стосуватися, в першу чергу, капітана, старшого механіка та й судновласника. Вони ж повинні перекривати додатковий клопіт від наявності на судні енергозберігаючих технологій і мати як фінансову складову, так і моральну. При цьому приведемо лише один приклад, який ефект може дати, зокрема, глибока утилізація вторинних енергоресурсів, не на папері, а в діючій судновій енергетичній установці. Маємо понад десять відсотків (!) додаткової пропульсивної потужності без витрат палива. Це на контейнеровозі «Emma Maersk» датської компанії А.Р. Моелер-Маєрск (штаб-квартира в Копенгагені), який вступив в дію у 2003 році. Проте, ми не спостерігаємо широкого впровадження подібної утилізації.

Висновки

1. З великою ймовірністю в правоті та надією на порозуміння зазначимо, що розробку і впровадження вказаних вище стимулів може й зобов'язана здійснити Міжнародна морська організація, оскільки енергозбереження й екологія – перш за все.

2. Наявний досвід і натурні дослідження по застосуванню на суднах глибокої утилізації, кайтів, економходу, валогенераторів, якомога частішого очищення корпусу від обростання й корозії, вибору раціонального маршруту повинні спонукати осіб, причетних до транспортування вантажів морем, до широкого впровадження цих енергозберігаючих технологій.

Хочеться вірити, що здоровий глузд переможе!

Література

[1]. Шостак, В.П. Передача механічної енергії від утилізаційної турбіни на гребний гвинт [Текст] / В.П. Шостак, Б.М. Личко, А.Ю. Манзюк // Суднова енергетика: стан та проблеми. – Матеріали Міжнародної науково-технічної

конференції 7-8 листопада 2019 р. – Миколаїв: НУК. – С. 35-37.

[2]. Шостак В.П., Кісарова А.І. Витрата палива й екологічність судової пропульсивної установки з кайтом. *Вісник НУК (електронне видання)*. 2013, № 3.

[3]. Schmid, H. Less Emissions Through Waste Heat Recovery. Switzerland: Wärtsilä Corporation, 2004. p. 10.

[4]. Waste Heat Recovery System (WHRS) for Reduction of Fuel Consumption, Emission and EEDI / MAN Diesel & Turbo // Copenhagen, Denmark, p. 30.

Відомості про авторів

Володимир Шостак, к.т.н., професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та теплоенергетики, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-8071-389X](https://orcid.org/0000-0002-8071-389X).




Віктор Самохвалов, к.т.н., доцент, доцент кафедри теплотехніки, Херсонський навчально-науковий інститут НУК ім. адмірала Макарова, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0003-0264-4881](https://orcid.org/0000-0003-0264-4881).



Ольга Єлеонська, старший викладач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та теплоенергетики, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, [ORCID ID: 0009-0003-3911-0784](https://orcid.org/0009-0003-3911-0784).



ТЕХНОЛОГІЇ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ СУДНОВИХ ДВЗ ТЕПЛОВИМ НАСОСОМ

Калініченко І.В. , Казенов Є.Є.

Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна

Анотація

Ключові слова: водяна пара, вторинні теплові ресурси, джерело теплоти низького потенціалу, теплонасосна парогенеруюча установка.

Розглянуто варіант використання на судах теплонасосних парогенеруючих установок для виробки водяної пари, джерелом споживаної теплоти низького потенціалу (у випарнику) у яких використовуються вторинні теплові ресурси ДВЗ. Це дозволяє відмовитися від роботи допоміжного котла на ходовому режимі судна, а отже заощадити невідновлювані джерела енергії.

Вступ

На теперішній час на транспортних судах до 95 % у якості головного двигуна для суднової енергетичної установки (СЕУ) використовуються поршневі двигуни внутрішнього згоряння. Одними з найпоширеніших ДВЗ на судах є малооборотні двигуни (МОД), в яких частота обертання колінчатого валу знаходиться в діапазоні від 50 до 250 хв⁻¹ з діапазоном потужності від 2000 до 90000 кВт.

Враховуючи величезний вплив морських вантажних перевезень за допомогою суден на товарообмін у світі, та величезну сумарну теплову потужність суднових головних двигунів підвищення ефективності комплексного використання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) суднових ДВЗ стає актуальним.

Так в суднових МОД в ефективну роботу перетворюється лише частина теплоти (48...54 %), що виділяється при згорянні палива, все інше складають втрати. З них частина теплоти (18...20 %) уноситься відхідними газами (ВГ), частина теплоти (18...21 %) передається через охолоджувач наддувного повітря (ОНП), частина теплоти розсіюється безпосередньо через елементи і корпус двигуна (до 1 %), а частина передається до системи змащення (3...4 %) та до системи охолодження втулок циліндрів двигуна (6...8 %).

Одним з основних методів і технологій підвищення ефективності комплексного використання ПЕР СЕУ традиційно є утилізація вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР) різних речовин, що відводять теплоту від суднових МОД. Утилізація цих втрат, по перше, підвищує економічність суднових МОД, по друге, вирішує дві важливі екологічні задачі: зберігає невідновлювані природні ресурси і зменшує теплове забруднення навколишнього середовища.

Актуальність досліджень

На сьогоднішній день ситуація з утилізацією теплоти СДУ на транспортному флоті якісно змінилася. Підвищення ККД ГД (ККД сучасних малооборотних суднових ГД становить від 48,0 до 51,0 %) і зниження питомої витрати палива сучасних суднових дизелів супроводжується перерозподілом статей їх теплового балансу, зокрема зменшенням втрат з відхідними газами (ВГ) із зниженням температури ВГ (температура ВГ двигунів фірми "MAN Diesel & Turbo" знизилася до 235...265 °С, а двигунів фірми "Wartsila" - до 257...298 °С) при одночасному зростанні частки теплоти, що відводиться в охолоджувачі наддувного повітря (ОНП) Ці фактори в сукупності різко знижують ефективність традиційних схем утилізації теплоти. Стає складним одночасне забезпечення водяною парою як підігрівачів різних середовищ на судні, так і утилізаційного турбогенератора, що призводить до необхідності введення в роботу допоміжного котла (ДК) [1, 2].

Як один з варіантів вирішення цієї проблеми може розглядатися використання на судах теплонасосних парогенеруючих установок (ТНПУ) для виробки водяної пари, джерелом споживаної теплоти низького потенціалу (у випарнику) у яких були б вторинні теплові ресурси ГД. Це дозволило б, по-перше, утилізувати скидаючу теплоту, зменшуючи тим самим теплове забруднення навколишнього середовища, по-друге, відмовитися від роботи ДК на ходовому режимі судна, а отже заощадити невідновлювані джерела енергії (котельне паливо).

Викладення основного матеріалу

Теплонасосний напрямок утилізації вторинних теплових ресурсів СДУ для виробництва водяної пари в науково-технічній літературі раніше вже розглядався. В роботі [3] представлена схема

роботи ТНПУ, де розглядалися різні варіанти теплоутилізуючих контурів на низькокиплячих робочих тілах для одержання водяної пари тиском 0,2 МПа і вище за рахунок теплоти надвуглеводородного повітря і охолоджуючої ГД води. У якості робочого тіла ТНПУ рекомендувалися висококиплячі рідини, наприклад хладон R114 (CF₂ClCF₂Cl) та хладон R22 (CHF₂Cl), але і R114 і R22 потрапляють під обмеження, що накладаються Монреальським протоколом.

Однак даних, наведених у розглянутих вище джерелах, недостатньо для оцінки перспективності теплонасосного напрямку утилізації низькопотенційної теплоти СДУ. Параметри роботи дизелів наведені для застарілих моделей двигунів, не обґрунтований вибір робочого агента, не проведені конструктивні розрахунки основних апаратів.

Тому метою дослідження є з'ясування технічної можливості та доцільності теплонасосної утилізації низькопотенційної теплоти СДУ з метою виробництва водяної пари для різних суднових споживачів.

Як судно-прототип для проведення розрахункового дослідження був вибраний танкер водотонаажністю D = 35970 т, розробки ЦКБ Ізумруд (м. Херсон). На танкері встановлені ГД марки 6ДКРН 60/195-10 потужністю N_{ном} = 9370 кВт, два ДК, один з яких КАВ 6,3/7 має паропродуктивність 6,3 т/годину, а інший КАВ 16/16 - 16 т/годину, та утилізаційний котел КУП 660 паропродуктивністю 5 т/годину. В табл. 1 приведено теплове навантаження при експлуатації судна танкера в холодній зоні [4].

З табл. 1 видно, що в даному режимі експлуатації судна для задоволення всіх споживачів у водяній парі паропродуктивності УК недостатньо, тому на судні використовують додатково ДК.

В якості джерела низького потенціалу розглядається вода, що охолоджує втулки циліндрів. Схема підключення та сумісної роботи ТНПУ та водоопріснювальної установки приведена на рис. 1.

Таблиця 1. Парове навантаження при експлуатації судна танкера в холодній зоні

Споживачі пари	Тиск пари, МПа	Витрати пари, кг/год
Загальносуднові	0,2...0,3	1246
Споживачі СЕУ	0,5...0,7	3512
Підігрівачі вантажу	0,3...0,7	2402
Всього	-	7160

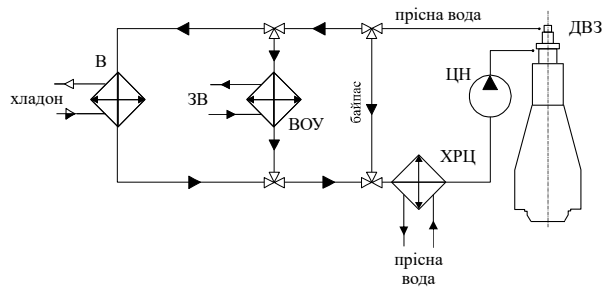


Рисунок 1. Схема з'єднання випарника ТНПУ до системи охолодження ДВЗ: В – випарник теплового насоса; ЗВ – забортна вода; ВОУ – водоопріснювальна установка; ХРЦ – холодильник системи охолодження втулок циліндрів ДВЗ; ЦН – циркуляційний насос

Вибір параметрів роботи ТНПУ визначається, з одного боку, параметрами охолоджуючої води ДВЗ, що є джерелом низько потенціальної теплоти, а з іншого, - наявністю на судні споживачів пари, в першу чергу, підігрівачів вантажу. Аналіз параметрів суднових споживачів теплової енергії показує, що вони можуть бути розділені на три основні групи: що використовують водяну пару низького (0,3 МПа), середнього (0,5 МПа) і високого (до 0,7 МПа) тисків, прийнята схема двох тисків, принцип дії якої детально описано в [5]. Водяна пара тиском 0,9 МПа виробляється в традиційному утилізаційному водяному котлі за рахунок теплоти ОГ ГД. В якості альтернативного ГД для танкера розглядалися сучасні малооборотові двигуни 6RTflex50-D фірми "Wartsila" з номінальною потужністю N_{ном} = 9600 кВт та двигун 6G50ME-C9 фірми "MAN" з потужністю N_{ном} = 9960 кВт.

Таким чином, проведені розрахункові дослідження (табл. 2) показали безсумнівні енергетичні переваги від установки на судні ТНПУ.

Таблиця 2. Результати розрахунку ТНПУ для розглянутих ГД

Параметр, одиниця вимірювання	Головний двигун	
	Wartsila	MAN
Витрати водяної пари 0,3 МПа, кг/с (кг/год.)	0,207 (745,2)	0,131 (471,6)
Витрати водяної пари 0,5 МПа, кг/с (кг/год.)	0,5241 (1887)	0,3309 (1191)
Витрати палива ДГ на привід компресорів, кг/с (кг/год.)	0,02979 (107,2)	0,01881 (67,7)
Витрати палива ДК при одержанні водяної пари, кг/с (кг/год.)	0,0502 (181,8)	0,03170 (114,1)
Кількість заощадженого палива ТНПУ, кг/год. (%)	73,3 (36,7)	46,4 (34,9)
Тепловий коефіцієнт ТНПУ COP	3,37	3,24

Отримані результати вказують на перспективність теплонасосного напрямку утилізації

низькопотенційної теплоти СДУ і доцільність проведення подальших досліджень.

Висновки

На сьогоднішній день на водному транспорті питання утилізації скидної теплоти СДУ залишаються вкрай актуальними. Одним з варіантів вирішення цього завдання з урахуванням змінних параметрів роботи суднових дизелів є впровадження теплонасосних парогенеруючих установок.

Остаточний вибір режимних параметрів роботи ТНПУ (у тому числі і марки хладону) повинен проводитися на основі оптимізаційних розрахунків, моделюючих конструктивні і вартісні характеристики апаратів установки.

Література

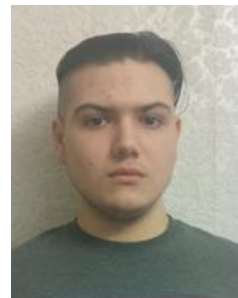
- [1]. Радченко Р.Н., Радченко М.І., Бес Т., Сирота А.А., Калініченко І.В. Охолодження повітря на вході головного двигуна транспортного судна. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2012. №10. С. 61-67.
- [2]. Радченко А.М., Коновалов Д.В., Калініченко І.В., Чен Нінь, Хан Баочен. Охолодження наддувного повітря головного суднового двигуна абсорбційною бромистолітєвою холодильною машиною в екваторіальних широтах. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2020. №2 (162). С. 30-35.
- [3]. Радченко Р.Н. Аналіз альтернативних варіантів охолодження циклового повітря малооборотного дизеля транспортного судна. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2014. № 5 (112). С. 104-108.
- [4]. Konovalov, D., Kobalava, H., Radchenko, M., Gorbov, V., Kalinichenko, I. Development of the Gas-Dynamic Cooling System for Gas Turbine Over-Expansion Circuit. In: Ivanov, V., Pavlenko, I., Liaposhchenko, O., Machado, J., Edl, M. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. DSMIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp 249–258. Springer, Cham (2022). doi.org/10.1007/978-3-031-06044-1_24.
- [5]. Андреев А.А., Калініченко І.В. Порівняльна оцінка енергетичної ефективності суднових паровиробничих установок різних типів. *Зб. наук. пр. НУК*. 2007. № 2 (413). С. 100-106.

Відомості про авторів

Іван Калініченко, к.т.н., доцент кафедри теплотехніки, Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-6765-6168](https://orcid.org/0000-0001-6765-6168).



Стар Казенов, здобувач вищої освіти, Херсонський навчально-науковий інститут Національного Університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, Херсон, Україна



СПЕЦИФІКА АВІАЦІЙНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ВАНТАЖІВ ЯК ФАКТОР МІЖНАРОДНОЇ ІНТЕГРАЦІЇ

Кучма О.С. ✉

Національний авіаційний університет, Україна

Анотація

Ключові слова: авіаційні перевезення, вантажі, міжнародна інтеграція.

Проаналізовано специфіку авіаційних перевезень вантажів як фактору міжнародної інтеграції. Метою наукового дослідження було визначення аспектів інтеграції у частинці організації авіаційних перевезень, як елементі світової глобальної транспортно-логістичної системи. Під час дослідження використані методи дедукції, експертних оцінок, статистичного та ринкового аналізу. Наукова новизна визначається чітко сформульованими та обґрунтованими визначеними аспектами протікання інтеграційних процесів на авіаційному транспорті.

Вступ

Авіаційне перевезення вантажів – найскладніший вид перевезень серед усіх видів транспорту, якій потребує особливої уваги від усіх учасників транспортного процесу: вантажовідправників, вантажоодержувачів, агентів, авіакомпаній, аеропортів, експедиторів, логістичних операторів. Авіаперевезення характеризується підвищеними вимогами до безпеки перевезень, жорстко регламентуються міжнародними і національними нормативно-правовими актами, мають значні обмеження щодо вантажів, їх об'ємно-масових характеристик, потребують ретельного планування. Крім того не можливо до кінця передбачити зміни стану деяких вантажів, наприклад, живих тварин, в процесі авіаперевезення. При авіаперевезенні вантажів враховують зовнішні та внутрішні фактори, що діють на вантаж в процесі перевезення. Крім того часто вантажі, що здебільшого перевозяться повітряним транспортом мають внутрішні властивості, які можуть призвести до виходу їх з транспортабельного стану в процесі перевезень. Зокрема це стосується небезпечних вантажів, живих тварин, вантажів, чутливих до часу та температури, тощо.

Актуальність досліджень

При перевезенні вантажів авіатранспортом велика увага приділяється процесу планування перевезення та підготовки вантажу до перевезення, оскільки це закладає основу для безпечного та цілісного перевезення вантажів. Повітряний транспорт має найбільш жорсткі обмеження порівняно з іншими видами транспорту щодо номенклатури перевезених вантажів, їх властивостей, обмеження з об'ємно-масових

характеристик вантажних одиниць, забезпечення транспортабельного стану, вимог та тари, упакування, засобів пакування, оформлення документації, завантаження транспортних засобів.

Проблемам організації авіаційних перевезень вантажів, на нашу думку, приділяється явно недостатня увага, проте можемо відзначити ряд найбільш цікавих останніх наукових досліджень, які є найбільш значущими. Ряд досліджень [1-4] цікаві вирішенням цілої низки наукових задач пов'язаних із проектуванням інтегрованих систем доставки вантажів за принципами логістики, створення моделі оперативного управління вантажопотоками авіаперевізника, аналізу факторного впливу на умови мультимодальної доставки спеціальних категорій вантажів за участю авіатранспорту. Також слід відзначити цікаві рішення при проведенні Д.Л. Мальяренко аналізі зміни вантажопотоків на авіаційному транспорті в умовах невизначеності [5]. Проте, не було виявлено наукових робіт які стосуються дослідження специфіки авіаційних перевезень вантажів як фактор міжнародної інтеграції.

Викладення основного матеріалу

Розглядаючи інтеграційні процеси, які протікають на авіаційному транспорті слід відзначити, що вони проявляються в таких аспектах:

1. *Розвиток комерційного співробітництва між авіакомпаніями.* До цього відноситься широке розповсюдження комерційних угод, таких як Інтерлайн угоди, код-шерінгові угоди, прорейтові угоди, пульні угоди тощо. Це сприяє взаємному признанню перевізних документів різних

авіакомпаній, а також розширяє ринки авіаційних послуг.

2. *Створення альянсів авіаперевізників.* Це укріплює позиції авіакомпаній на ринку авіаційних перевезень.

3. *Розвиток угод про «відкрите небо».* Це з одного боку посилює конкуренцію на ринку авіаційних послуг, з іншого боку робить ці послуги більш доступними для авіаційного клієнтури.

4. *Впровадження правил, стандартів та рекомендації міжнародних авіаційних організацій, зокрема ICAO та IATA.* Це призводить до підвищення якості авіаційних послуг для клієнтури, а також дотримання єдиних умов та вимог до авіаційних перевезень у різних країнах та авіа підприємствах.

5. *Більш широке залучення авіаційного транспорту до участі в мультимодальних ланцюгах постачань.* Цьому сприяє діяльність логістичних інтеграторів, які можуть організувати перевезення за участю різних видів транспорту та часто оперують транспортними засобами різних видів транспорту.

6. *Розширення спектра послуг авіакомпаній та аеропортів.* Збільшення вимог клієнтури до авіаційних послуг призвело до появи цілого спектру додаткових послуг авіакомпаній та аеропортів, пов'язаних з авіаційним перевезенням. Авіакомпанії та аеропорти стали пропонувати своїй клієнтури не тільки авіаційне перевезення та наземне обслуговування, а й комплекс інших послуг, зокрема, доставка в та з аеропорту, упакування та переупакування вантажу, оформлення супровідної документації, митне очищення тощо.

7. *Розширення участі авіакомпаній у глобальних дистрибуційних системах, системах взаєморозрахунків.* Це значно спрощує процеси продажу авіаційних перевезень, а також проведення розрахунків між авіа підприємствами. Крім цього це розширюється спектр послуг, що надаються глобальними дистрибуційними системами за рахунок супутніх послуг.

8. *На розвиток інтеграційних процесів на авіа транспорті значний вплив здійснила глобалізація світової торгівлі.* Зокрема, розвиток електронної торгівлі призвів до зростання обсягів перевезень цих товарів авіаційним транспортом, зростання ринку авіаційних експрес-перевезень вантажів та пошти.

9. *На інтеграційні процеси на авіаційному транспорті значний вплив останнім часом здійснює цифровізація галузі.* Процеси надання авіаційних послуг в авіакомпаніях та аеропортах включають технології Інтернету речей, блокчейну, BigData, віртуальної реальності, мобільних датків, RFID, інформатизації операції

обслуговування пасажирів та обробки вантажів, розширення можливостей автоматизованих систем, які застосовуються на різних етапах процесів обслуговування, розвиток принципів самообслуговування тощо.

10. *Розвиток «зелених» технологій.* Авіаційний транспорт активно підключився до рішення проблем декарбонізації, зокрема цьому сприяє прийнята програма CORSIA.

Зрештою можемо стверджувати, що інтеграційні процеси на авіаційному транспорті мають загалом техніко-технологічні, організаційно-правові та соціально-економічні аспекти.

Техніко-технологічні аспекти включають урахування особливостей техніки та технологій авіаційного транспорту при організації мультимодальних перевезень. Зокрема на авіаційному транспорті найбільш жорсткі вимоги до безпеки перевезень, що впливає на об'ємно-масові характеристики авіаційних вантажних одиниць та їх тару та упакування. Також існує широкий перелік вантажів, заборонених до повітряного перевезення. Авіаційні транспортні засоби мають обмежену вантажоємність та вантажомісткість у порівнянні з іншими видами транспорту. Авіаційні засоби пакування (ULD) мають специфічний трапецевидний профіль і застосовуються тільки на авіаційному транспорті, що потребує переформування їх та перевантаження вантажів у процесі мультимодального перевезення. Авіаційний транспорт є магістральним та потребує взаємодій з іншими видами транспорту при доставці «від дверей до дверей».

Організаційно-правові аспекти потребують узгодження вимог авіаційних правил та стандартів при організації мультимодального перевезення. Соціально-економічні аспекти відображаються в організації значущих для суспільства перевезень. Авіаційний транспорт використовується при організації доставки вантажів та пасажирів у віддалені та важкодоступні регіони, доставці гуманітарних вантажів, вантажів за програмами ООН, тощо. Але авіаційні тарифи є найбільш високими серед тарифів інших видів транспорту тому він частіше використовується при доставці вантажів чутливих до часу та температури та високоцінних вантажів.

Висновки

Інтеграційні процеси на авіаційному транспорті продовжують поглиблюватися. Були визначені особливості авіаційного виду транспорту щодо особливостей міжнародної інтеграції, а також були критично проаналізовані відповідні наукові дослідження. Запропоновано розглянути інтеграційні процеси, які протікають на авіаційному транспорті у 10 чітко

сформульованих та обґрунтованих аспектах. Додатково охарактеризовано техніко-технологічні, організаційно-правові та соціально-економічні аспекти інтеграційних процесів на авіаційному транспорті. Подальші наукові дослідження повинні стосуватися визначення інструментарію організації процесів доставки вантажів за участю авіатранспорту в умовах міжнародної інтеграції.

Література

[1]. Sen Y., Voitsehovskiy V., Lytvynenko S., Borets I., Rusanova S., Lytvynenko L. Realization of a nonlinear multiproduct model of cargo traffic management of the network air carrier. *Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences*. 2021. 74(4). 561-567. [doi:10.7546/CRABS.2021.04.11](https://doi.org/10.7546/CRABS.2021.04.11)

[2]. Voitsehovskiy V., Grygorak M., Lytvynenko S., Gabrielova T., Lytvynenko L. Designing Integrated Cargo Delivery Systems on Logistics Principles. *Lecture Notes in Mechanical Engineering. Safety in Aviation and Space Technologies*. Springer, Cham. 2022. 9. 73-82. [doi:10.1007/978-3-030-85057-9_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85057-9_7)

[3]. Lytvynenko S., Voitsehovskiy V., Grygorak M., Gabrielova T., Patkovskiy S., Lytvynenko L. Operational Management Model of Air Carrier's Cargo Flows as a Smart Logistics Tool for Sustainable Development. *Lecture Notes in*

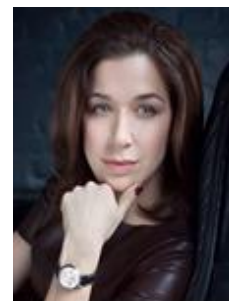
Net-works and Systems. Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. 2023. 509. 13-22. [doi:10.1007/978-3-031-11058-0_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-11058-0_2)

[4]. Raicheva L., Mykhalchenko O., Pryimuk O., Voitsehovskiy V., Kaplunovska A., Vasylenko I. Factor influence on the multimodal delivery conditions of special categories of cargo in economic system. *AD ALTA: Journal of Interdisciplinary Research*. 2023. Vol. 13(2). Special issue XXXVII. P. 131-134.

[5]. Маляренко Д.Л. Врахування виникнення ризиків при зміні вантажопотоків на авіаційному транспорті в умовах невизначеності. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Том 34 (73). № 4. С. 256–260. [doi:10.32782/2663-5941/2023.4/41](https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.4/41)

Відомості про авторів

Олена Кучма, аспірант кафедри організації авіаційних перевезень, Національний авіаційний університет, Київ, Україна, [ORCID ID: 0009-0009-1351-4020](https://orcid.org/0009-0009-1351-4020).



ДОСЛІДЖЕННЯ ВАРІАНТІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОНОМІЧНОСТІ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК ШЛЯХОМ ЗНИЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ РОБОЧОГО ТІЛА

Качмар В.А.[✉], Семенов М.М.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

Анотація

Ключові слова: газотурбінні установки, абсорбційний чилер, охолодження повітря.

Метою роботи є підвищення економічності газотурбінних установок у теплу пору року шляхом зниження температури робочого тіла. Розглянуті варіанти використання абсорбційних чилерів. Запропоновано їх використання. Розглянуто три варіанти чилерів для охолодження повітря. Встановлено, що охолодження повітря слід виконувати у чилерах, що використовують для роботи насичену пару або гарячу воду.

Вступ

Газотурбінні установки (ГТУ) завдяки своїм малим масо-габаритним показникам і високій маневреності знайшли широке використання в газотранспортній галузі, промисловій та муніципальній енергетиці та є перспективними для використання в якості головних і допоміжних двигунів на транспортних судах. Істотним їх недоліком є невисокий коефіцієнт корисної дії (34-38%). Ще однією негативною особливістю роботи ГТУ є суттєве погіршення їх параметрів при підвищенні температури навколишнього повітря [1, 2].

Метою роботи є підвищення економічності газотурбінних установок у теплу пору року шляхом зниження температури робочого тіла.

Викладення основного матеріалу

З підвищенням температури повітря на вході до газотурбінного двигуна його потужність та ККД падають. Так, для ГТД ДГ80 з ростом температури повітря з 15 °С до 35 °С його потужність знижується приблизно на 5,2 МВт (з 24,6 МВт до 19,4 МВт), а ККД – з 36,3% до 33,3 % [1, 3].

При охолодженні повітря на вході до ГТД можна підвищити параметри двигуна до рівня відповідного температурі зовнішнього повітря 15 °С.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розглянути можливі способи зниження температури повітря на вході до ГТД;
- розробити схему установки для охолодження повітря і вибрати її оптимальні параметри;
- виконати розрахунок енергетичних та економічних показників ГТУ з різними варіантами

системи охолодження зовнішнього повітря і вибрати оптимальний.

Для охолодження повітря на вході до ГТД з 35 °С до 15 °С необхідно відібрати від нього 1,86 МВт тепла. Наразі основним способом охолодження повітря є впорскування та випаровування води на вході до двигуна [4]. Перевагою цього способу є простота його реалізації, а відсутність громіздких поверхневих теплообмінників дозволяє зберегти незмінними масо-габаритні показники ГТУ. У якості недоліку можна вказати істотну витрату спеціально підготовленої води, яка після проходження трактом ГТД викидається до навколишнього середовища разом з вихлопними газами.

Якщо ставити на меті тільки охолодження повітря без корисного використання відібраного тепла, то вирішити поставлену задачу можливо використавши абсорбційні холодильні машини (АБХМ), або, як їх ще називають, чилери. Джерелами енергії для роботи чилерів можуть бути паливо, насичена пара з тиском 0,8 МПа, гаряча вода з температурою 88 °С [5, 6].

Таким чином, отримаємо наступні варіанти використання абсорбційних чилерів:

– газотурбінні установки простого циклу (без теплоутилізаційного контуру) можливо постачати чилерами з прямим підігрівом від згорання палива;

– газотурбінні установки з паровими та водогрійними котлами раціонально постачати чилерами з паровим або водяним обігрівом, які будуть отримувати енергію від відборів пари або води котлів.

Слід зауважити, що при використанні чилерів тепло, що відбирається ними від вхідного повітря, необхідно відводити до навколишнього середовища за допомогою, наприклад, апаратів повітряного охолодження.

Розглянуто три варіанти чилерів для охолодження повітря [5, 6]:

- чилер з прямим паливним нагрівом з ефективним холодильним коефіцієнтом $\mu=1$;
- чилер з паровим обігрівом ($\mu=1,2$);
- чилер з водяним обігрівом ($\mu=0,71$).

Температура холодної води на вході/виході з цих чилерів становить 12/7 °С, що дозволить виконати охолодження повітря на вході до ГТД у поверхневих теплообмінниках до температури 15°С.

Отримані наступні економічні показники ГТУ:

- у випадку використання чилерів з прямим паливним нагрівом ККД установки складе 32,6 %;
- у випадку використання чилерів, що працюють на відборі частки пари від котла-утилізатора, коефіцієнт використання палива установки складе 75,3 %;
- у випадку використання чилерів, що працюють на відборі частки гарячої води від газового підігрівача мережної води котла-утилізатора, коефіцієнт використання палива установки складе 81,6 %.

Таким чином, використання чилерів, що працюють на паливі, приводить до зниження економічності установки.

Значний інтерес можуть викликати способи охолодження повітря на вході до ГТД з використанням відібраного тепла для теплопостачання теплових споживачів. Корисно використати це тепло можливо або для теплопостачання низькотемпературних споживачів тепла з температурою теплоносія до 30 °С, які зустрічаються рідко, або збільшив його потенціал до 60–100 °С за рахунок використання теплових насосів.

Оціночні розрахунки показали, що охолодження повітря на вході до ГТД з 35 °С до 15 °С з використанням його тепла для теплопостачання приведе до збільшення виробництва корисної енергії на 36 %, з яких 26 % буде отримано за рахунок покращення параметрів ГТУ, а 8 % за рахунок корисного використання тепла, що отримано від повітря.

Висновки

При охолодженні повітря, що поступає на вхід до ГТД у теплу пору року, з 35 °С до 15 °С потужність ГТД можна підвищити на 27,8 %, а ККД – на 9 %.

Розглянуто три варіанти чилерів для охолодження повітря. Встановлено, що охолодження повітря слід виконувати у чилерах, що використовують для роботи насичену пару або гарячу воду. Використання чилерів, що працюють на

паливі, приводить до зниження економічності установки.

Використання тепла, що відбирається від повітря, для теплопостачання теплових споживачів дозволяє покращити показники установки ще на 8 % при умові підвищення його температурного потенціалу до 60–100 °С. Це можна виконати за рахунок використання теплових насосів.

Література

- [1]. Миколаївські газотурбінні двигуни та установки. / Під. ред. В.І. Романова. - ДП НВКГ "Зоря"-Машпроект", ЦентрНДІКР "Машпроект". - Миколаїв: Південь-Інформ, 2005. - с. 304.
- [2]. Gas turbine world 2014-15 GTW handbook. Vol. 31. Pequot Publishing Inc. 2015. 198 p.
- [3]. Каталог двигунів "Зоря"-Машпроект" [Електронний ресурс]: Офіційний сайт ДП НВКГ "Зоря"-Машпроект" Режим доступу до документу: <http://zmturbines.com>
- [4]. Water mist intercooler increases LM6000 hot day output 20 %. *Gas Turbine Word*. 1998. №5. Р. 28.
- [5]. Бараненко О.В., Попов А.В., Тимофіївський Л.С., Волкова О.В. Абсорбційні бромистолітєві перетворювачі теплоти нового покоління. *Холодильна техніка*. 2001. №4. С. 18-20.
- [6]. Корольков А.Р., Попов А.В., Попов А.В. Абсорбційні бромистолітєві водоохолоджувальні та водонагрівальні трансформатори теплоти. *Проблеми енергозбереження*. № 1 (14), 2003.

Відомості про авторів

Микола Семенов, доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та теплоенергетики, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, [ORCID ID: 0000-0003-2271-0161](https://orcid.org/0000-0003-2271-0161).



Віталій Качмар, ЗВО, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.



ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА БЕЗПЕКИ СУЧАСНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК НА АВІАЦІЙНОМУ ТРАНСПОРТІ

Сироїжка І.О. 

Льотна академія Національного авіаційного університету, Україна

<i>Анотація</i>	
<i>Ключові слова: авіаційний транспорт, енергетичні установки, авіаційні двигуни, штучний інтелект</i>	<i>Мета праці полягає в дослідженні інноваційних рішень для підвищення надійності та безпеки енергетичних установок на авіаційному транспорті. Виконано аналіз основних проблем використання передових технологій та впровадження штучного інтелекту в експлуатацію авіаційних двигунів. Також в цій праці розглядається важливість дотримання безпечних умов в провадження штучного інтелекту.</i>

Вступ

Сучасні енергетичні установки, які використовуються на авіаційному транспорті, стикаються з постійними викликами щодо підвищення їх надійності та забезпечення безпеки. Це особливо важливо в контексті швидкого розвитку технологій та зростання вимог до екологічних стандартів. Відмови енергетичних установок можуть призвести до серйозних аварій, загроз життю та навколишньому середовищу, тому пошук інноваційних рішень для підвищення їх надійності та безпеки є актуальною задачею.

Актуальність досліджень

Аналіз сучасних проектів та досліджень свідчить, що проблема надійності та безпеки енергетичних установок на авіаційному транспорті залишається актуальною. Попри значних кроків, зроблених у вдосконаленні цих систем, випадки аварій та неполадок все ще трапляються.

Існуючі підходи не завжди дають можливість ефективно вирішувати ці проблеми, що підкреслює потребу в подальших дослідженнях та розробці нових інноваційних рішень.

Основні проблеми:

- *Аварії та несправності:* Авіаційні аварії, пов'язані з відмовою енергетичних установок, можуть мати серйозні наслідки, включаючи людські жертви, екологічні катастрофи та значні економічні збитки.
- *Неефективність:* Існуючі підходи до забезпечення надійності та безпеки не завжди є оптимальними, що призводить до надмірного витрачання ресурсів та зниження ефективності роботи авіаційного транспорту.

На рисунку 1 включені лише авіакатастрофи (з людськими жертвами), у яких відмова двигуна була прямою причиною події, при цьому дані за 2023 рік є попередніми [1].

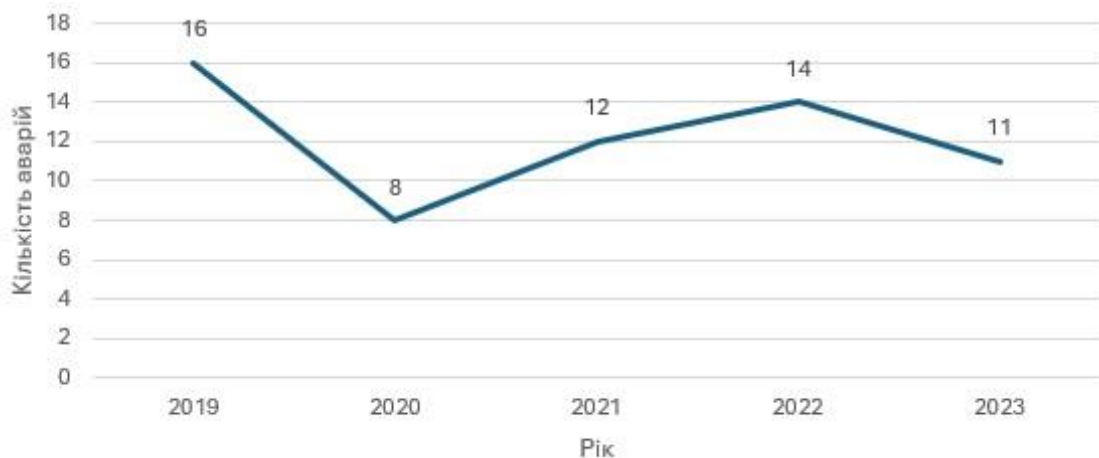


Рисунок 1. Графік авіакатастроф по причині відмови авіаційного двигуна

Викладення основного матеріалу

Одним з потенційних напрямків вирішення проблеми є використання передових технологій моніторингу та діагностики, які дозволяють оперативно виявляти потенційні проблеми та уникати аварійних ситуацій. Також важливим аспектом є вдосконалення конструкції та матеріалів, що використовуються в енергетичних установках, для забезпечення їх стійкості та довговічності. Все це можна розділити на такі пункти рішень для покращення надійності:

- технології моніторингу та діагностики (розвиток датчиків та систем збору даних, які надають інформацію про стан різних компонентів енергетичних установок; використання аналітики даних та штучного інтелекту для прогнозування потенційних проблем і вчасного вжиття запобіжних заходів; впровадження бездротових мережних та IoT засобів для постійного моніторингу та зв'язку з центральними системами управління);

- вдосконалення конструкції та матеріалів (дослідження та застосування нових композитних матеріалів з підвищеною стійкістю до термічних, механічних та корозійних впливів; використання 3D-друку для створення складних деталей з вдосконаленими характеристиками міцності та довговічності);

- автоматизовані системи управління (розробка алгоритмів та програмного забезпечення для автоматичного регулювання параметрів енергетичних установок з урахуванням зовнішніх умов та внутрішніх параметрів; інтеграція систем штучного інтелекту, які можуть навчитися адаптуватися до змінних умов експлуатації та швидко реагувати на потенційні загрози).

Розглянемо ці пункти більш детально.

Розвиток датчиків та систем збору даних, які надають інформацію про стан різних компонентів енергетичних установок, є ключовим напрямком в покращенні надійності та безпеки сучасних енергетичних систем на транспорті. Сучасні технології вимагають точного та надійного моніторингу різних параметрів роботи енергетичних установок для запобігання неполадкам, аваріям та забезпечення безперебійної роботи систем.[2]

Одним із основних аспектів розвитку є поширення датчиків, які можуть вимірювати різні фізичні параметри, такі як температура, тиск, вібрація, рівень напруги та струму, та інші. Ці датчики вбудовані в різні компоненти енергетичних установок, що дозволяє постійно відстежувати їх стан та прогнозувати можливі проблеми.

Паралельно з розвитком датчиків відбувається також поширення систем збору та обробки даних. Великі обсяги даних, зібраних в реальному часі від датчиків, потребують ефективних

засобів їх аналізу та інтерпретації. Дані, зібрані датчиками використовуються для прогнозування можливих проблем, що дає можливість вжити заходів для їх усунення до того, як вони призведуть до серйозних несправностей. Сучасні системи збору даних здатні обробляти великі потоки інформації, використовуючи алгоритми штучного інтелекту та машинного навчання для прогнозування можливих проблем.

Використання штучного інтелекту стає все більш важливим для прогнозування потенційних проблем в енергетичних установках та для вчасного вживання запобіжних заходів. Набуття великого обсягу даних з різних джерел, включаючи датчики моніторингу, системи збору даних та зовнішніх джерел, створює можливості для застосування аналітики та штучного інтелекту в енергетичній сфері.

Одним із ключових аспектів використання аналітики даних та штучного інтелекту є їх можливість виявляти відхилення в роботі енергетичних систем, які можуть служити індикаторами можливих проблем. [3] За допомогою алгоритмів машинного навчання можна аналізувати дані про такі параметри, як температура, тиск, вологість тощо, що дозволяє виявляти проблеми у звичайних шаблонах роботи системи.

Додатково, системи штучного інтелекту навчаються прогнозувати можливі проблеми та виявляти закономірності між різними факторами, що впливають на роботу енергетичних установок. Наприклад, за допомогою аналізу даних про температуру, тиск, навантаження, системи штучного інтелекту можуть передбачати знос деталей або потенційні відмови обладнання та надавати рекомендації щодо вжиття запобіжних заходів.

Крім того, не потрібно забувати про впровадження і бездротових мережних та Інтернет речей (IoT), що стає все більш важливим для постійного та безперебійного моніторингу та забезпечення зв'язку з центральними системами управління в енергетичних установках на авіаційному транспорті.

Бездротові мережі та IoT засоби дозволяють збирати дані з різних компонентів енергетичних установок без необхідності фізичного підключення до центральної системи. [4] За допомогою бездротових датчиків та IoT пристроїв можна отримувати дані про робочі параметри в режимі реального часу. Це дозволяє оперативно реагувати на зміни у стані системи та вчасно вживати заходів для запобігання можливих проблем.

Крім того, бездротові мережі та IoT засоби забезпечують зв'язок з центральними системами управління. Це дозволяє передавати дані з енергетичних установок на авіаційному транспорті в центральні системи для подальшого аналізу та

обробки. Такий підхід дозволяє отримувати комплексну інформацію про стан системи та приймати обґрунтовані рішення щодо її управління та обслуговування.

Один із основних викликів, який стоїть перед проектуванням та виробництвом авіаційних двигунів – це потреба у матеріалах, які можуть витримувати великі термічні, механічні та корозійні навантаження, зокрема в умовах екстремальних температур, високого тиску та агресивного середовища, а також мати невелику масу. Це потрібно для того, щоб покращити льотні характеристики повітряних суден.

Дослідження проводяться з метою виявлення нових матеріалів або покращення властивостей існуючих за допомогою додавання різних компонентів, які підвищують їхню стійкість до впливу температури, механічного навантаження та корозії. [5] Для цього використовують композитні матеріали, такі як вуглепластик та склопластик, особливо використовуються для створення лопаток компресора першого ступеня.

Для виробництва з нових матеріалів (композитні матеріали) можна використовувати технологію 3D-друку для створення складних деталей. Одним з головних переваг використання 3D-друку є можливість створювати складні форми та структури, які були б важко виготовити за допомогою традиційних методів виробництва. [6] Крім того, за допомогою 3D-друку можна виготовляти деталі з високою точністю та однорідністю матеріалу, що забезпечує стабільність їхніх характеристик міцності та довговічності.

Для підвищення ефективності роботи енергетичних установок потрібно розробляти алгоритми та програмне забезпечення для автоматичного регулювання параметрів з урахуванням зовнішніх умов та внутрішніх параметрів.

Однією з головних переваг автоматичного регулювання є можливість адаптувати параметри енергетичних установок до змінних умов експлуатації та забезпечити оптимальну роботу системи в будь-який момент польоту. Для досягнення цієї мети розробляються різноманітні алгоритми, які за допомогою сенсорів та систем моніторингу, які постійно збирають дані про стан системи, ці алгоритми автоматично адаптувати робочі параметри енергетичної установки для досягнення оптимальної продуктивності та ефективності.

При інтеграції систем штучного інтелекту (ШІ) в енергетичні установки на авіаційному транспорті є одним із ключових кроків майбутнього у покращенні їхньої надійності та безпеки. Штучний інтелект може навчитися адаптуватися до змінних умов експлуатації та швидко реагувати на потенційні загрози, що може зробити його

незамінним інструментом в управлінні енергетичних установок на повітряних суден.

Однією з головних переваг інтеграції ШІ є його здатність адаптуватися до змін умов експлуатації. [3, 7] Завдяки навчанню на великих обсягах даних, системи штучного інтелекту можуть розпізнавати закономірності в роботі енергетичних систем та прогнозувати їхні зміни відповідно до змін зовнішніх чинників, таких як погодні умови, технічний стан обладнання тощо.

Крім того, інтеграція ШІ дозволить створити системи, які швидко реагують на потенційні загрози в аварійних ситуаціях. Завдяки аналізу великих обсягів даних у реальному часі, системи штучного інтелекту можуть виявляти відхилення в роботі системи та автоматично вживати необхідні заходи для їх усунення. За допомогою аналізу даних та прогностичних моделей це дозволить зменшити час реакції на проблеми та підвищити загальний рівень безпеки на авіаційному транспорті.

Висновки

Впровадження напрямків, які розглядаються в цій статті дозволить:

- ✓ Знизити ризик аварійних ситуацій.
- ✓ Підвищити надійність та безпеку польотів.
- ✓ Зменшити експлуатаційні витрати.
- ✓ Покращити екологічні характеристики енергетичних установок.

Впровадження штучного інтелекту (ШІ) в енергетичні установки на авіаційному транспорті відкриває нові перспективи для покращення їх надійності та безпеки. ШІ може допомогти системам адаптуватися до мінливих умов експлуатації та ефективно реагувати на потенційні загрози.

Переваги інтеграції ШІ:

- ✓ *Підвищення надійності:* ШІ може прогнозувати несправності та рекомендувати превентивні заходи, що значно зменшує ризик несподіваних відмов.
- ✓ *Підвищення безпеки:* ШІ може моніторити систему в режимі реального часу та автоматично вживати заходів для запобігання аварійним ситуаціям.
- ✓ *Оптимізація експлуатації:* ШІ може допомогти оптимізувати параметри роботи систем, що призведе до економії палива та зниження викидів.
- ✓ *Адаптація до мінливих умов:* ШІ може адаптувати роботу систем до мінливих умов

навколишнього середовища, таких як температура, тиск, вологість, вібрація.

Але при цьому при використанні штучного інтелекту є і ризики, які перешкоджають застосуванню авіаційного транспорту:

✓ *Складність*: Системи ШІ можуть бути складними та важкими для розуміння, що може ускладнити їх тестування та сертифікацію.

✓ *Відсутність прозорості*: Рішення, прийняті системами ШІ, можуть бути непрозорими, що може ускладнити розуміння причин їхніх дій.

✓ *Кібербезпека*: ШІ-системи можуть бути вразливими до кібератак, що може призвести до катастрофічних наслідків.

Для цього важливо вжити заходи для пом'якшення цих ризиків, перш ніж використовувати ШІ в енергетичних установках на авіаційному транспорті. Ці заходи можуть включати:

✓ *Ретельне тестування та сертифікація*: Системи ШІ повинні бути ретельно протестовані та сертифіковані, щоб переконатися, що вони безпечні та надійні.

✓ *Підвищення прозорості*: Потрібно розробити методи, щоб зробити рішення, прийняті системами ШІ, більш прозорими.

Підвищення кібербезпеки: Системи ШІ повинні бути захищені від кібератак.

Література

[1]. Home | Bureau of Aircraft Accidents Archives. *Home / Bureau of Aircraft Accidents Archives*. URL: <https://www.baaa-acro.com/> (date of access: 06.03.2024).

[2]. Mateichyk V. et al. Information system for monitoring of a ship power plant and prediction of

technical condition. *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 74. P. 1179–1186. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.259>.

[3]. Суходоля О.М. Штучний інтелект в енергетиці. Нац. ін-т стратег. дослідж., 2022. <https://doi.org/10.53679/niss-analytrep.2022.09>.

[4]. Baláž M. et al. The application of Internet of Things in air transport. *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 75. P. 60–67. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.12.008>.

[5]. Grbović A. et al. Experimental and numerical evaluation of fracture characteristics of composite material used in the aircraft engine cover manufacturing. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 137. P. 106286. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106286>.

[6]. S. Kumar Panda et al. Revolutionizing product development: The growing importance of 3D printing technology. *Materials Today: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.138>.

[7] Савченко А.С., Синельников О.О. Методи та системи штучного інтелекту: Навч. посіб. Київ: НАУ, 2017. 188 с.

Відомості про авторів

Ігор Сироїжка, завідувач лабораторії кафедри конструкції повітряних суден, авіадвигунів та підтримання льотної придатності, Льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-1933-8699](https://orcid.org/0000-0002-1933-8699).



ВОДНО-ВУГІЛЬНІ ПАЛИВНІ СУМІШІ НА ТРАНСПОРТНОМУ ФЛОТІ І ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ

Настасенко В.О.✉

Херсонська державна морська академія, Україна

Анотація

Ключові слова: нафтові, газові, вугільні суднові палива, шкідливі викиди.

Економія суднового палива – важлива проблема в умовах вичерпності нафтопродуктів та парникового ефекту в наслідок їх спалювання. Перехід на водно-вугільні паливні суміші зменшує проблему вичерпності, але погіршує екологічні наслідки. Мета роботи – аналіз цих наслідків, а її наукова новизна – вироблення рекомендацій з використання цих сумішей. Спалювання 1 кг вугілля веде до викидів 3,67 кг газу CO_2 , а 1 кг нафти – до 3,14 кг CO_2 . Перехід на водно-вугільні паливні суміші в наслідок зменшення теплоти їх згоряння в 1,5...1,6 рази, відповідно збільшує їх витрати і викиди CO_2 . Виконана робота обґрунтовує недоцільність переходу на водно-вугільні суміші.

Вступ

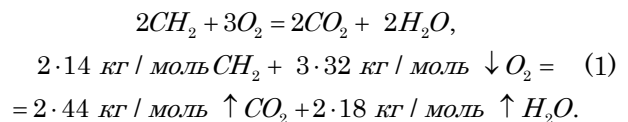
Проблема використання палива на транспортному флоті є дуже важливою, тому їй приділяється постійна увага. З другої половини ХХ століття вона вийшла за рамки інтересів тільки судновласників, оскільки загострилася можливість нехватки паливних ресурсів. Згідно прогнозів ЮНЕСКО [1] – нафта, з якої виробляють суднові палива, може бути вичерпана за наступні 70 років, природний газ – за 120 – 140 років, а вугілля – лише за 400 – 450 років. Тому його використання, в т.ч., як основного палива для транспортного флоту, стало привабливим для дослідників. Однак при їх використанні виникає ряд проблем, в т.ч. – екологічних. Їх аналізу присвячена дана робота і ряд інших робіт автора [2 – 10].

Актуальність досліджень

В останній чверті ХХ століття і особливо в сьогодення, проблема вичерпності палива доповнилася проблемою росту загрози парникового ефекту, яка увійшла до головних проблем людства. Оскільки при спалюванні палива утворюються гази парникової групи CO і CO_2 , їх кількісний аналіз для основних видів суднових палив є головною метою виконуваної роботи. Її наукову новизну складає вироблення рекомендацій для вибору палив з найменшими шкідливими викидами газів парникової групи. Методи дослідження в даній роботі пов'язані з використанням законів технічної хімії та техніко-економічного аналізу отриманих результатів

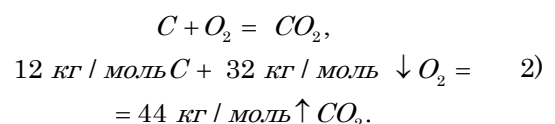
Викладення основного матеріалу

При аналізі процесів згоряння враховували, що основою високомолекулярних вуглецевих сполучень, які утворюють нафтове паливо, є елемент CH_2 , в якому вуглець (С) та водень (H_2) з'єднуються з киснем (O_2). В результаті утворюється вода H_2O та діоксид вуглецю (CO_2), який є шкідливим викидом – газом парникової групи. При цьому баланс згоряння речовин має вид (1):



Таким чином, 28 кг/моль CH_2 вилучає з атмосфери 96 кг/моль $\downarrow O_2$ і повертає до неї 88 кг/моль $\uparrow CO_2$ та 36 кг/моль парів води $\uparrow H_2O$. У перерахунку на 1 кг нафтового палива утворюється 3,14 кг діоксиду, що є екологічною проблемою його використання.

При спалюванні вугілля (2), основу якого становить вуглець С, викиди CO_2 , що виникають, найбільші у порівнянні з нафтовими паливами (1):



Таким чином, 12 кг/моль С вилучає з атмосфери 32 кг/моль $\downarrow O_2$ і повертає до неї 44 кг/моль $\uparrow CO_2$. У перерахунку на 1 кг вугілля утворюється 3,67 кг діоксиду.

Подальший аналіз показав, що теплотворна спроможність нафтових палив складає величини:

- для дизельного палива DMA – 44,80 МДж/кг;
- для важкого палива RME – 43,13 МДж/кг,
- для важкого палива RMG – 41,2 МДж/кг [12].

Для вугілля теплотворна спроможність складає величини:

- для антрациту – 28,05 МДж/кг;
- для кам'яного вугілля – 27,00 МДж/кг [12].

Таким чином, теплотворна спроможність вугілля в 1,5...1,6 разів менша теплотворної енергії нафтових палив, тому для досягнення потрібної потужності двигуна його треба спалювати більше, що відповідно збільшить кількість шкідливих викидів CO, CO₂ та об'єми ємностей для зберігання водно-вугільного палива на судні.

Висновки

1. Потреба економії суднового палива обумовлена вирішенням 3-х важливих задач: зменшення витрат на його виробництво і використання, зменшення безповоротних витрат природних ресурсів, зменшення шкідливих викидів від його спалювання.

2. Головними недоліками переходу водно-вугільні паливні суміші є збільшення викидів CO₂ при спалюванні 1 кг, та в 1,5...1,6 рази його витрат за рахунок меншої теплотворної спроможності вугілля у порівнянні з нафтовими паливами і відповідного збільшення шкідливих викидів.

3. Виконана робота обґрунтовує недоцільність переходу на водно-вугільні суміші.

Література

[1]. Кемпбел К. Грядущий нефтяной кризис – М.: Группа независимых издателей, 1997. 210 с.

[2]. Настасенко В.О. Нова концепція розвитку суднових двигунів внутрішнього згорання /Науковий вісник ХДМІ: науковий журнал. Херсон, ХДМІ, 2011. №.1(4). С. 52-66.

[3]. Настасенко В.О., Євдокимова В.А. Суднова альтернативна енергетика та особливості охорони праці і безпеки її експлуатації. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2014. Вип. 1(48). С. 77-82.

[4]. Настасенко В.А. Судовая альтернативная энергетика и реалии ее применения в современных условиях. *East European Scientific Journal*, 2016. №3(7). С. 36-47.

[5]. Настасенко В.О. Порівняння енергетичного потенціалу систем нетрадиційної суднової енергетики. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. 6-та Міжнародна науково-практична конференція*. 2015. Херсон: ХДМА. С. 73-74.

[6]. Настасенко В.А. Технико-экономическое сравнение основных видов судовой альтернативной энергетики. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування 7-а Міжнародна науково-практична конференція*, 2016. Херсон: ХДМА. С. 76-78.

[7]. Настасенко В.А. Палагний В.И. Проблемы и перспективы экономии топлива на транспортном флоте. *XII Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті»*. 2020. Херсон, ХДМА. С. 231-233.

[8]. Настасенко В.А. Развитие концепции судового двигателестроения. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування 11-а Міжнародна науково-практична конференція*. 2020. Херсон: ХДМА. С. 119-121.

[9]. Настасенко В.О. Декарбонізація на транспортному флоті, її проблеми і перспективи. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. 13-а Міжнародна науково-практична конференція*. 2022. Херсон: ХДМА. С. 112-115.

[10]. Nastasenko V. Ship Alternative Energy, Problems and Prospects for its Implementation. *International Meet on Renewable and Sustainable Energy «RENEWABLEMEET2023»*. 2023. Rome, Italy, P. 86-87.

[11]. Белоусов Е.В. Создание и совершенствование твердотопливных поршневых двигателей внутреннего сгорания. Херсон: ОАО "ХГТ". 2006. 452 с.

[12]. <http://amko.ltd/tablitza-znacheniy-udelnoy-teploty-sgoraniya-topliva>

Відомості про авторів

Валентин Настасенко, д.т.н., професор кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-0330-1138](https://orcid.org/0000-0002-0330-1138).



DETERMINING THE THERMOPRESSOR'S EVAPORATION CHAMBER SIZE FOR COMBUSTION ENGINE COOLING SYSTEMS

Halina Kobalava^{1✉}, Dmytro Konovalov^{1,2}

¹ Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ukraine

² Norwegian University of Science and Technology, Norway

Abstract

Keywords: Pressure Increase, Aerodynamic Resistance, Mach Number, Water Evaporation Process

This paper examines the design factors and technological considerations that influence the performance of the thermopressor system. A computational fluid dynamics (CFD) simulation was performed to model and analyze the water evaporation process occurring within the evaporation chamber of the thermopressor. Through empirical analysis, an equation has been developed to determine the optimal relative length of the thermopressor's evaporation chamber based on two key factors: the initial droplet diameter at the inlet and the mass concentration of water in the airflow.

Introduction

The efficiency of gas turbine power plants can be increased by using a thermopressor to cool the air circulating in the cycle [1, 2]. The efficiency of the thermopressor is influenced by several design and technological factors, such as the design of the flow path, the method of injecting water into the system, the optimal relative length of the evaporation chamber, and the aerodynamic resistance caused by the injection system, among others. Optimizing the flow path design and workflow organization is crucial for developing advanced thermopressor technologies. Simultaneously, it is necessary to analytically determine the relative length of the thermopressor's evaporation chamber, ensuring that the maximum pressure increase is achieved through thermogasdynamics compression at the chamber's outlet.

Relevance of research

In the design of thermopressor systems, one of the primary objectives is to optimize the liquid spraying process to achieve more efficient evaporation of water droplets, thereby enhancing the overall productivity of the system. The length of the evaporation chamber must be selected to ensure complete evaporation of the liquid droplets while maximizing the pressure increase. During the design process of a thermopressor (Fig. 1), it is crucial to determine the appropriate length of the working chamber that facilitates full evaporation of the liquid droplets. However, there are currently no established analytical methods for directly

calculating the required length of the evaporation section, and consequently, the working chamber.

Several models and analytical solutions exist that describe the evaporation process of droplets in an airflow, taking into account the transfer of mass, energy, and momentum between the droplets and the air [3, 4]. The calculation of the two-phase flow follows a sequential approach. Initially, the airflow is computed without considering the influence of the injected water droplets. Subsequently, the discrete phase (comprising droplet trajectories, size, velocity, position, and temperature changes) is calculated using the Lagrangian approach, based on the previously determined airflow field [5]. In the final coupling stage, the mass, energy, and momentum transfer exchanges between the two phases (air and droplets) are computed [6, 7].

This study examines the transfer and evaporation processes of water droplets within the evaporation chamber for air cooling applications. Figure 1 illustrates the thermopressor model and the evaporation chamber.

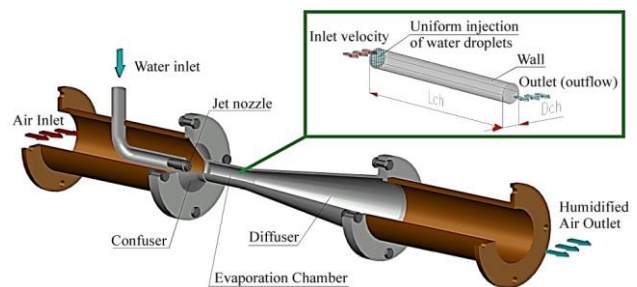


Figure 1. Thermopressor model and boundary conditions for the evaporation chamber

The standard chamber size adopted for this study has a diameter of 50 mm, with an air mass flow rate ranging from 1.0 to 1.5 kg/s. The length of the chamber is optimized to achieve the maximum pressure increase during the thermogasdynamic compression process. The water injection site is located at the chamber inlet, spanning the entire cross-section to ensure uniform droplet distribution.

Results

The main characteristics of the water evaporation process in the low-flow thermopressor evaporation chamber ($G_{air} = 1.0 - 1.5 \text{ kg/s}$) obtained by CFD simulation are shown in the following chart (Fig. 2).

To compare the calculation results, the minimum and maximum initial droplet diameters of

$\delta_p = 3 \mu\text{m}$ and $\delta_p = 15 \mu\text{m}$ were considered, as these values exhibited a positive effect from the thermogasdynamic compression process. For $\delta_p = 3 \mu\text{m}$, the maximum absolute pressure reached $P_{abs} = 338 \text{ kPa}$, corresponding to a maximum pressure increase of $\Delta P_{abs} = 12\%$ (37 kPa). As a result of contact cooling, the air temperature decreased by $\Delta T_{air} = 153 - 163 \text{ K}$, with a water mass concentration $\mu_{H_2O} = 6.1\%$ in the airflow. When the initial droplet diameter increased to $\delta_p = 15 \mu\text{m}$, the maximum absolute pressure value significantly decreased to $P_{abs} = 305 \text{ kPa}$. Consequently, the maximum pressure increases also decreased to $\Delta P_{abs} = 1.2\%$ (4 kPa). The air temperature reduction due to contact cooling was lower, $\Delta T_{air} = 133 - 159 \text{ K}$, with a water mass concentration of $\mu_{H_2O} = 5.0 - 5.9\%$ in the airflow.

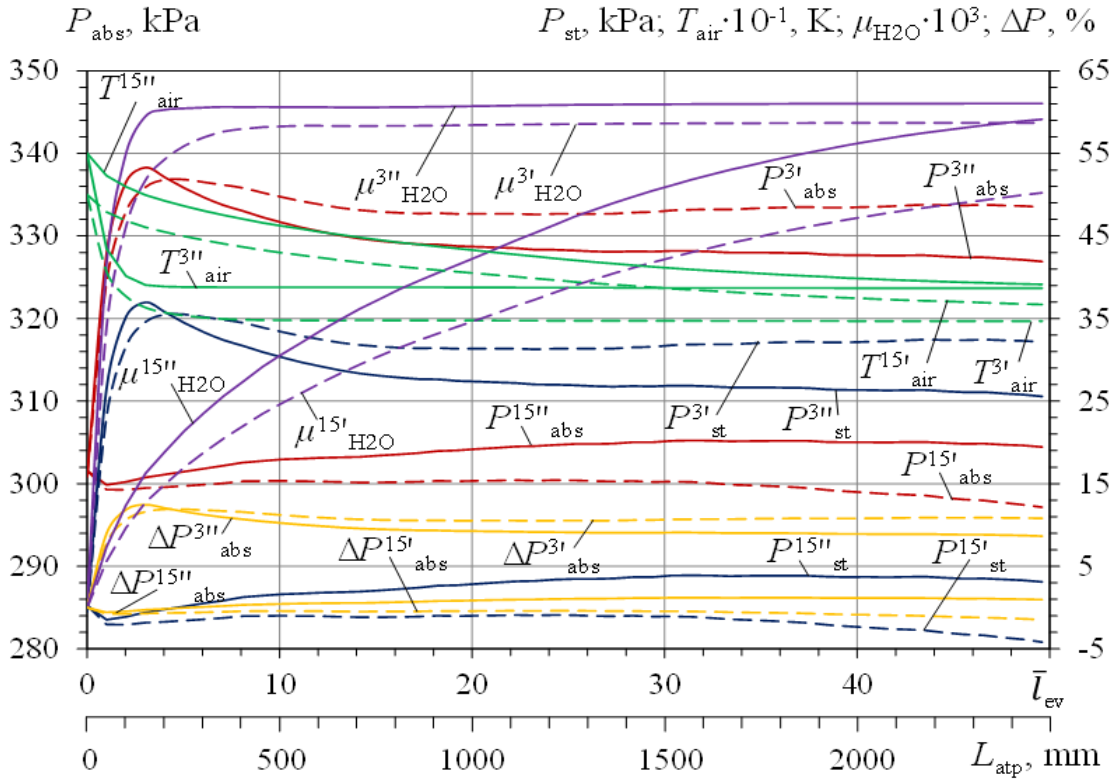


Figure 2. Dependences of absolute pressure P_{abs} , static pressure P_{st} , two-phase flow temperature T_{air} , amount of injected water μ_{H_2O} , pressure increase ΔP_{abs} on the length L_{tp} and relative length L_{ev} of the evaporation chamber: ' – at $T_{air1} = 500 \text{ K}$; " – at $T_{air1} = 550 \text{ K}$

A three-dimensional surface was constructed to analyze the influence of the initial droplet diameter at the inlet (δ_p) and the water mass concentration (mc_{H_2O}) on the length of the evaporation chamber required to achieve maximum pressure increase. Based on this surface, an analytical equation was derived to calculate the optimal relative length of the thermopressor evaporation chamber (L/D). The determination of this equation was performed

using an approximation method. The following equation was chosen, with a regression coefficient of $R = 0.9944$ and $R^2 = 0.9889$, indicating a good fit:

$$\frac{L}{D} = 5.57 \cdot 10^4 \cdot e^{-\frac{\left(\frac{\delta - 17.7}{5.96}\right)^2 + \left(\frac{mc_{H_2O} + 0.523}{0.145}\right)^2}{2}}$$

The obtained equation was used in the software package to calculate the optimal length of the evaporation chamber.

Conclusion

A CFD simulation of the water droplet evaporation process in the airflow within the thermopressor evaporation chamber was conducted. An empirical equation has been derived for calculating the relative length of the thermopressor evaporation chamber. This relative length achieves the maximum pressure increase due to thermogasdynamic compression, dependent on the initial droplet diameter at the inlet (δ_p) and the water mass concentration (mc_{H_2O}) in the airflow. The maximum pressure increase ($\Delta P_{abs} = 13\%$ or 40 kPa) corresponds to the smallest initial droplet diameter ($\delta_p = 3 \mu m$) with a relative length of the evaporation chamber $(L/D)_{tp} = 0.8 - 1.0$ at the inlet air temperature ($T_{air1} = 500 - 550 K$).

The derived equation for calculating the optimal relative length of the evaporation section is recommended for inclusion in the design methodology for low-flow thermopressors.

References

- [1]. Yu, Z., Løvås, T., Konovalov, D., Trushliakov, E., Radchenko, M., Kobalava, H., Radchenko, R., Radchenko, A. Investigation of Thermopressor with Incomplete Evaporation for Gas Turbine Intercooling Systems. *Energies*. (2023). 16(1):20. <https://doi.org/10.3390/en16010020>
- [2]. Kobalava, H., Konovalov, D., Radchenko, R., Forduy, S., Maksymov, V.: Numerical Simulation of a Thermopressor with Incomplete Evaporation for Intercooling of the Gas Turbine Engine. In: Nechyporuk M., Pavlikov V., Kritskiy D. (eds.) *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering 2020*. LNNS, vol. 188, pp. 519-530. Springer, Cham (2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-66717-7_44
- [3]. Bergman, T.L. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 7th Edition. John Wiley & Sons, New Jersey, (2011).
- [4]. Jafarmadar, S., & Jahangirramini, A.

Numerical Simulation of Flash Boiling Effect in a 3-Dimensional Chamber Using Computational Fluid Dynamic Techniques. *International Journal of Engineering*. Vol. 29(5), pp. 87-95. (2016). <https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2016.29.01a.12>

[5]. Xu, Zh., Han, Zh., Qu, H.: Comparison between Lagrangian and Eulerian approaches for prediction of particle deposition in turbulent flows. *Powder Technology* 360, 141-150 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.09.084>

[6]. Shi X., Jiang, G., Gao, J. Heat transfer comparison investigation of mist/steam two-phase flow and steam in a square smooth channel. *Proc. IMechE, Part A: J Power and Energy*. 233(7), pp. 877-889. (2019). <https://doi.org/10.1177/0957650919839593>

[7]. Narayanan, D., Anand, S., Anish, S.: Numerical Investigation on the Effect of Dry and Wet Compression on a Linear Low Speed Compressor Cascade. *Journal of Applied Fluid Mechanics* 13(1), 67-77 (2020). <https://doi.org/10.29252/JAFM.13.01.30026>

Authors' Information

Halina Kobalava, PhD in Engineering, Associate Professor of the Heat Engineering Department, Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine, [ORCID: 0000-0002-0634-5814](https://orcid.org/0000-0002-0634-5814).



Dmytro Konovalov, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Heat Engineering Department, Kherson Educational-Scientific Institute of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson, Ukraine, [ORCID: 0000-0001-7127-0487](https://orcid.org/0000-0001-7127-0487).



БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЦИРКУЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ПІДГРІВУ НАФТОВИХ ВАНТАЖІВ НА ТАНКЕРАХ

Щедролосєв О.В. ✉

Херсонська державна морська академія, Україна

Анотація

Ключові слова: експлуатаційна безпека, циркуляційна система підігріву вантажу, вивантаження нафтопродуктів, температура підігріву вантажу.

У результаті теоретичного дослідження обґрунтовано експлуатаційну безпеку циркуляційної системи підігріву нафтовантажів на танкерах під час вивантаження.

Вступ

Однією з найважливіших проблем для наливних суден є забезпечення експлуатаційної безпеки в частині запобігання вибухам і пожежам під час виконання найбільш небезпечної технологічної операції – вивантаження нафтопродуктів. Під час цієї операції звільнений об'єм вантажних танків заповнюється атмосферним повітрям [1-3]. Зниження тиску в танку і збільшення площі призводять до зростання випаровування легких фракцій вуглеводнів нафтопродуктів. У результаті створюється можливість утворення небезпечних вибухових концентрацій газової суміші в танку.

Актуальність досліджень

Найбільшою гарантією забезпечення вибухобезпечної експлуатації танкера в вищенаведених умовах є створення і постійне підтримання у вантажних танках атмосфери нездатної до займання. Для цієї мети реалізуються два основні напрямки щодо запобігання зазначеним небезпекам - обладнання газовідвідної системи і системи інертних газів.

З опублікованих матеріалів по раніше розроблених і найбільш вивченій трубчастій (змійовиковій) системі підігріву вантажів відомі й інші причини виникнення вибухонебезпечних ситуацій до і під час вивантаження вантажів [1-3]:

- у зв'язку з можливістю пожежонебезпечного оголення змійовиків у разі зниження рівня вантажу, диференту та крену танкера систему підігріву вантажу завчасно відключають;
- ефективність підігріву вантажу під час вивантаження знижується через ослаблення конвекції при зменшенні шару вантажу;
- темп охолодження вантажу до кінця вивантаження зростає зі зменшенням маси вантажу;

– для забезпечення сприятливих умов вивантаження на завершальному етапі заздалегідь створюється досить високий запас теплоти;

– створення запасу теплоти на охолодження вантажу до завершення вивантаження пов'язане з перегрівом його, зростанням випарів і створенням небезпечної ситуації.

У зв'язку з відсутністю відомостей про пожежо-небезпеку нової та дедалі ширше застосовуваної циркуляційної системи підігріву вантажів на танкерах під час вивантаження, представляє науковий і практичний інтерес теоретичне дослідження цієї задачі, розв'язуваної в рамках проведених актуальних досліджень із комплексної проблеми вдосконалення енерговикористання в спеціальних системах наливних суден і загалом суднових енергетичних установок.

Викладення основного матеріалу

Метою цієї роботи є обґрунтування умов експлуатаційної безпеки циркуляційної системи підігріву вантажу під час вивантаження нафтопродуктів із танків наливних суден.

Робота досліджуваного циркуляційного способу підігріву вантажу, на відміну від трубчастого (змійовикового), може тривати до завершення вивантаження, оскільки для її здійснення відбирається частина подачі вантажного насоса. Теплообмінник винесено з порожнини танка і розташовано на верхній палубі. Управління системою здійснюється автоматикою.

$$K = K_0 \frac{V_{ц.п} \rho_{вн}}{G_{вн} - B\tau} \quad (1)$$

де K_0 – кратність циркуляції до початку вивантаження;

$V_{ц.н}$ – об'ємна подача циркуляційного насоса, м³/с;

$\rho_{вн}$ – густина вантажу, кг/м³;

$G_{вн}$ – маса вантажу, кг;

B – продуктивність вивантаження, кг/год;

τ – змінний час вивантаження, год.

Умови підігріву вантажу до кінця вивантаження змінюються у зв'язку з кратністю циркуляції підігрітого вантажу, що пропорційно зростає, до відносно нижчого рівня вантажу.

Зростання кратності циркуляції до кінця вивантаження істотно змінює процес підігріву залишків. Підігріта частина вантажу, що вливається через сопла, розігріває і змиває залишки до приймача вантажного насоса.

Інтенсивність теплообміну характеризується переходом від вільної конвекції до вимушеного руху (механічного перемішування) теплоносія зі спадаючою масою вантажу.

На цій підставі можна стверджувати, що темп охолодження вантажу m , °C/с, до кінця зливу не зазнає змін, тобто:

$$m = dt/d\tau = const, \quad (2)$$

де dt – зміна температури вантажу за час $d\tau$ у процесі розвантаження.

Для визначення необхідної температури вантажу перед початком вивантаження, у процесі якої забезпечується необхідна температура на початок зачистки, розглянуто процес одночасного підігріву й охолодження за умови мінливої кількості вантажу під час вивантаження. Тоді з огляду на рівняння (1-2) процес підігріву - вивантаження вантажу від початку вивантаження до початку зачистки можна описати наступним диференціальним рівнянням

$$Q_0 d\tau = (G_0 + G_s - B\tau 10^{-3})(dt + md\tau)c_{вн}, \quad (3)$$

де $Q_0 = V_{ц.н} \rho_{вн} c_{вн} (t_{вих} - t_{доп})$ – кількість теплоти, що йде від підігрівача вантажу на компенсацію тепловтрат, кВт;

$c_{вн}$ – питома теплоємність вантажу, Дж/(кг·К)

$t_{вих}$ – температура на виході з теплообмінника, °C;

$t_{доп}$ – допустима температура охолодження вантажу, °C, $t_{доп} = t_{поч} = t_{вн} = t_{заст} + 10^0 C$ [4];

G_0 – кількість вантажу, що вивантажується до початку зачищення, тис. т;

G_s – кількість вантажу, що підлягає зачистці; $B\tau \cdot 10^{-3}$

$B\tau \cdot 10^{-3}$ – визначає зменшення кількості вантажу на початку процесу вивантаження, тис. т,

де B – продуктивність процесу вивантаження, тис. т;

τ – змінний час вивантаження, год;

$md\tau$ – характеризує компенсацію тепловтрат, де

$m = dt/d\tau$ – темп. охолодження вантажу, °C/год.

Таким чином, на кожен кілограм вантажу витрачається теплоти cdt – на підігрів і $cmdt$ – на компенсацію тепловтрат.

Розділивши змінні в рівнянні (3) з урахуванням (2), після деяких перетворень отримаємо

$$dt = \left(\frac{Q_0}{(G_0 + G_s - B\tau 10^{-3})c_{вн} 10^6} - m \right) d\tau. \quad (4)$$

Інтегрування рівняння (4) проведено в інтервалі температур від шуканої попереднього підігріву $t_{п.п}$ до заданої за умовами можливості перетікання вантажу $t_{доп}$.

Інтервали часу прийнято від нуля до $\tau\sigma$ часу вивантаження основної кількості вантажу. У результаті інтегрування рівняння (4) у зазначених межах отримаємо

$$t_{доп} - t_{п.п} = \frac{Q_0}{Bc_{вн} 10^3} \ln \left(1 + \frac{G_0}{G_s} \right) - m\tau_0, \text{ або}$$

$$t_{п.п} = t_{доп} - \frac{Q_0}{Bc_{вн} 10^3} \ln \left(1 + \frac{G_0}{G_s} \right) + m\tau_0. \quad (5)$$

Виходячи з умов забезпечення підтікання вантажу до приймачів вантажних насосів і відповідного зниження подачі вантажних насосів залежно від відносної величини залишків вантажу на зачищення [2], за допомогою математичної моделі розглянуто вплив процесів підігріву - охолодження в динаміці вироблюваного вивантаження на величину необхідної температури попереднього підігріву $t_{п.п}$ до початку вивантаження.

Визначення необхідної температури попереднього підігріву вантажу $t_{п.п}$ у процесі підігріву - охолодження і вивантаження вантажу проведено з використанням теплових і вантажних

характеристик стосовно серії танкерів проектів 15966 – 15968 [4].

В основу залежності зниження подачі покладено спостережуване утворення воронки і прососу повітря через всмоктувальний приймач вантажного насоса за умови зменшення висоти вантажу в танку менше ніж на 2...3 м [2].

З огляду на те, що розглянутий процес вивантаження основної частини вантажу відбувається безперервно, прийнято пропорційну залежність зниження подачі $k_{з.п}$ вантажних насосів за умови $h_з \leq 3$; у вигляді:

$$k_{з.п} = h_з/3,$$

де $h_з$ – висота залишку вантажу, що змінюється, на зачистку, м.

Результати розрахунку температури попереднього циркуляційного підігріву, або розігріву в процесі вивантаження основної маси вантажу, для забезпечення нормального зачищення, наведено в таблиці за деякими характерними положеннями рівня початку зачищення.

Таблиця. Результати розрахунку температури попереднього циркуляційного підігріву в процесі вивантаження основної маси вантажу

Найменування, одиниця виміру	Позначення	Чисельні значення, залежно від частки вантажу, що залишається на зачистку, %					Підстава, формула, джерело
		до 20	від 20 до 15	від 15 до 10	від 10 до 5	від 5 до 3	
Частка основної частини вантажу, що вивантажується	$\frac{G_0}{G_{вн}}$	0,8	0,85	0,90	0,95	0,97	по [2]
Кількість теплоти, що витрачається на компенсацію тепловтрат основної частини вантажу, кВт	Q_0	463	492	521	550	562	$Q \cdot G_0/G_{вн}$
Вагова подача вантажних насосів, тис. т/год	B	4,242	4,242	4,242	4,242	4,242	по [4]
Питома теплоємність вантажу, кДж/(кг·К)	$c_{вн}$	1,791	1,791	1,791	1,791	1,791	по [4]
	$Q_0/B \cdot c_{вн}$	0,218	0,232	0,246	0,259	0,265	розрахунок
	$\ln(1+G_0/G_з)$	1,609	1,897	2,303	2,996	3,506	розрахунок
Коефіцієнт зниження подачі вантажних насосів	$k_{з.п}$	1,00	0,85	0,65	0,33	0,15	$h_з/3$
Час зливу основної частини вантажу, год	τ_0	5,281	5,611	6,119	7,062	7,942	$G_0/(B \cdot k_{з.п})$
	$\frac{Q_0}{B \cdot c_{вн}} \ln\left(1 + \frac{G_0}{G_з}\right)$	0,351	0,440	0,566	0,774	0,929	розрахунок
Темп охолодження, К/ч	m	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	по [2]
	$m \cdot \tau_0, ^\circ C$	0,475	0,505	0,55	0,63	0,715	розрахунок
	$t_{доп} - t_{п.п}, ^\circ C$	-0,124	-0,065	+0,015	+0,138	+0,214	розрахунок

Висновки

На підставі виконаного дослідження можна зробити такі практичні висновки:

1. Температура попереднього підігріву $t_{п.п}$ перед початком вивантаження повинна відповідати $t_{доп}$.

2. Створювати запас теплоти розігрівом вантажу до початку вивантаження вище $t_{доп}$ недоцільно.

3. У процесі вивантаження основної маси вантажу найбільш енергоефективним є підігрів на рівні компенсації тепловтрат, що забезпечує необхідну температуру на початок зачистки.

4. Циркуляційний підігрів вантажу до кінця вивантаження необхідний у сучасних корпусах наливних суден з подвійними бортами і дном не стільки для підтримання нормальної продуктивності вантажних насосів, скільки для розігріву та змиву придонних і прибортових шарів нафтопродуктів, які застигають, у результаті чого можуть бути значно скорочені "мертві залишки".

5. Умови пожежонебезпеки теплообмінників циркуляційної системи підігріву вантажів значно відрізняються від умов трубчастої системи підігріву, тому що їх винесено на верхню палубу, і вони легко управляються системою автоматики.

6. Експлуатаційна безпека циркуляційної системи підігріву нафтовантажів значно вища та надійніша, ніж у трубчастої (змійовикової) системи підігріву.

7. Результати проведеного дослідження розкривають широкі можливості для подальших розробок з проблеми підвищення енергоефективності спеціальних систем і в цілому СЕУ наливних дизельних суден.

Література

[1]. Feck, A.W., Sommerhalder, J.O., 1967. Cargo pumping in modern tankers and bulk carriers. *Mar. Technol.* 4, P. 232-257.
<https://doi.org/10.5957/mt1.1967.4.3.232>

[2]. Gunner, T.J. Physical behavior of crude oil during transportation and its impact on the carriage of crude oil by sea. *Mar. Technol.* 2002. 39 (4), P. 256-265.

<https://doi.org/10.5957/mt1.2002.39.4.256>

[3]. Gojko Magazinovic. Vertical arrangement of coils for efficient cargo tank heating. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering.* 11. 2. 2019. P. 662-670.
<https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2019.02.004>

[4]. Щедролосоєв А.В. Оптимизация параметров циркуляции в системах циркуляционного подогрева грузов на наливных судах. *Зб. наук. праць УДМУ.* 2002. № 6. С. 58-66.

Відомості про авторів

Олександр Щедролосоєв, д.т.н., професор, завідувач кафедри суднобудування та ремонту суден, Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-7972-3882](https://orcid.org/0000-0001-7972-3882).



ЗАСТОСУВАННЯ ДВОПАЛИВНИХ ДВИГУНІВ НА СУЧАСНИХ СУДНАХ

Шпілева Т.М. [✉], Голдін В.А.

Херсонська державна морська академія, Україна

Анотація

Ключові слова: транспортна інфраструктура, сучасне судноплавство, газомоторне паливо, сучасні двигуни

Застосування двопаливних двигунів на сучасних суднах стає все більш поширеним з метою зменшення викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище та зниження залежності від традиційних нафтових палив. Двопаливні двигуни можуть працювати як на природному газі (зазвичай зрідженому або скрапленому природному газі), так і на нафтових паливах. У той же час, існують і обмеження застосування двопаливних двигунів, такі як високі витрати на обладнання, потреба в належній інфраструктурі для зберігання та постачання природного газу, а також технічні виклики, пов'язані з управлінням двигунами, які працюють на різних типах палива.

Вступ

Зростаюча увага до екологічних питань та постійний тиск на зменшення викидів зумовлюють інтерес до використання двопаливних двигунів. Можна визначити певні переваги застосування двопаливних двигунів на сучасних суднах:

Зниження викидів: Використання природного газу як пального може значно зменшити викиди шкідливих речовин у порівнянні з традиційними нафтовими паливами. Наприклад, спалювання природного газу може привести до значного зниження викидів оксидів азоту (NO_x) та діоксиду сірки (SO₂).

Економія: У багатьох випадках природний газ є дешевшим паливом порівняно з нафтовими паливами. Це може призвести до економії на операційних витратах для власників суден.

Покращена енергоефективність: Двопаливні двигуни можуть бути більш енергоефективними, особливо коли працюють на природному газі. Це може забезпечити кращу ефективність пального і зменшити витрати на експлуатацію.

Зменшення ризику забруднення морського середовища: Застосування двопаливних двигунів може допомогти зменшити ризик забруднення морського середовища через зменшення викидів шкідливих речовин і зменшення ймовірності випадкового розливу нафтопродуктів.

Сумісність з регулятивами: У багатьох країнах і регіонах встановлені строгі нормативи щодо викидів шкідливих речовин. Використання двопаливних двигунів може допомогти суднам відповідати цим нормативам та регулятивам.

Актуальність досліджень

В останні два десятиліття, за даними та прогнозами *British Petroleum* (BP) [4, с. 70], спостерігаються суттєві зміни в структурі світового

енергетичного споживання у бік збільшення частки екологічно безпечних первинних джерел енергії. Тим не менш, незважаючи на зростання сумарної складової відновлюваних джерел енергії (включаючи складову гідроенергії), частка викопних видів корисних копалин (вугілля, нафта та газ) у структурі енергоспоживання залишається значною, становлячи до 80% і більше.

Викладення основного матеріалу

Основним споживачем таких корисних копалин є транспортна інфраструктура, на яку припадає близько 65 % споживання нафтопродуктів. При цьому, судноплавна галузь, будучи структурною ланкою транспортної інфраструктури, впливає на ці негативні процеси. Проблеми скорочення емісії шкідливих продуктів згоряння від судових енергетичних установок (СЕУ) відносяться до найважливіших напрямків розвитку сучасного судноплавства та регулюються відповідно до вимог низки міжнародних та національних екологічних стандартів. Перспективним напрямом скорочення міри шкідливого впливу на навколишнє середовище з боку транспортних енергетичних установок найближчим часом є, наприклад, використання природного газу як палива [2]. Так, зростання флоту суден-газовозів дозволяє, з одного боку, задовольнити зростаючий попит на вуглеводневі гази в світі, а з іншого боку, призведе до збільшення екологічного навантаження на атмосферу, зокрема, до додаткових викидів парникових газів [5].

Варто відзначити, що сучасне світове двигунобудування відрізняється великою різноманітністю конструкцій, що реалізують різні технології використання газомоторного палива. Компоненти газу широко варіюються за складом та містять важкі вуглеводи [1]. Застосування такого палива в двигунах внутрішнього згоряння може викликати проблеми, пов'язані зі значним впливом складу палива на

робочий процес двигуна. Провідні виробники суднових ДВЗ обмежують нижчу межу метанового числа (MN). Наприклад, для двопаливного двигуна WÄRTSILÄ палива з метановим числом WMN < 46,8 не рекомендовані до використання, при цьому мольний вміст метану має бути не нижче 70 %, H₂ – не більше 30 % [7].

У 2013 році було прийнято в експлуатацію судно *Viking Grace* – перший у світі вантажопасажирський паром (Ro-Pax), оснащений двопаливними двигунами. Паром водотоннажністю 57000 тон, що належить *Viking Line*, працює на лінії Туреччина-Стокгольм. Він приводиться в рух чотирма двигунами WÄRTSILÄ 50DF. Аналогічною силовою установкою оснащено новий швидкісний паром *Destination Gotland*, який будується для шведського оператора *Rederi AB Gotland* [6].

Сучасні двигуни, оснащені останніми досягненнями техніки, такими як, наприклад, система упрскування *common rail*, новітні турбокомпресори, турбіна з регульованим сопловим апаратом, потребують управління безліччю робочих параметрів. Це, у свою чергу, призводить до постійного ускладнення систем управління та моніторингу. Так, система UNIC C3 може бути встановлена на всіх головних суднових та допоміжних двигунах Wärtsilä, що працюють на газі - з іскровим запаленням та двопаливних. Нею обладнано вже понад 6000 двигунів. Вона включає набір з декількох модулів, що істотно скорочує необхідну номенклатуру запчастин. Система встановлюється як на новобудови двигуни, так і замість аналогічних застарілих систем у порядку модифікації двигунів, що є у експлуатації. В звітах ІМО та UNCTAD метанол та метанольно-спиртові суміші розглядаються як перспективні заміники традиційних суднових палив [3].

Висновки

Отже зазначимо, що основною перевагою двигуна з використанням безпосередньої подачі газу є висока паливна економічність, що перевищує на 5% паливну економічність дизельного двигуна. Проте зважаючи на високу динаміку протікання процесу тепловиділення, аналогічному дизельному двигуну, відпрацьовані гази такого двопаливного двигуна містять підвищений, порівняно з двигунами, що працюють на гомогенних зріджених газових сумішах, вміст оксидів азоту, що забезпечує досягнення тільки стандартів Tier II. До суттєвих недоліків двопаливних двигунів, які використовують гетерогенні технології також слід віднести підвищену складність обладнання для підготовки газоподібного палива з необхідністю використання компресорів і криогенних насосів високого тиску (у разі використання зрідженого природного газу).

Однак, на нашу думку, енергетичні установки, що працюють на природному газі, все ж таки можуть розглядатись як перспективна базова

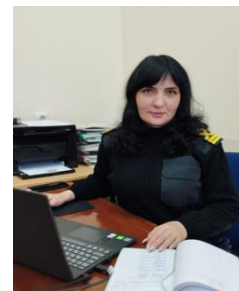
конструкція для переходу на екологічно безпечні вуглецево-нейтральні види палива, такі як біогаз, синтетичний газ та ін.

Література

- [1]. Farry M. Ethane from associated gas still the most economical. 1998. URL: <https://www.ogj.com/articles/print/volume-96/issue-23/inthis-issue/gas-processing/ethane-from-associated-gas-still-the-most-economical.html> (дата звернення: 06.03.2024)
- [2]. Khurana G. Global shipping markets. Capital Link Greek Shipping Forum. 2017. URL: <http://forums.capitallink.com/shipping/2018greece/ppt/khurana.pdf> (дата звернення: 06.03.2024)
- [3]. Remelje C. Methanol Floating Production Storage and Offloading (MFPSO). Offshore Technology Conference. 1999. January 1. URL: <https://onepetro.org/OTCONF/99OTC/conference/All-99OTC> (дата звернення: 06.03.2024)
- [4]. Statistical Review of World Energy 2021 / 70th edition. London: Whitehouse Associates, 2021. 70 p.
- [5]. Third IMO GHG Study 2014. Executive Summary and Final Report. *International Maritime Organization*. London, UK. URL: <https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/01/third-imo-ghg-study-2014-executive-summary-and-final-report.pdf> (дата звернення: 06.03.2024)
- [6]. WÄRTSILÄ. Wärtsilä GasReformer. 2015. URL: <https://www.offshore-europe.co.uk/novadocuments/31687?v=635089663131000000> (дата звернення: 06.03.2024)
- [7]. WÄRTSILÄ. Wärtsilä Methane number calculator. 2019. URL: www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/gas-solutions/methane-number-calculator (дата звернення: 06.03.2024)

Відомості про авторів

Тетяна Шпілева, старший викладач кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-3039-8086](https://orcid.org/0000-0002-3039-8086).



Віталій Голдін, випускник кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна.



APPLICATION OF THE DIFFERENTIAL POWER CONVERTER IN THE SYSTEM OF SOLAR POWER PLANTS

Volodymyr Nerubatskyi, Denys Hordiienko✉

Ukrainian State University of Railway Transport, Ukraine

Abstract

Keywords: current and voltage balancing, differential power converter, photovoltaic panel, solar power plant.

An analysis of energy collection architectures for large-scale solar power plants was carried out. The topology of a two-stage differential power converter with the characteristics of a DC collection network, which provides a higher energy output for large-scale solar power plants, is presented. The principle of operation of the converter and the flow of current in the circuit during switching are presented. The calculation of the current balancing and voltage equalization cascades, which process partial power and allow groups of photovoltaic panels to work at maximum power under the influence of environmental conditions, has been calculated.

Introduction

The capacity of photoelectric installations continues to grow and reaches hundreds of megawatts [1, 2]. Large-scale photovoltaic systems (VLS-PV) are valued for their high efficiency when their architecture is renewable and reliable. In addition, energy conversion costs are low, and the VLS-PV installation is capable of mitigating the consequences of partial shading. VLS-PV installations with distributed power electronics converters demonstrated higher energy output, better reliability, a significant reduction in design costs, and greater flexibility in the construction of photovoltaic installations [3].

The latest achievements in power electronics made it possible to develop central inverters with higher power density [4]. ABB's central high-power inverter (PVS800) is capable of achieving a maximum output power of 2 MW from up to 24 separate DC inputs from multiple PV lines. In addition, with the advent of a higher voltage of around 1500 V, a larger number of photovoltaic modules can be connected in series, thereby reducing the number of junction boxes, reducing current and improving overall efficiency [5].

The architecture of distributed maximum power point tracking (DMPPT) is one of the most promising solutions for overcoming the shortcomings associated with the low energy efficiency of photovoltaic panels [6].

This architecture has a DC-DC converter designed to track the maximum power point of each photovoltaic panel. To ensure maximum flexibility,

converters must be able to step up and down the voltage.

Relevance of research

In scientific research, some authors have achieved high efficiency using converters that control only part of the output power, such as series-connected converters, parallel power converters, and converters with direct power transmission [7, 8]. However, such converter topologies are inefficient for use in photoelectric systems.

In works [9, 10], general approaches used for load reduction, power distribution in proportion to the generator rating, and battery life extension are given, but modular sub-panel photoelectric converters cannot regulate voltage on the DC bus in response to load changes.

Research on topologies that can increase or decrease the power of photovoltaic panels is also known [11, 12]. These topologies have the effect of increasing efficiency, however, the efficiency of the system itself is limited, since the intensity of sunlight hitting the panels varies depending on the season, time and weather conditions.

Thus, the use of photovoltaic panels with the aim of improving the operating conditions of energy systems, means of transport and reducing the harmful impact on the environment, as well as further research into highly effective and inexpensive energy creators, is an actual unsolved task.

The main material of the study

Fig. 1 shows the topology of the two-stage differential power converter with the characteristics of the medium-voltage DC collection network.

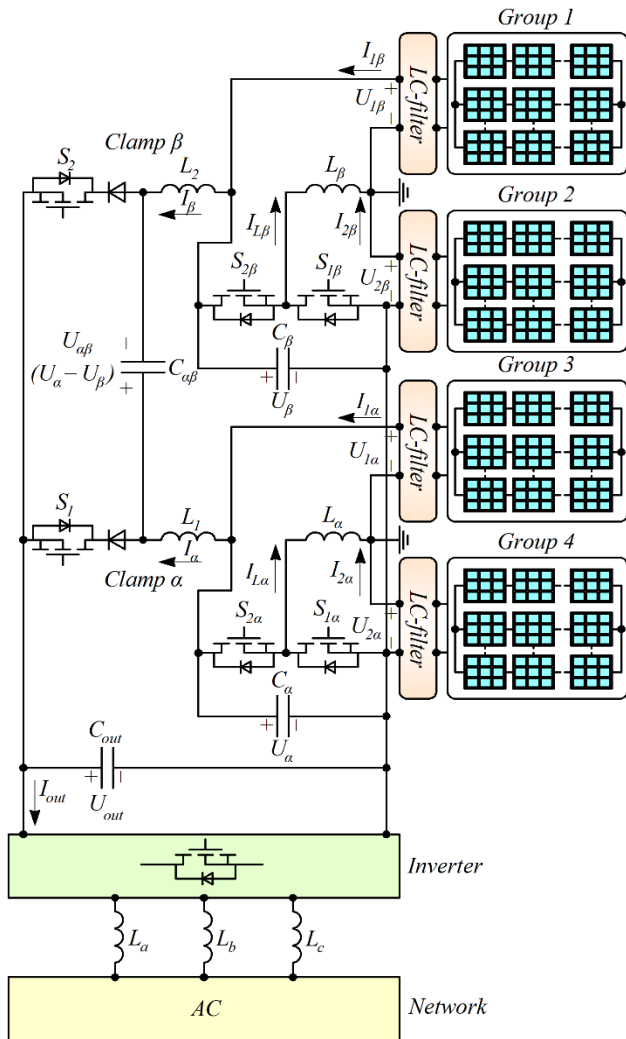


Figure 1. Topology of a two-stage differential power converter for large photovoltaic installations

As can be seen from Fig. 1, two sets of photoelectric installations (groups 1 and 2) are connected in series with grounding in the center. They are internally connected to a current balancing converter with a partial nominal value that facilitates independent control of the photovoltaic currents ($I_{1\beta}$, $I_{2\beta}$), thus guaranteeing individual tracking of the maximum power point (MPPT) for groups 1 and 2 of sections of the photoelectric installation.

At the stage of current balancing, two switches ($S_{1\beta}$, $S_{2\beta}$) are used, which work in the pulse width modulation mode to control the current $I_{L\beta}$ of the inductor L_{β} . The current balancing approach handles only a fraction of the total harvested power and requires power converters with fractional power ratings. The current balancing stage

processes the differential power from the two solar systems.

Groups 3 and 4 also have an analog current balancing converter. The negative output terminals of Groups 1 and 2 and Groups 3 and 4 are connected together to form a common point. Two positive output terminals α and β are connected to the voltage balancing converter. The function of the voltage equalization cascade consists in processing the differential power of two parallel sets: groups 1, 2 and groups 3, 4 with the help of the appropriate control of pulse width modulation by switches S_1 , S_2 . The capacitor $C_{\alpha\beta}$ in the stationary state holds the voltage difference ($U_{\alpha} - U_{\beta}$).

The given concept of current and voltage balancing guarantees that each group of photoelectric installations will work individually. MPPT point, due to which the total maximum power collection is achieved in conditions of partial shading and temperature difference.

The advantages of the proposed two-stage differential power converter include:

- current and voltage balancing cascades process partial power to achieve maximum power in conditions of partial shading;
- the current balancing stage uses switches with partially rated higher voltage and lower current, while the voltage balancing stage uses switches with higher current and lower voltage;
- high efficiency is achieved at the expense of daily power processing compared to other schemes;
- a smaller number of power converter processing units;
- the proposed approach can be scaled to several solar energy systems with a nominal capacity of several MW, consisting of many groups of photoelectric installations;
- the approach allows creating homogeneous and heterogeneous photoelectric installations using photoelectric panels from different manufacturers.

The proposed architecture is scalable to multiple inputs with efficient localized power management for multi-row PV installations, residential and large-scale PV power plants. Mass power is processed once with partial losses. The balancing capacitor $C_{\alpha\beta}$ plays an important role in balancing voltages to achieve MPP. Such an approach effectively eliminates the need for a DC-DC converter, which is required for MPPT tracking.

A homogeneous photoelectric installation is defined as an installation that has the same number of series/parallel connected modules per group.

Table 1 shows the technical characteristics of a homogeneous photoelectric installation.

Table 1. Technical characteristics of a homogeneous photoelectric installation

Parameter	Value
Photoelectric module	SPR-305-WHT
Configuration in four groups	24 consecutive / 40 parallel modules with a capacity of 293 kW
Total power of four groups P_{Σ} , MW	1.1
Switching frequency of the balancing state f , kHz	20
Capacitor C_{ab} , μF	40
Inductances L_{α}, L_{β} , mH	1.65
Inductances L_1, L_2 , μH	100

According to Fig. 1, it is assumed that groups of photoelectric installations 1, 2, 3, 4 are in different working conditions due to environmental factors. Fig. 2 shows the operating characteristics of each group at different temperatures and insolation conditions.

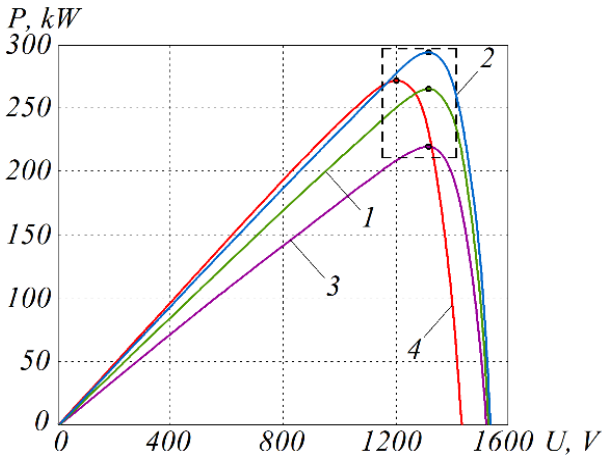


Figure 2. Characteristics of a two-stage differential power converter for large photoelectric installations: 1 – group 1 (25 °C, 0.9 kW/m²); 2 – group 2 (25 °C, 1 kW/m²); 3 – group 3 (25 °C, 0.75 kW/m²); 4 – group 4 (50 °C, 1 kW/m²)

From Fig. 2, it can be seen that there is a unique operating condition in which the voltage and current values for each group correspond to the maximum power of the panels. The characteristics of the cascades of current balancing and voltage equalization for the construction of the plant in question, at which the maximum available power is achieved, are shown in Fig. 3, 4.

Both balancing current / voltage converters according to Fig. 1 work with their special switching duty cycles to get the maximum power available.

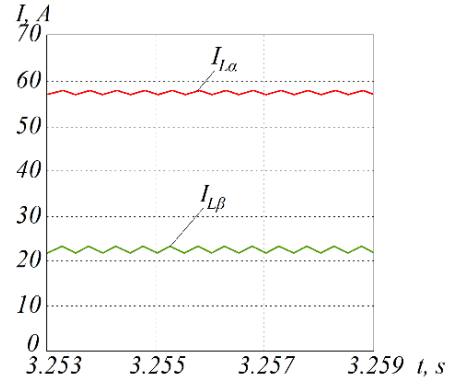


Figure 3. Maximum balancing currents of inductances L_{α}, L_{β}

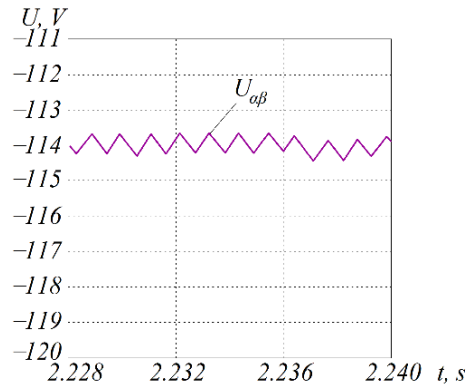


Figure 4. Capacitor voltage C_{ab}

The current balancing stage for terminal β and terminal α handles currents $I_{L\beta} = 22 \text{ A}$ and $I_{L\alpha} = 57.3 \text{ A}$, which is part of the total current. In addition, the given voltage equalization scheme works at a voltage of $U_{\alpha\beta} = -144 \text{ V}$, which is a much smaller value. Thus, the number of volt-amperes processed by the current / voltage balancing cascades is small for operation at different temperatures and insolation conditions.

Conclusion

The proposed two-stage differential power converter topology is able to work with a large-scale solar power plant at different points of maximum power, because there is a unique operating condition in which the values of voltage and current for each group correspond to the maximum panel power. At the same time, both balancing current and voltage converters work with their special switching duty cycles.

The proposed architecture is scalable to multiple inputs with efficient localized power management for multi-row PV installations, residential and large-scale PV power plants. Mass power is processed once with partial losses. The balancing capacitor plays an important role in balancing voltages to achieve MPP. Such an approach effectively eliminates the need for a DC-DC converter, which is required for MPPT tracking.

References

- [1]. Alblooshi A., Masoud M. I. Design of a 1 MW Grid-tied photovoltaic system. *2021 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*. 2021. P. 1–6. [doi:10.1109/ICEET53442.2021.9659704](https://doi.org/10.1109/ICEET53442.2021.9659704)
- [2]. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A., Khoruzhevskiy H. A. Study of the energy parameters of the system “solar panels – solar inverter – electric network”. *4th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF-2023). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1254. 012092. P. 1–12. [doi:10.1088/1755-1315/1254/1/012092](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012092)
- [3]. Khadka N., Bista A., Adhikari B., Shrestha A., Bista D. Smart solar photovoltaic panel cleaning system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 463. P. 1–8. [doi:10.1088/1755-1315/463/1/012121](https://doi.org/10.1088/1755-1315/463/1/012121)
- [4]. Singh D., Sandeep N. Multiport multilevel inverter for high-frequency AC applications. *2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. 2022. P. 1–6. [doi:10.1109/PEDES56012.2022.10080506](https://doi.org/10.1109/PEDES56012.2022.10080506)
- [5]. Khomenko I. V., Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A., Shelest D. A. Research and calculation of the levels of higher harmonics of rotary electric machines in active-adaptive networks. *4th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF-2023). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1254. 012040. P. 1–15. [doi:10.1088/1755-1315/1254/1/012040](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012040)
- [6]. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D. Efficiency analysis of DC-DC converter with pulse-width and pulse-frequency modulation. *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2022. P. 571–575. [doi:10.1109/ELNANO54667.2022.9926762](https://doi.org/10.1109/ELNANO54667.2022.9926762)
- [7]. Moghassemi A., Rahman S., Ozkan G., Edrington C., Zhang Z., Chamarthi P. Power converters coolant: past, present, future, and a path toward active thermal control in electrified ship power systems. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 91620–91659. [doi:10.1109/ACCESS.2023.3308523](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3308523)
- [8]. Cheng L., Wu W., Qiu L., Liu X., Ma J., Zhang J., Fang Y. An improved data-driven based model predictive control for zero-sequence circulating current suppression in paralleled converters. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022. Vol. 143. P. 108401. [doi:10.1016/j.ijepes.2022.108401](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108401)
- [9]. Muttaqin E. F., Maulana M. A., Fadlika I., Aripriharta A. Design and validation non-isolated boost converter for cascaded photovoltaic application. *2022 5th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE)*. 2022. P. 1–6. [doi:10.1109/ICPERE56870.2022.10037506](https://doi.org/10.1109/ICPERE56870.2022.10037506)
- [10]. Zheng Y., Cheng Z., Liu C., Liu H., Amirabadi M., Lehman B. Modular wireless power transmission for photovoltaic subpanel system. *2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2021. P. 546–553. [doi:10.1109/ECCE47101.2021.9595115](https://doi.org/10.1109/ECCE47101.2021.9595115)
- [11]. Hegazy E., Saad W., Shokair M. Studying the effect of using a low power PV and DC-DC boost converter on the performance of the solar energy PV system. *2020 15th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES)*. 2020. P. 1–8. [doi:10.1109/ICCES51560.2020.9334581](https://doi.org/10.1109/ICCES51560.2020.9334581)
- [12]. Kareem M., Kurnaz S. Improving the efficiency of solar photovoltaic power generation using improved MPPT method. *2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*. 2020. P. 1–4. [doi:10.1109/HORA49412.2020.9152882](https://doi.org/10.1109/HORA49412.2020.9152882)

Authors' information

Volodymyr Nerubatskyi, PhD, Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine, [ORCID: 0000-0002-4309-601X](https://orcid.org/0000-0002-4309-601X).



Denys Hordiienko, Post-graduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine, [ORCID: 0000-0002-0347-5656](https://orcid.org/0000-0002-0347-5656).



УТИЛІЗАЦІЯ СКИДНОЇ ТЕПЛОТИ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ ГЕНЕРАТОРІВ В ГІБРИДНИХ СЕУ, ПРАЦЮЮЧИХ НА АМІАКУ

Коробко В.В. ✉

Національний університет кораблебудування, Україна

Анотація

Ключові слова: паливна комірка, аміак, утилізація теплоти, теплові викиди, гібридна СЕУ.

В роботі розглядаються питання щодо утилізації скидної теплоти в гібридних СЕУ, які працюють на аміаку і оснащені електрохімічними генераторами. Використання аміаку в якості палива, в поєднанні з генераторами на базі паливних комірок, сприяє зменшенню емісії парникових газів, що дозволяє задовільнити вимоги ІМО до екологічності суден. Використання ЕХГ в якості основного джерела енергії для СЕУ ставить низку питань щодо взаємодії систем паливопідготовки та утилізації скидної теплоти СЕУ.

Вступ

Використання в СЕУ безвуглецевих палив, водню або аміаку є дієвим методом зменшення викидів GHG і кроком до створення екологічно безпечних суден [1]. Сучасні паливні елементи придатні для створення електрохімічних генераторів (ЕХГ), з агрегатною потужністю до десятків МВт, що повністю задовольняє можливі потреби в енергії на суднах.

На поточний момент на ринку пропонуються МОД та СОД ДВЗ, здатні безпосередньо використовувати аміак, як паливо [2]. Але таке рішення не забезпечує відсутність шкідливих для довкілля викидів, оскільки робочі процеси цих двигунів ґрунтуються на хімічному згорянні палива. В разі використання ЕХГ, які ґрунтуються на інших принципах, існує принципова можливість створення екологічно нейтральних ЕУ та практичного переходу до “Non-Combustion Technology”.

Актуальність досліджень

Для суднової енергетики ЕХГ це відносно новий тип обладнання, отже виникають питання щодо їх раціональної інтеграції в СЕУ. Зокрема PEMFC ЕХГ при роботі продукують теплові викиди, утилізація яких може суттєво підвищити ефективність гібридних СЕУ. Отже задача ефективно організації теплових потоків в гібридних СЕУ з PEMFC ЕХГ є актуальною і має практичне значення [3].

Викладення основного матеріалу

Відомі численні приклади суден з гібридними ЕУ, до складу яких входять ЕХГ, паливні комірки яких зроблені з на основі полімер-електролітних мембран, або PEM – Proton Exchange

Membrane. PEMFC найбільш поширені на практиці, оскільки мають певні переваги. Так, їх к.к.д. сягає 50 – 60%, вони працюють при температурах 80 – 200°C, налагоджене їх промислове виробництво. PEMFC ЕХГ суднового призначення мають відповідні АІР від провідних класифікаційних товариств [4,5].

Діаграма на рис. 1 показує структуру теплових потоків, яка є типовою для PEMFC. Теплові викиди сягають 42% від енергії спожитого палива, що цілком типово для паливних елементів даного типу, але вони мають низький температурний рівень (табл.1).

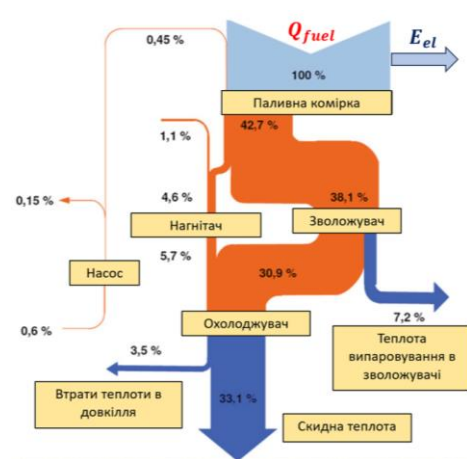


Рисунок 1. Потіки енергії в PEM FC [4]

Гібридна СЕУ (рис.2) є складним комплексом, максимальна ефективність якого може бути отримана за умов ефективного використання всіх джерел енергії.

Для гібридних СЕУ, в яких ЕХГ є головним енергогенеруючим елементом, раціональне використання скидної теплоти ЕУ потребує урахування всіх особливостей установки [4].

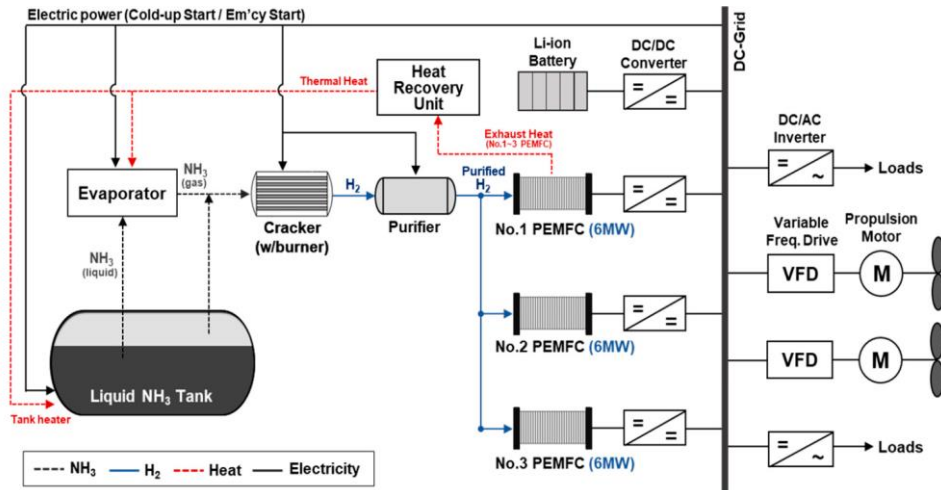


Рисунок 2. Схема гібридної СЕУ з ЕХГ [6]

Аналізуючи склад СЕУ з ЕХГ можна бачити, що основними споживачами скидної енергії будуть елементи системи підготовки палива, а саме система регазифікації скрапленого аміаку та система каталітичного крекінгу.

Вузол регазифікації скрапленого аміаку є окремим елементом, для якого розроблені відповідні схемні рішення [5, 6]. Для регазифікації криогенних палив зазвичай використовують кожухотрубні випарники, в яких фазове перетворення здійснюється за рахунок енергообміну між незамерзаючим теплоносієм та скрапленим аміаком.

Існує можливість використання потенціалу криогенної енергії скраплених палив в разі використання термоакустичних систем регазифікації. В цьому випадку теплообмінником послугує теплообмінний вузол термоакустичного двигуна. Таке рішення дозволяє отримувати додаткову механічну роботу для привода термоакустичного турбогенератора [7].

Значно складнішою є задача розробки системи каталітичного крекінгу, яка призначена для продукування палива для PEMFC - чистого водню. Параметри цієї системи, зокрема її енергоспоживання, суттєво залежать від типу каталізатора, що використовується [8].

В якості прикладу, на рис. 3 показана принципова схема системи каталітичного крекінгу фірми «Pherousa Green Shipping», яка передбачає утилізацію теплоти продуктів реакції. Саме ця система планується для використання в складі ЕУ суден з гібридними ЕУ, працюючими на аміаку.

В роботі розглянуті PEMFC ЕХГ виробництва фірми ТЕСО 3000 [9]. Ці ЕХГ побудовані за агрегатним принципом, на основі єдиного модуля FCM 400, потужністю 400 кВт. Зовнішні характеристики цього модуля були використані в даному дослідженні.

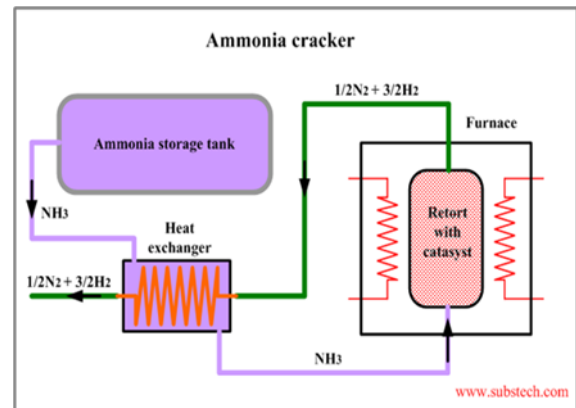


Рисунок 3. Схема СЕУ з ЕХГ

Усі розрахунки проводилися для одиничного агрегату. Прийняли припущення, що енергетичні потоки СЕУ будуть пропорційні потокам енергії одиничного модуля.

Таблиця 1. Характеристики ЕХГ FCM 400

Потужність, Max/Rated, кВт	400 / 366
Ефективність, Max/Rated	55% / 48%
Витрата палива, (Rated), кг/год	20,5
Витрата палива, (XX), кг/год	1.1
Скидна теплота, (R-d), кВт год	340
Температура теплоносія, °C	59
Витрата теплоносія, л/мін	600
Вихідна напруга (DC), В	1450
Струм, (PP/XX), А	412/22

Проведені розрахунки показали, що :

- скидна теплота системи охолодження модуля FCM 400 на всіх режимах експлуатації повністю покриває потреби системи регазифікації в тепловій енергії;
- на робочому режимі потужність каталітичного крекера аміаку сягає 126 кВт (ентальпія крекінгу 46.5 кДж/моль), утилізації теплоти

продуктів крекінгу здатна забезпечити отримання лише 49 кВт, дефіцит потужності сягає 77 кВт;

- використання термоакустичної системи регазифікації може забезпечити отримання додаткової електричної потужності на рівні 35 -45 кВт.

За результатами розрахунків можна бачити, що основним споживачем теплоти системи підготовки палива для PEMFC є процес каталітичного крекінгу аміаку. Відповідно, витрати енергії на реакцію крекінгу є суттєвою складовою теплового балансу СЕУ. Реакція каталітичного крекінгу аміаку потребує створення відповідних умов [7].

В даному випадку передбачається використання технології фірми «Pheousa Green Technologies», яка, завдяки власним новітнім каталізаторам, забезпечує ефективну декомпозицію аміаку при температурі 400 – 450°C. В складі гібридної СЕУ (рис.2) відсутні елементи, здатні продукувати такі обсяги теплових викидів. Отже, постає задача отримання теплоносіїв з потрібними параметрами.

Можливим рішенням може стати використання електричних нагрівачів, які отримують живлення від бортової мережі, але це потребує залучення додаткових PEMFC.

Зрозуміло, що на судні обов'язково будуть встановлені допоміжні ДГ та парогенератор. Потенційно парогенератор здатен продукувати теплоносії в необхідній кількості та потрібних параметрів.

Паливом парогенератору можуть бути як аміак, так і суміш аміаку та водню. Притримуючись принципу реалізації в СЕУ Non-Combustion Technology доцільним рішенням може стати використання пальників, в яких реалізована технологія безполуменевого згоряння аміаку.

Висновки

Зростаюча увага щодо застосування в практиці мореплавства гібридних енергетичних установок є характерною рисою сьогодення. Такі установки дозволяють створювати ефективні та екологічно нейтральні судна. Найбільшій ефективності такі установки можуть досягти в разі використання електрохімічних генераторів в якості головного джерела енергії.

Вдосконалення паливних комірок пов'язано з дослідженнями в області електрохімії, каталітичних систем. Для мореплавства такі СЕУ є принципово новим наукоємним рішенням, яке потребує проведення додаткових досліджень в області суднової енергетики, розробки нових схемних рішень.

Література

[1] Niels de Vries, Safe and effective application of ammonia as a marine fuel. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:be8cbe0a-28ec-4bd9-8ad0-648de04649b8>

[2] Sanchez, A.; Castellano, E.; Martin, M.; Vega, P. Evaluating ammonia as green fuel for power generation: A thermos-chemical perspective. *Appl. Energy*, 2021, 293, 116956.

[3] Engines. / <https://www.wingd.com/en/engines>

[4] Zhang, J., Xie, Z., Zhang, J., Tang, Y., Song, C., Navessin, T., Holdcroft, S. (2006). High temperature PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*, 160(2), 872–891.

[5] Biert, L.; Godjevac, M.; Visser, K.; Aravind, P.V. (2016). A review of fuel cell systems for maritime applications. *Journal of Power Sources*, 327(0), 345–364.

<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.07.007>.

[6] Kim, Kyunghwa, Gilttae Roh, Wook Kim, and Kangwoo Chun. 2020. "A Preliminary Study on an Alternative Ship Propulsion System Fueled by Ammonia: Environmental and Economic Assessments" *Journal of Marine Science and Engineering* 8, no. 3: 183.

<https://doi.org/10.3390/jmse8030183>

[7] Коробко В.В., Московко О.О., Тимошенко Д.О. Числове моделювання суднової термоакустичної системи регазифікації LNG палив. *Наук. вісн. ХДМА*, 2015. № 1. С. 36–42.

[8] Ammonia as a Carbon-Free Energy Carrier: NH₃ Cracking to H₂. Elvira Spatolisano, Laura A. Pellegrini, Alberto R. de Angelis, Simone Cattaneo, and Ernesto Roccaro *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2023, 62 (28).

<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c01419>

[9] TECO Marine Fuel Cell. / <https://teco2030.no/products/fcm400/>

[10] Xing, H., Stuart, C., Spence, S., & Chen, H. (2021). Fuel cell power systems for maritime applications: Progress and perspectives. *Sustainability*, 13(3), 1213. <https://doi:10.3390/su13031213>

Відомості про авторів

Володимир Коробко, д.т.н., доцент, кафедри ЕСЕУ та ТЕ, Національний університет кораблебудування, Миколаїв, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-5761-6824](https://orcid.org/0000-0001-5761-6824).



МОДЕЛЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ РЕСУРСУ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК З ТЕПЛООБМІННИМИ АПАРАТАМИ

Кузнецов В.В. [✉], Шевцов А.П.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

Анотація

Ключові слова: імовірність, безвідмовна робота, трубчаста поверхня, утилізація, регенерація, охолодження.

Представлено підхід до моделювання ресурсу суднових енергетичних установок з теплообмінними апаратами, що мають різні поверхні теплообміну. Він базується на основних засадах теорії ймовірності та системного аналізу при оптимізації характеристик енергетичних установок з урахуванням сукупності параметрів управління і ймовірнісних або невизначених зовнішніх умов.

На основі запропонованого підходу до оцінки ресурсу різних типів трубчастих поверхонь теплообмінних апаратів з урахуванням інтенсифікації процесів і температурного рівня поверхонь за умов однакової ймовірності виходу з ладу елементів та їх теплового навантаження отримано, що при скороченні кількості рядів труб підвищення ресурсу очікується до 2,4 рази.

Вступ

Досконалість роботи суднових енергетичних установок (СЕУ) визначається сукупністю факторів економічної, екологічної ефективності, ресурсу та масогабаритних показників. Істотний вплив на ці показники мають головні та допоміжні елементи енергетичних установок. До допоміжних елементів належать теплообмінні апарати.

Дослідження ресурсних показників енергетичних установок з різними теплообмінними апаратами пов'язана з проблемою визначення оптимальної конструкції за умов багатокритеріальності окремих елементів. Раціональним напрямком оптимізації складних технічних систем є їх математичне моделювання з використанням методів системного аналізу.

Актуальність досліджень

В роботі [1] представлена математична модель енергетичної установки з теплообмінними апаратами. Модель побудовано на об'єктно – орієнтовному принципі і вона складається з процедур, що розраховують процеси перетворення теплоти між основними елементами установки тепловий двигун ↔ системи ↔ теплообмінний апарат. За результатами цих розрахунків визначались показники ефективності, екологічності, масогабаритні та ресурсу окремих елементів та установки у цілому. Основна увага при дослідженні процесів була приділена їх інтенсифікації в

теплообмінних апаратах. Складністю визначення ресурсних показників є їх залежність як від конструктивних факторів, так і від умов експлуатації енергетичних установок. Тому проектне визначення показників ресурсу є актуальною задачею.

Викладення основного матеріалу

У задачах моделювання надійності ресурс СЕУ з теплообмінними апаратами є функцією декількох змінних і результат рішення залежить від властивостей вихідної інформації про установку у вигляді сукупності параметрів управління Y і зовнішніх умов X .

Ці умови можуть бути представлені наступними варіантами: детермінованими (визначеними), ймовірнісними і невизначеними.

У першому випадку функція ресурсу $F(X, Y)$ з критерієм безвідмовної роботи $P(t)$, що прагне максимуму з межею рівною одиниці, може бути записана як функція лише параметра управління Y . Параметр зовнішніх умов X має фіксоване значення і не впливає на результати оптимізації $F(Y) \rightarrow \max$. У детермінованих умовах рішення єдине і може бути представлене як [2]

$$P(t) = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t}$$

де λ_i – інтенсивність відмови i -го елемента при послідовному з’єднанні в системі.

У другому випадку – ймовірнісних умов – параметр X може приймати різні значення X_1, X_2, \dots, X_n з визначеною ймовірністю їх появи – p_1, p_2, \dots, p_n , де $\sum p_j = 1$. При заданих зовнішніх умовах X_i , де $i=1\dots n$, визначення ресурсу можна провести так само, як у випадку детермінованих умов, отримавши відповідно рішення $Y_{\text{опт}}$, для $i=1\dots n$. Для довільного умовно-оптимального рішення $Y_{\text{опт}}$ значення функціоналу цілі $F_i(Y_{\text{опт}}) \rightarrow \max$ буде досягатися з такою же ймовірністю, з якою буде виконана умова X_i . Таким чином, очікуване значення функціоналу цілі визначається формулою математичного очікування

$$M(F_i(Y_{\text{опт}})) = \sum p_j F_{ij}(X_j, Y_{\text{опт}}).$$

Тоді, оптимальне рішення $Y_{\text{опт}}$ відповідає максимальному значенню критерія

$$M(F_i(Y_{\text{опт}})) = \max_{j=1}^n p_j F_{ij}(X_j, Y_{\text{опт}}).$$

Такий критерій ймовірності безвідмовної роботи може виявитися незручним для використання, якщо оптимізація кожного фіксованого значення X_i ускладнена. У разі дискретної зміни керуючого параметра Y доцільно здійснити пряму оптимізацію, аналогічно до описаної вище, з використанням усіх допустимих значень Y . Якщо такими є значення Y_i , де $i=1\dots m$, то оптимальне рішення визначиться формулою

$$M(F_i(Y_{\text{опт}})) = \max_{j=1}^m p_j F_{ij}(X_j, Y_i).$$

Відповідний процес можна організувати у вигляді таблиці обчислення.

Таблиця 1. Обчислення при оптимізації у ймовірнісно-визначених умовах

Y	X_1	...	X_j	...	X_n	$M(F)$
	p_1	...	p_j	...	p_n	
Y_1	F_{11}	...	F_{1j}	...	F_{1n}	$M(F_1)$
Y_2	F_{21}	...	F_{2j}	...	F_{2n}	$M(F_2)$
...
Y_i	F_{i1}	...	F_{ij}	...	F_{in}	$M(F_i)$
...
Y_m	F_{m1}	...	F_{mj}	...	F_{mn}	$M(F_m)$
Критерій оптимальності						$\max M(F)$

В таблиці 1 $X_j, j=1\dots m$, – значення перспективного навантаження СЕУ, p_j – відомі ймовірності, з якими реалізуються ці значення, $Y_i, i=1\dots m$ –

це варіанти рішень по введенню нових теплообмінних апаратів, а F_{ij} – значення критеріїв ймовірності безвідмовної роботи. Оптимальне розв’язання задачі – це вибір такого варіанта введення потужності, якому відповідає максимум очікуваних критеріїв ймовірності безвідмовної роботи що є єдиним.

Але найбільш розповсюдженим у практиці випадком є умови невизначеності. Цей випадок можна зобразити схемою, представленою у таблиці 1 без другої строки і останнього стовпця, що характеризує невідомість ймовірностей настання тих чи інших умов $X_j, j=1\dots m$. Наприклад, вдається дати прогноз діапазону перспективних навантажень СЕУ [X_1, X_2, \dots, X_n], але невідомо, яке значення навантаження з цього діапазону буде реалізовано.

Значення функціоналу цілі F , одержувані для порівняних варіантів (альтернатив) Y за різних зовнішніх умов X , утворюють так звану оптимізаційну матрицю (виділена в таблиці «жирним» шрифтом). Значення функції F можна трактувати як значення ресурсу, яке необхідно максимізувати. Рекомендації чи правила вибору найкращого рішення у такій ситуації даються теорією прийняття рішень за умов невизначеності [3].

Для обґрунтування вибору можливо використання наступних критеріїв: максимінних витрат (критерій Вальда), недостатньої основи (критерій Лапласа), мінімаксного ризику (критерій Севіджа) та виваженої позиції (критерій Гурвіца) [3].

Ймовірність кожного зі станів p_{ij} як перехідна між двома станами на протязі відрізка часу Δt визначається співвідношенням [2, 3]

$$p_{ij} = \lambda_{ij} \Delta t,$$

де λ_{ij} – інтенсивність переходу.

Значення λ_{ij} визначається на невеличкому відрізку часу на основі великої кількості дослідів або спостережень:

$$\lambda_{ij} = \lim_{\Delta t} \frac{p_{ij}}{\Delta t}.$$

При цьому ймовірність того, що за проміжок часу Δt не відбудеться зміни стану, визначається залежністю

$$q_i(\Delta t) = 1 - \Delta t \sum_{i=1}^k \lambda_{ij}(\Delta t),$$

де k – кількість можливих переходів зі стану, що розглядається, до всіх інших.

В якості прикладу використання запропонованого підходу до моделювання ресурсу суднових енергетичних установок з теплообмінними апаратами визначено відносне збільшення ресурсу до першої відмови для суднового утилізаційного котла з різними поверхнями теплообмінних пучків.

Для порівняльної оцінки безвідмовної роботи різних поверхонь використані наступні вихідні данні :

- утилізаційний котел для дизель-генератора танкера дедвейтом біля 45500 т;
- середня інтенсивність відмов змійовика водотрубного котла $\lambda = 0,0002$ [4];
- параметри поверхонь теплообмінних пучків утилізаційних котлів прийняті за результатами [5].

Результати оцінки приведені у таблиці 2.

Таблиця 2. Оцінка безвідмовної роботи різних поверхонь утилізаційного котла

№ п/п	Тип поверхні	Відносна ймовірність безвідмовної роботи
1	Кругла зі спірально-стрічковим оребренням	1,0
2	Кругла зі спірально-стрічковим оребренням з лунковими системами на ребрах	1,4
3	Еліптична гладка	2,1
4	Еліптична гладка з трикутною виїмкою	2,2
5	Еліптична оребрена з лунковими системами на ребрах	2,4

Висновки

На основі запропонованого підходу до оцінки ресурсу різних типів трубчастих поверхонь теплообмінних апаратів з урахуванням інтенсифікації процесів і температурного рівня поверхонь за умов однакової ймовірності виходу з ладу

елементів та їх теплового навантаження отримано, що при скороченні кількості рядів труб підвищення ресурсу очікується до 2,4 рази.

Література

[1] Кузнецов В.В., Шевцов А.П. Математичне моделювання процесів переносу теплоти і маси в суднових енергетичних установках. *Матеріали XIV МНПК «СЕУТТОО»*, м. Херсон, ХДМА, 2023, С.221-224

[2] Надійність електроенергетичних систем / С.В. Казанський, Ю.П. Матеєнко, Б.М.Сердюк. – К.: НТТУ «КПІ», 2011. – 216 с.

[3] Згуровський М.З., Панкратова Н.Д. Системний аналіз. Проблеми. Методологія. Застосування. – Київ: «Наукова думка», 2011. –728 с.

[4] Спіфанов О.А. Конструкції суднових котлів. – Миколаїв: НУК, 2016. – 198 с.

[5] Кузнецов В.В., Шевцов А.П. Ефективність суднових енергетичних установок з теплообмінними апаратами з трубних пучків з лунковими системами. *Авіаційно-Космічна Техніка і Технологія*. 2023, № 4 спецвипуск 2 (190). С.19 -27.

Відомості про авторів

Валерій Кузнецов, к.т.н., доцент каф. ТТ і СПУ НУК, Національний університет кораблебудування, Миколаїв, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-3678-595X](https://orcid.org/0000-0002-3678-595X).



Анатолій Шевцов, д.т.н., професор, професор ННЦМІ МННІ НУК, Національний університет кораблебудування, Миколаїв, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-8692-6458](https://orcid.org/0000-0002-8692-6458).



ПОТЕНЦІАЛ ВИКОРИСТАННЯ МЕТАНОЛУ В ЯКОСТІ ПАЛИВА ДЛЯ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ

Дзигар А.К. ✉

Херсонська державна морська академія, Україна

Анотація

Ключові слова: шкідливі викиди, парникові гази, альтернативне паливо, судновий дизельний двигун, метанол.

Роботу присвячено вивченню можливостей використання метанолу як альтернативного палива для морського транспорту з метою декарбонізації судноплавства. Метанол, який може бути вироблений з різних відновлюваних джерел, включаючи біомасу та вуглекислий газ, розглядається як перспективна альтернатива для зниження викидів вуглекислого газу. Проведено аналіз процесів виробництва метанолу з використанням різних джерел сировини та наведено переваги цього виду палива. Крім того, розглядаються питання зберігання, транспортування та безпечного використання метанолу на морських судах.

Вступ

Зростаючий вплив парникових газів на зміну клімату планети, а також негативні наслідки збільшення використання викопних видів палива потребують негайного скорочення викидів парникових газів. В якості альтернативного палива для суднових дизельних двигунів внутрішнього згоряння судновласники звернули увагу на метанол як паливо з низьким вмістом вуглецю, гнучкістю використання, доступністю на ринку бункерування і рівнем забруднення. Для прикладу, судноплавні компанії, такі як Waterfront Shipping, Stena/Proman, NYK і MOL, побудували серії танкерів для транспортування метанолу, які використовують частину вантажу як паливо для суднових двигунів, існують запити по використанню метанолу в якості палива для суден балкерного флоту. Виробники суднових двигунів інформують про збільшення інтересу до модернізації та переобладнання для використання метанолу для існуючих двигунів.

Актуальність досліджень

Метанол має технічні переваги в порівнянні з іншими видами палива. Інтерес до метанолу для нових суден в тому, що багато спеціалістів вважають, що аміак набагато складніше впроваджувати в якості палива з міркувань безпеки, а до забезпечення допустимих мір безпеки та схвалення нормативних органів ІМО може пройти багато часу. Метанол – це рідке паливо, яке можна зберігати і транспортувати без необхідності охолодження або витримки під тиском, безпечніший у бункеруванні, простіший у використанні та більш доступний, ніж аміак.

Метанол відповідає вимогам ІМО NOx Tier III: випускні гази взагалі не містять сірки, а вуглекислого газу на 15% менше, ніж звичайного мазуту з викопної нафти. Двигун також може працювати на низькосірчистих марках палива RMG, DMA і DMB, перемикаючись на метанол і з нього, при цьому обидві системи повністю ізолювані, з окремими паливними танками і окремими системами бункерування. Це причини попиту та підвищеного інтересу до суден, що працюють на метанолі. Clarksons повідомляє (червень 2023 р.), що в експлуатації є 29 суден, які можуть використовувати метанол, і 128 у замовленні. Побудовані судна будуть в період з 2023 по 2028 рік. У березні 2023 року MAN заявила, що веде переговори щодо замовлення до 120 нових двигунів на метанолі з 80 підписаними контрактами, додавши, що цього року замовлення на двотактні двигуни на метанолі перевищують кількість замовлень на подібні двигуни на СПГ. Більшість замовлень використання метанолу в поєднанні з кількома видами палива. Будуються судна з використанням традиційного палива, але з високим рівнем готовності для можливого переходу на метанолове паливо. Прогнози Clarksons свідчать про значне зростання кількості замовлень, що містять і готові до використання метанолу. І якщо в 2022 році на судна з використанням метанолу припадало 3% портфеля замовлень, то до 2030 року це може бути близько 20%, тобто до 1200 суден.

Викладення основного матеріалу

Метанол – це легкий, леткий, безбарвний і легкозаймистий спирт з формулою CH_3OH . Він виробляється з різноманітної сировини,

включаючи природний газ, біомасу та вуглекислий газ. У двигуні внутрішнього згорання метанол вступає в реакцію з киснем повітря і створює вуглекислий газ і воду, а також теплову енергію. Формула горіння метанолу: $2\text{CH}_3\text{OH} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$

Викиди вуглекислого газу існують, але можна досягти нульових викидів вуглецю протягом життєвого циклу, якщо метанол виробляється з використанням біомаси або водню та вуглекислого газу з відновлюваних джерел. Однак двигуни, що працюють на метанолі, потребують невеликого відсотка щільного палива, що призводить до викидів вуглецю.

Метанол як морське паливо розглядається для декарбонізації судноплавства. Його назва походить від його раннього походження з метану, який є важливою сировиною для сучасного виробництва метанолу на основі викопного палива. Кожна молекула метанолу містить один атом вуглецю та чотири атоми водню, і це найпростіший спирт. Хоча в більшості натеper виробляється паровим риформінгом природного газу, але як найпростіший зі спиртів він може альтернативно виготовлятися з різних видів біомаси чи відходів, або навіть із самої атмосфери, використовуючи потенційно невикопне паливо джерела живлення, що підвищує його екологічність. Біометанол виробляється з лігноцелюлозної сировини (біомаси), такої як відходи сільського господарства та побічні продукти. Біомаса проходить процес газифікації або реформування для отримання синтез-газу, який є сумішшю монооксиду вуглецю та газоподібного водню. Синтез-газ очищають для видалення домішок, а потім піддають синтезу метанолу. Це включає каталітичну реакцію, де чадний газ і газоподібний водень реагують, утворюючи метанол. Е-метанол виробляється з вуглекислого газу (видобувається з навколишнього повітря за допомогою прямого уловлювання повітря (DAC) та е-водню. Газоподібний водень виробляється з використанням відновлюваних джерел енергії для відділення водню від води за допомогою електролізу. Потім вуглекислий газ і газоподібний водень з'єднуються шляхом синтезу метанолу, який є каталітичною реакцією, з утворенням метанолу.

Однією з головних переваг метанолу як виду палива є те, що він має єдину молекулярну структуру, незалежно від шляху виробництва - на відміну від природного газу, дистилляту нафтового походження чи залишкового палива, які є сумішшю різних типів вуглеводнів, тобто суднові двигуни можуть бути калібровані точніше для ефективного спалювання. Метанол не містить сірки, що дозволяє уникнути проблеми використання в зонах контролю викидів (ЕСА). При цьому метанол токсичний, може потрапити в організм при вдиханні, ковтанні, контакті зі

шкірою або очима. Негативні наслідки для здоров'я від забруднення або впливу метанолу не завжди очевидні відразу і можуть бути смертельними. Паливо також бурхливо реагує з сильними окислювачами, підвищуючи ризики пожеж і вибухів у разі витoku, пари метанолу можуть бути важчими за повітря, збираються та залишаються в погано провітрюваних, низинних або обмежених місцях. Метанол має відносно низьку температурою спалаху, 12°C , вимагає додаткової уваги під час зберігання, транспортування та використання і ISO натеper в процесі розробки специфікації метанолу для суднового палива. Як вантаж для транспортування метанол підпадає під дію Додатку II Конвенції MARPOL. Як суднове паливо метанол підпадає під це визначення терміну «мазут», наведеного в правилі 2 Додатку VI до Конвенції MARPOL, а також до вимог положення 18 Додатку VI до Конвенції MARPOL. Оскільки температура спалаху метанолу нижча загальної межі використання 60°C згідно з розділом II-2 Конвенції SOLAS, воно розглядається в рамках подальшого розвитку ІМО. Крім того в контексті метанолу, який використовується як «нафтове паливо», відповідно до правила 1 MARPOL Додаток I, постачальник повинен також надати Паспорт безпеки матеріалу (MSDS) – відповідно до глави VI правила 5-1 SOLAS. Ряд товариств класифікації суден(Регістри) мають власні більш суворіші правила для суден, що працюють на метанолі. Як нестандартне суднове паливо з низькою температурою спалаху портові органи, як правило, мають додаткові спеціальні вимоги, пов'язані з постачанням метанолу як палива для суден. Принципи бункерування однакові в основі - безпечне транспортування, без витoku або іншої небезпеки від постачальника на судно. Оператори бункерних барж та суден знайомі з навантаженням, перевезенням і відвантаженням метанолу з і на нафтопереробні та промислові заводи. Оператори берегових терміналів, суднові екіпажі знайомі і добре навчені завантажувати звичайні мазутні марки палив (DM / RM), але метанол є високотоксичним, легкозаймистим і корозійним, тому потрібні суворі заходи безпеки та відповідні резервуари для зберігання з покриттям.

З метанолом як бункерним продуктом проблема полягає в тому, щоб адаптувати ці існуючі можливості до безпечного бункерування метанолу як палива з низькою температурою спалаху в бункерні танки суден з використанням засобів індивідуального захисту. До них слід віднести, як мінімум: захисний шолом (каска), захист очей (окуляри чи маска), антистатичне захисне взуття, спиргостійкі рукавиці, комбінезон (вогнезахисний з антистатичного матеріалу), іскробезпечний детектор парів метанолу.

Переваги метанолу як суднового палива:

- Викиди оксидів сірки: при спалюванні метанолу не виділяються оксиди сірки та дуже низький рівень твердих частинок.
- Вимоги до зберігання: метанол є рідиною при температурі навколишнього середовища та тиску, тому його не потрібно стискати або зберігати охолодженим.
- Зміщується у воді: метанол добре розчиняється, тому в разі розливу паливо швидко розчиниться в морській воді.
- Щільність енергії метанолу в цілому подібна до аміаку і зберігання економічно доцільним, хоча і не таким, як важкий мазут (HFO).

Технологічна готовність: оскільки метанол є рідиною за температури та тиску навколишнього середовища, то процес подачі його як палива в судові двигуни схожий на звичайні види палива, але з унікальними питаннями безпеки, які слід враховувати. Для того ж двигуну знадобиться приблизно в 2,4 рази більше метанолу, ніж дизельного палива - причина щільність енергії палива. Виробники двигунів на стадії розробки різноманітних варіантів двигунів, включаючи комплекти переобладнання для власників, які розглядають цей шлях до відповідності вимогам ІМО.

Висновки

Використання традиційного суднового палива з низьким вмістом вуглецю, біопалива, на проміжного етапі, метанолу з природним газом, а надалі метанолу як відновлюваного зеленого палива, разом із технологією уловлювання вуглецю, надасть судновласникам можливість зменшити капітальні вклади. Впровадження метанолу як палива з низьким рівнем забруднення та низьким вмістом вуглецю дасть можливість дотриматися мети ІМО щодо скорочення викидів вуглецю до 2030 року і забезпечить шлях до операцій із нейтральним викидом вуглецю.

Література

- [6] <https://www.maersk.com/news/articles/2023/12/07/maersk-to-deploy-first-large-methanol-enabled-vessel-on-asia-europe-trade-lane>
- [7] Lloyd's Register Foundation and Lloyd's Register. Fuel for thought – alternative fuel choices for shipping. <https://www.lr.org/en/knowledge/fuel-for-thought/>
- [8] Wang Q, Zhang H, Huang J and Zhang P (2023) The use of alternative fuels for maritime decarbonization: Special marine environmental risks and solutions from an international law perspective. *Front. Mar. Sci.* 9:1082453. doi: 10.3389/fmars.2022.1082453
- [9] Methanol as fuel heads for the mainstream in shipping. <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Methanol-as-fuel-heads-for-the-mainstream-in-shipping/>
- [10] Lloyd's Register Foundation and Lloyd's Register. Introduction to Methanol Bunkering Technical Reference July 2020. <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/04/Introduction-to-Methanol-Bunkering-Technical-Reference-1.5.pdf>
- [11] Methanol as marine fuel. <https://www.man-es.com/discover/methanol-fueled-ships/>
- [12] The Auramarine Methanol Supply system <https://www.auramarine.com/solutions-for-methanol-operation/>

Відомості про авторів

Анатолій Дзигар, механік I розряду, старший викладач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-5947-6263](https://orcid.org/0000-0001-5947-6263).



РЕЗЕРВИ ПІДВИЩЕННЯ ДОСКОНАЛОСТІ ОРГАНІЗАЦІЇ ТОПКОВОГО ПРОЦЕСУ В СУДНОВИХ КОТЛАХ

Бабій М.В. ✉

Херсонська державна морська академія, Україна

Анотація

Ключові слова: судновий котел, топковий пристрій, енергетична ефективність

Енергетична ефективність суднових котлів значною мірою залежить від якості організації топкового процесу, який забезпечується на сучасних котлах за допомогою агрегованих топкових пристроїв. Недосконалість організації процесу згоряння палива, як правило, веде до зниження ККД котла внаслідок значних втрат тепла та, відповідно, до збільшення витрати палива, а також до шкідливого впливу утворених продуктів, здебільшого, неповного згоряння на навколишнє середовище. Тому вони головним чином визначають економічність котла. Вирішення проблеми зменшення цих втрат за рахунок підвищення ефективності організації топкового процесу є актуальною задачею, яка становить головну мету виконуваної роботи. Її новизну складає обґрунтування резервів підвищення досконалості організації топкового процесу.

Вступ

Підвищення енергетичної ефективності суднових енергетичних установок – одне із головних питань сучасного сьогодення, якому постійно приділяється значна увага. Причинами цього є висока частка споживання нафтового палива транспортним флотом, що становить близько 6 % від загального обсягу нафтового палива [1]. Висока вартість енергоносіїв постійно спонукає до пошуку шляхів його ефективного використання з метою мінімізації втрат тепла та запобігання шкідливого впливу утворених продуктів згоряння на навколишнє середовище. До найбільших споживачів нафтового палива на морському судні разом із двигунами внутрішнього згоряння відносяться також і судові котли [2].

Актуальність досліджень

Енергетична ефективність суднових котлів значною мірою залежить від якості організації топкового процесу, який забезпечується на сучасних котлах за допомогою агрегованих топкових пристроїв (рис. 1). Дані пристрої поєднують у своїй конструкції елементи різних систем судової котельної установки, а саме:

- паливної, що відповідає за підготовку палива та безпосередню подачу його в топку котла;
- системи підведення повітря та відведення димових газів, що забезпечує нагнітання повітря в топку котла;
- системи автоматичного регулювання та сигналізації, яка реалізує як захисні функції щодо

забезпечення безаварійної роботи судового котла, так і функції автоматичного управління та регулювання робочих процесів, що відбуваються під час роботи, як безпосередньо топкового пристрою, так і котла в цілому.

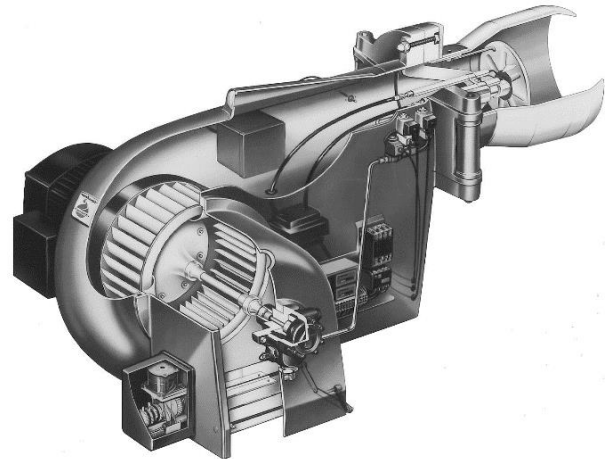


Рисунок 1. Модель агрегованого топкового пристрою «Weishaupt Monarch» [3]

Недосконалість організації процесу згоряння палива, як правило, веде до зниження ККД котла внаслідок значних втрат тепла та, відповідно, до збільшення витрати палива, а також до шкідливого впливу утворених продуктів, здебільшого, неповного згоряння на навколишнє середовище.

Тому вони головним чином визначають економічність котла. Вирішення проблеми зменшення цих втрат за рахунок підвищення

ефективності організації топкового процесу є актуальною задачею, яка становить головну мету виконаної роботи. Її новизну складає обґрунтування резервів підвищення досконалості організації топкового процесу.

Викладення основного матеріалу

До основних факторів, які можуть бути причиною недосконалого процесу горіння або відмов роботи агрегатованого топкового пристрою можна віднести наступні:

1. Незадовільне розпилювання палива;
2. Неполадки в роботі системи автоматичного регулювання та сигналізації (АРС);
3. Незадовільний підвід повітря;
4. Пульсації, шипіння та зриви паливного факелу;
5. Зупинка роботи електродвигуна топкового пристрою;
6. Людський фактор.

Проаналізуємо всі визначені нами фактори, які можуть бути причинами недосконалого процесу горіння або відмов роботи агрегатованого топкового пристрою, виділимо підфактори, що до них відносяться та класифікуємо їх.

1. Причинами незадовільного розпилювання палива можуть бути наступні підфактори:

- 1.1 Низька температура підігрівання палива;
 - 1.2 Низький тиск палива;
 - 1.3 Незадовільна чистота паливних каналів форсунки;
 - 1.4 Зношені розпилювачі форсунки, закоксовані голівки;
 - 1.5 Незадовільне перемішування палива з повітрям;
 - 1.6 Підтікання палива.
2. Серед причин неполадок в роботі системи автоматичного регулювання та сигналізації (АРС) виділимо наступні підфактори:
- 2.1 Несправність блоку управління горінням;
 - 2.2 Забрудненість / вологість електродів запалювання;
 - 2.3 Дефект електродів запалювання;
 - 2.4 Несправність трансформатора запалювання;

2.5 Несправність електромагнітних клапанів;

2.6 Відсутність сигналу від датчика полум'я (фотоелементу) до блоку управління горінням.

3. До фактору незадовільного підводу повітря можна віднести наступні причини (підфактори):

- 3.1 Несправність або зупинка вентиляторного колеса;
- 3.2 Нещільності в повітряних каналах;
- 3.3 Невідповідне положення дифузору та заслінок повітрянапрямних пристроїв;
- 3.4 Низький тиск повітря;
- 3.5 Надмірний тиск повітря

4. Причинами (підфакторами) пульсації, шипіння та зривів паливного факелу можуть бути:

- 4.1 Надмірний вміст води у паливі;
- 4.2 Надмірний вміст механічних домішок у паливі;
- 4.3 Коливання тиску палива;
- 4.4 Забруднена форсунка;
- 4.5 Занадто слабкий сигнал полум'я;
- 4.6 Невідповідна температура палива;
- 4.7 Невідповідна пропорція повітря для спалювання палива.

5. Проблеми із зупинкою роботи електродвигуна топкового пристрою можуть виникнути через:

- 5.1 Відсутність напруги;
- 5.2 Несправність контактора двигуна;
- 5.3 Спрацьовування реле струмового захисту;
- 5.4 Падіння рівня води у котлі.

6. До людського фактору відносимо наступні підфактори:

- 6.1 Низька (недостатня) кваліфікація персоналу;
- 6.2 Недостатність (відсутність) відповідного досвіду щодо виконання даного виду завдань;
- 6.3 Неуважність;
- 6.4 Низька культура організації праці.

Сукупність факторів, що впливають на досконалість організації топкового процесу, може бути представлена у вигляді діаграми Ішікави (рис. 2).

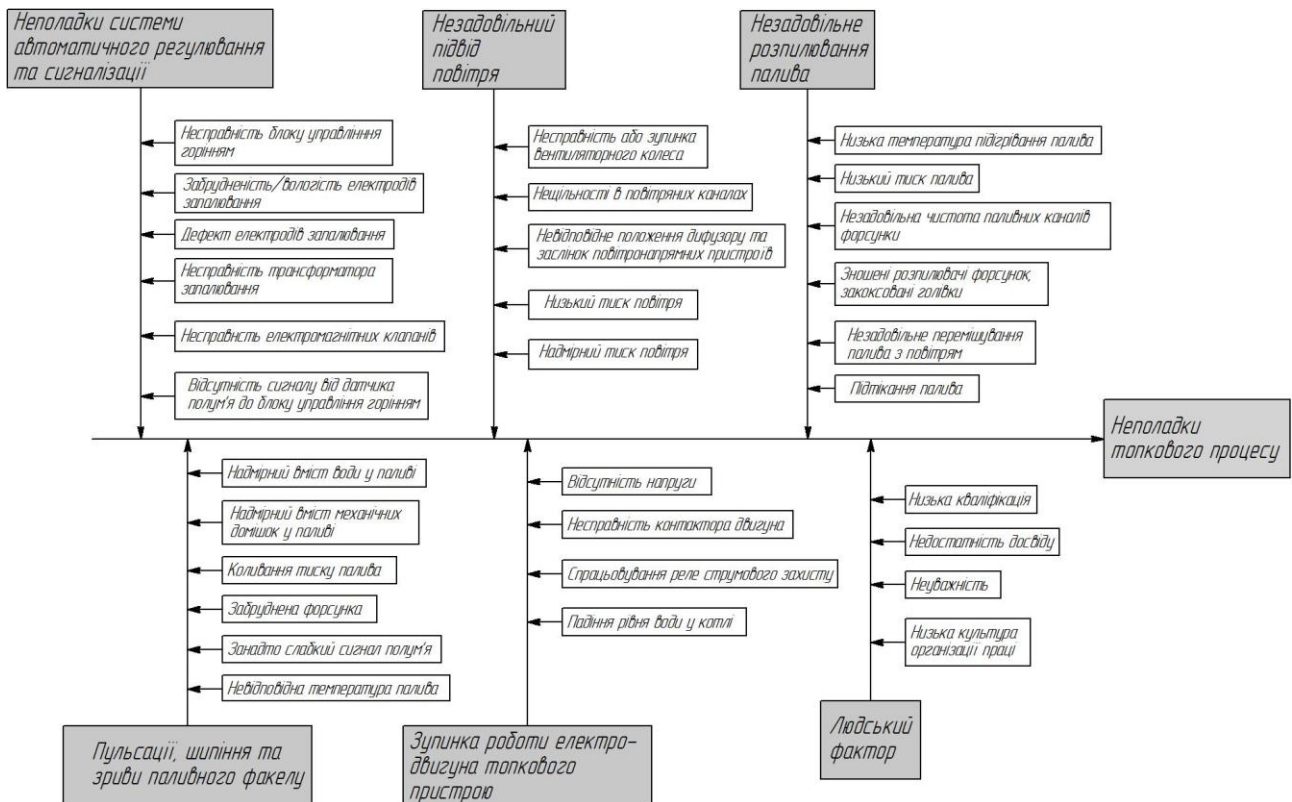


Рисунок 2. Діаграма Ішікави (причин та наслідків) для визначення факторів недосконалості топкового процесу

Для ранжування визначених факторів, що можуть бути причиною недосконалості організації топкового процесу скористаємося методом експертних оцінок по набраній кількості балів, використовуючи інформацію надану фірмою виробником топкових пристроїв «Weishaupt Monarch» [3]. Отримані результати ранжування факторів у відсотках заносимо до табл. 1. у порядку спадання від більш значимого до менш значимого.

Таблиця 1. Фактори відмов топкового пристрою

Код фактору	Фактор	Значимість, %
A	Неполадки системи АРС	31,7
B	Незадовільне розпилювання палива	26,7
C	Пультсації, шипіння та зриви паливного факелу	16,7
D	Незадовільний підвід повітря	11,6
E	Зупинка роботи електродвигуна топкового пристрою	8,3
F	Людський фактор	5,0

За даними табл. 1 будуюмо діаграму Парето (рис. 3), принцип якої полягає в тому, що

аналізуючи фактори, які характеризують причини недосконалості топкового процесу, можна констатувати, що їх мала кількість представляє собою велику значимість, тоді, як велика кількість, яка залишається, має малу значимість [4].

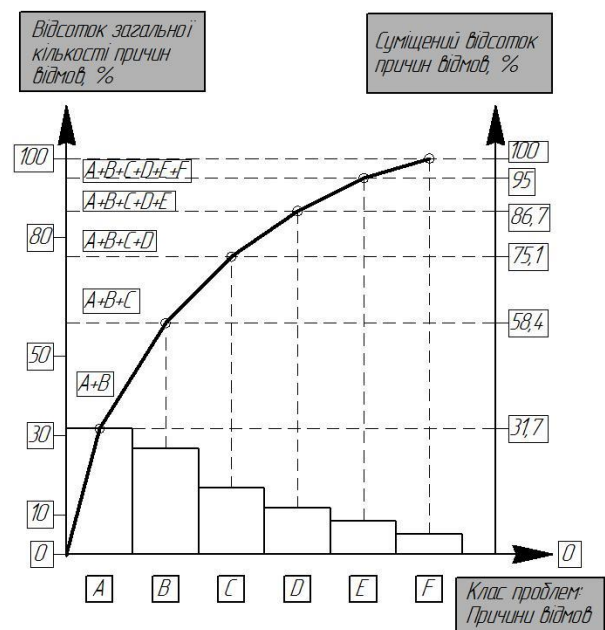


Рисунок 3. Діаграма Парето причин недосконалості топкового процесу

Побудована також кумулятивна ламана лінія, яка показує сумарний внесок декількох факторів недосконалості у загальні причини

недосконалостей (відмов). З рис. 3 видно, що на три перші чинники припадає 75,1% причин недосконалості організації топкового процесу. Ліквідацією цих чинників та їхніх наслідків і необхідно зайнятися у першу чергу.

В рамках розробки плану роботи з усунення негативного впливу зазначених факторів на досконалість організації топкового процесу, слід відзначити, що фірмами-виробниками топкових пристроїв, як правило, надаються рекомендації щодо алгоритму дій при виникненні тієї чи іншої несправності. Але, варто зазначити, що дані рекомендації характерні здебільшого для непланового (вимушеного) технічного обслуговування, що веде до зупинки топкового пристрою та виведення суднового котла із роботи, і як наслідок, до зниження енергетичної ефективності. Регламентоване технічне обслуговування топкового пристрою також не є максимально досконалим та не враховує всіх факторів можливих відмов. Тому, в рамках підвищення досконалості організації топкового процесу на суднових котлах, варто передбачити технічне обслуговування за станом, коли і періодичність, і обсяг робіт по технічному обслуговуванні встановлюються за результатами безперервного контролю та прогнозування технічного стану елементів топкового пристрою, що досягається тільки при використанні автоматизованих систем технічної діагностики. Також, на базі статистичних даних та сучасних інструментів математичного моделювання, слід передбачити розробку математичних моделей планування технічного обслуговування.

Висновки

1. Узагальнено аналіз основних факторів, які можуть бути причиною недосконого процесу горіння або відмов роботи агрегатованого топкового пристрою.

2. Визначено найбільш впливові факторів на досконалість організації топкового процесу, що можуть становити резерви щодо підвищення якості організації топкового процесу.

3. Запропоновано впровадження технічного обслуговування топкового пристрою за станом за результатами безперервного контролю та прогнозування технічного стану його елементів при використанні автоматизованих систем технічної діагностики.

4. На базі статистичних даних та сучасних інструментів математичного моделювання слід передбачити розробку математичних моделей планування технічного обслуговування.

Література

[1] V. Nastasenکو, V. Protsenko, M. Babii. Modern development of ship wind systems within the new rating of Top-7 projects. *Journal of Maritime Research*. Vol XX. No. II (2023) pp 77 – 88. ISSN: 1697-4840, www.jmr.unican.es

[2] Бабій М.В. Суднові котельні установки. Навчальний посібник / М.В. Бабій, В.О. Проценко, В.О. Настасенко. – Херсон : ТОВ "Науковий парк Херсонської державної морської академії "Іновачії морської індустрії", 2021. – 250 с., іл, табл.

[3] Weishaupt monarch burners (режим доступу) <https://www.weishaupt-corp.com/products/burners/weishaupt-wm-series-monarch-burners-55-12-000-kwweishaupt-wm-series-monarch-burners-55-12-000-kw#tab-690-2/>

[4] Мережко Н.В. Управління якістю / Н.В. Мережко, В.В. Осієвська, Н.С. Ясинська. К.: КНТЕУ, 2010. – 216 с.

Відомості про авторів

Михайло Бабій, к.т.н., доцент, доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-0560-2081](https://orcid.org/0000-0002-0560-2081).



УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНОГО ЦИКЛУ ПРОСТИХ ВІДКРИТИХ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК

Слинько О.Г.¹, Бойчук А.С.¹, Козловський С.В.^{1✉}, Лавренченко Г.К.²

¹ Одеський національний морський університет, Україна

² ТОВ «Інститут низькотемпературних енерготехнологій», Україна

Анотація

Ключові слова: газотурбінна установка; удосконалення термодинамічних процесів; ізобарний і ізохорний процеси підведення теплоти; тепловикористовуюча комбінована енергоохолодильна установка.

Газотурбінні установки мають суттєві переваги в порівнянні з паротурбінними установками і ДВЗ. У базовому способі здійснення термодинамічного циклу простих відкритих ГТУ свіже повітря всмоктується компресором при температурі оточуючого середовища, а гази розширюються в турбіні до атмосферного тиску. Це обумовлює порівнянність питомих робіт компресора і турбіни, що є недоліком. Для його зменшення в базовому циклі ГТУ підвищують температуру газів, що надходять на лопатки турбіни, обумовлюючи низку нових недоліків модифікованих у такий спосіб ГТУ: збільшується витрата палива, ускладнюється конструкція турбіни, зменшується моторесурс, тощо.

Пропонується удосконалити термодинамічний цикл простих відкритих ГТУ двома способами, в яких свіже повітря всмоктується при температурі оточуючого середовища. В цих удосконаленнях пропонується всмоктуємо компресором повітря регенеративно охолоджувати, теплоту підводити ізобарно (спосіб 1) або ізохорно (спосіб 2) і гази розширювати в турбіні до тиску нижче атмосферного.

При великих масштабах використання та потужностях сучасних ГТУ відкритого типу впровадження пропонуємих вдосконалень дозволить заощаджувати паливо при експлуатації та збільшити моторесурс турбін.

Вступ

Газотурбінні установки мають суттєві переваги над двигунами внутрішнього згорання і паротурбінними установками, а це, конструктивна простота, менші відносні масогабаритні показники, менші експлуатаційні витрати, мобільність при пуску/зупинці, тощо. Класичний термодинамічний цикл простих відкритих ГТУ має декілька недоліків, це – порівнянність питомих робіт компресора і турбіни. Для підвищення питомої роботи турбіни підвищують температуру газів, що подаються на її лопатки турбіни, а це, в свою чергу, обумовлює ряд недоліків: ускладнює устрій турбіни, зменшує моторесурс, ускладнює експлуатацію ГТУ, тощо. Крім того, головним недоліком термодинамічного циклу сучасних ГТУ, як і усіх перетворювачів теплоти в роботу, крім карбюраторних ДВЗ, є використання ізобарного процесу підведення теплоти в циклі. Ізохорний процес підведення теплоти має термодинамічну перевагу над ізобарним: вся підводима в ізохорному процесі теплота йде на підвищення

внутрішньої енергії робочого тіла, а це головний показник його робоздатності. Крім того, при ізохорному процесі при підведенні теплоти із одного і того ж стану до однакової температури потрібно менше теплоти, ніж при ізобарному. До того ж, при ізохорному процесі підведення теплоти має місце менше зростання ентропії, а це головний показник оборотності будь-якого термодинамічного процесу, в тому числі і процесу підведення теплоти. Проте, головні процеси термодинамічного циклу ГТУ здійснюються в окремих складових елементах, що сприяє багатосторонньому його удосконаленню. В роботі розглядається два удосконалення базового термодинамічного циклу простих відкритих ГТУ. Це, по-перше, цикл з попереднім регенеративним охолодженням всмоктуемого компресором свіжого повітря, з ізобарним процесом підведення теплоти та з розширенням газів до тиску нижче атмосферного, по-друге, цикл з попереднім регенеративним охолодженням повітря з ізохорним процесом підведення теплоти та з розширенням газів в турбіні до тиску нижче атмосферного.

Розраховані показники ефективності удосконалених циклів порівнюються як з показниками базового циклу, так і між власними показниками.

Актуальність досліджень

Газотурбінні установки – перспективний тип енергетичних установок. Вони поєднують переваги паротурбінних установок (безперервність здійснення робочого процесу перетворення теплової енергії в механічну, і велику годинникову витрату робочого тіла – потужність). Крім того, вони позбавлені недоліків двигунів внутрішнього згоряння (відсутності кривошипно-шатунного механізму) та ПТУ (відсутності масивного парового котла з великою втратою теплоти згоряння палива). Проте, головним недоліком ГТУ є порівнянність питомих робіт компресора і турбіни. Для зменшення цього недоліку необхідно значно підвищувати температуру газів перед турбіною, але це значно ускладнює її конструкцію, підвищує її вартість і зменшує моторесурс. Це можна подолати удосконаливши термодинамічний цикл ГТУ шляхом попереднього охолодження повітря, яке всмоктується і стискується

компресором та з розширенням газів в турбіні до тиску нижче атмосферного.

Викладення основного матеріалу

Графічне порівняння досліджуваних термодинамічних циклів

На рис. 1 і 2 зіставляються цикли в p, v і T, s координатах: базовий термодинамічний цикл простої відкритої ГТУ, в якому стиснення свіжого повітря починається із стану зовнішнього середовища, гази нагріваються до температури жароміцності лопаток турбіни і розширюються до атмосферного тиску (1-2-3-4-1) і модифіковані термодинамічні цикли. Це, по-перше, цикл 1-5-6-7-8-а-9-5-1 – з попереднім регенеративним охолодженням свіжого повітря до температури нижче оточуючого середовища, з ізобарним процесом підведення теплоти до значно меншої температури, чим в базовому циклі, і розширенням газів до тиску нижче атмосферного; по-друге, цикл 1-5-6'-7-8-а-9-5-1 з попереднім охолодженням свіжого повітря з ізохорним процесом підведенням теплоти (6'-7) і з розширенням газів до тиску нижче атмосферного.

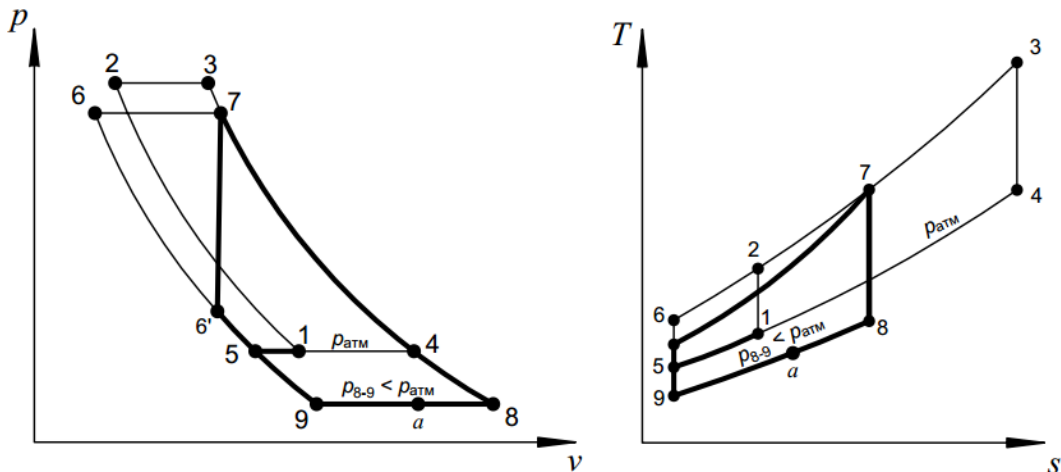


Рисунок 1. Сумісне зображення термодинамічних циклів базової і модифікованих ГТУ

Із візуального аналізу графічних зображень порівнюємих циклів видно, що найменше теплоти підводиться в циклі з ізохорним процесом підведення теплоти (процес 6'-7, рис. 1б), а відводиться в цьому циклі стільки ж як і у модифікованому циклі з ізобарним процесом підведення теплоти (процес 8-9). Найбільше теплоти підводиться в базовому найсучаснішому циклі ГТУ (процес 2-3 рис. 1б). В цьому ж циклі найбільше теплоти відводиться в оточуюче середовище (процес 4-1). Тобто сучасні турбіни, що працюють за термодинамічним циклом з ізобарним процесом підведенням теплоти, значно більше забруднюють тепловою оточуюче середовище.

Із p, v – діаграми видно, що питомі роботи турбін в обох модифікованих циклів однакові, а

питома робота компресора в циклі з ізохорним процесом підведенням теплоти (процес 5-6' рис. 1а) значно менша відповідної роботи в циклі з ізобарним підведенням теплоти (процес 5-6, рис. 1а).

ГТУ з ізохорним процесом підведення теплоти

На рис. 2 зображено принципову схему удосконаленої ГТУ, в якій реалізується термодинамічний цикл з ізохорним процесом підведення теплоти, що здійснюється в наступний спосіб.

Свіже повітря перед усмоктуванням та стисненням компресором I (рис. 2), охолоджується відпрацювавшими газами турбіни до температури нижче температури навколишнього середовища (процес 1-5, рис. 1). Відповідне попереднє

оохолодження відпрацьованих газів турбіни, здійснюється послідовно в парогенераторі утилізаційної тепловикористовуючої комбінованої енергохолодильної установки **VI** (УТВКЕХУ) [1] (процес **8-а**, рис. 1а і 1б). Подальше доохолодження цих газів (процес **а-9**), здійснюється холодоносієм холодильної установки цієї ж

установки до такої температури, щоб будучи ізоентропно стиснутими до атмосферного тиску, гази були б дієздатними для охолодження свіжого повітря. Отже, охолоджені і стиснуті вакуумним насосом відпрацьовані гази турбіни охолоджують свіже повітря, всмоктуєме компресором **I** ГТУ.

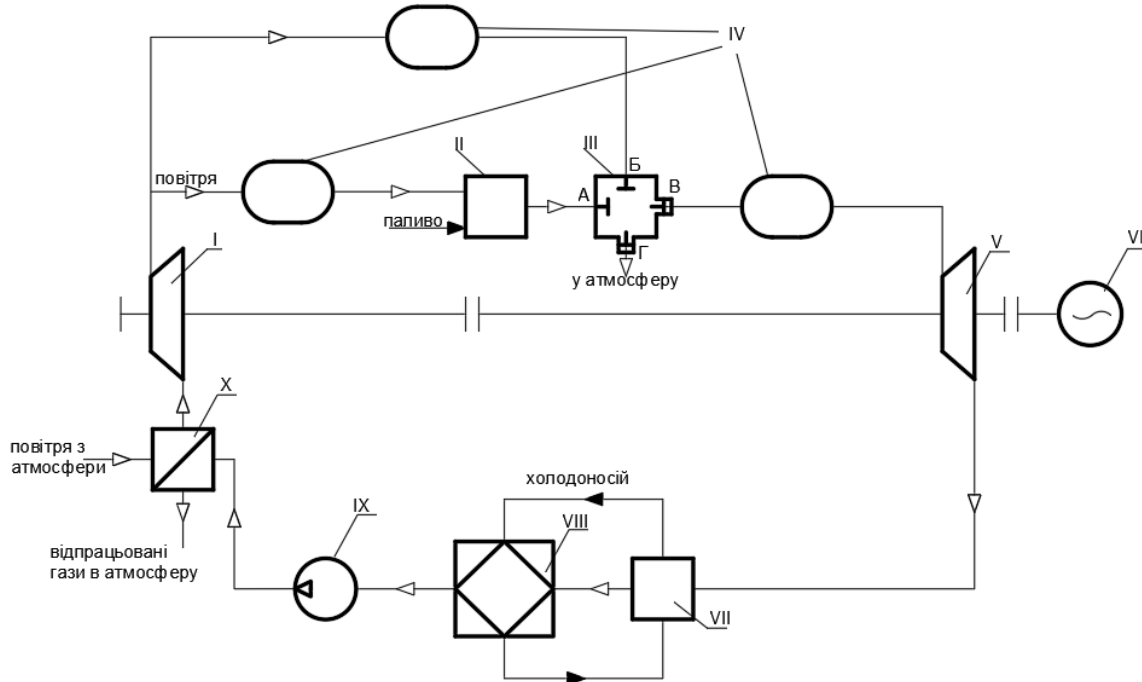


Рисунок 2. Принципова схема ГТУ з ізохорним процесом підведення теплоти: *I* – компресор; *II* – карбюратор; *III* – камера згоряння; *IV* – ресивер; *V* – газова турбіна; *VI* – стартер/обратимий електродвигун; *VII* УКЕХУ; *VIII* – ресивер-охолоджувач відпрацьованих газів турбіни; *IX* – вакуумний насос; *X* – регенеративний теплообмінник охолодження всмоктуємого компресором повітря

Питома робота компресора модифікованої ГТУ з ізобарним процесом підведення теплоти менше, ніж у базового циклу ГТУ, що витікає із порівняння процесів 1-2 і 5-6. Питома робота компресора модифікованої ГТУ з ізохорним процесом підведення теплоти (процес 5-6') значно менше роботи компресора в базовому і в модифікованому циклі з ізобарним підведенням теплоти.

Тому охоложене свіже повітря в циклі з ізохорним підведенням теплоти стискається ізоентропно (процес 5-6') компресором **I**, до значно меншого тиску (точка 6'), ніж в базовому і в модифікованому циклі з ізобарним підведенням теплоти. Стиснення повітря здійснюється тільки до густини газів, що надходять на лопатки турбіни (точка 7, рис. 1). Повітря накопичується в ресивері **IV**, звідки разом з паливом подається в карбюратор **II**, (рис. 2) де утворюється паливно-повітряна суміш, яка через клапан **A** подається в камеру згоряння **III**, де згорає при сталому об'ємі (при закритих клапанах **A**, **B**, **B** і **Г**). При відкритті клапану **B** гази надходять в ресивер **IV**, а звідти на лопатки газової турбіни **V**, де ізоентропно розширюються до тиску нижче

атмосферного (процес 7-8, рис. 1), який утворюється і підтримується у ресивері-охолоджувачі **VIII** вакуумним насосом **IX**. Після зниження тиску газів в ресивері до заданого значення, клапан **B** закривається і відкриваються клапани **B** і **Г** для продувки камери згоряння свіжим повітрям. Для запобігання пульсації тиску газів, які подаються на лопатки турбіни, установка обладнується декількома газоутворюючими комплектами.

Гази, що розширились в турбіні до тиску нижче атмосферного, спочатку охолоджуються в генераторі пари УТВКЕХУ **VI** (процес 8-а, рис. 1), а потім доохолоджуються в ресивері-охолоджувачі **VIII** (рис. 2) до стану точки 9 (процес а-9, рис. 1). Температура газів в стані точки 9 приймається такою, щоб після їх ізоентропного стиснення (процес 9-5, рис. 1), вони були б дієздатними для охолодження свіжого повітря, яке всмоктується компресором.

Дослідження дієздатності та ефективності пропонуваного циклу

Для ілюстрації дієздатності і ефективності пропонуваного вдосконалення термодинамічного

циклу відкритих ГТУ виконані відповідні теплові розрахунки при прийнятих значеннях температури газів перед турбіною t_7 . Ця температура обмежується жароміцністю використовуваного матеріалу лопаток турбіни. Задаємось ступенем підвищення тиску β , звичайно прийнятого для забезпечення прийняттого співвідношення між потужностями компресора й турбіни. При одноступеневому стисненні повітря він не перевищує 8. Тому в розрахунках модифікованих циклів прийняті значення $t_7 = 850 \text{ }^\circ\text{C}$ і $\beta = 7$.

Розрахунки виконані, як для базового циклу **1-2-3-4-1** (умовно для термодинамічного циклу ГТУ сучасних потужних бойових машин) – без попереднього охолодження свіжого повітря і при температурі газів, подаваних на лопатки турбіни $t_3 = 1195 \text{ }^\circ\text{C}$ та з розширенням газів у турбіні до атмосферного тиску, так і для пропонуємих його модифікацій.

Прийняті параметри повітря навколишнього середовища: тиск $p_1 = 0,101325 \text{ МПа}$ і температура $t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Розрахунок термодинамічних властивостей газів в характерних точках порівнюваних термодинамічних циклів

Використовуючи програму REFPROP [2] визначено термодинамічні властивості газів (повітря) в характерних точках базового циклу сучасних потужних бойових машин і його модифікацій з ізобарним та ізохорним процесами підведення теплоти, з попереднім регенеративним охолодженням свіжого повітря до температури нижче оточуючого середовища і з розширенням газів в турбіні до тиску нижче атмосферного [3-5]. Визначені термодинамічні властивості газів наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Термодинамічні властивості газів (повітря) в характерних точках базового і модифікованих термодинамічних циклів ГТУ

точки	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$p, \text{ бар}$	$v, \text{ м}^3/\text{кг}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$s, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
Базовий цикл					
1	30	1,01325	0,8588	429,57	3,8981
2	252,61	7,093	0,2134	655,91	3,8981
3	1195	7,093	0,5944	1722,2	5,0455
4	635,02	1,01325	2,5743	1068,8	5,0455
Модифікований цикл з ізобарним процесом підведення теплоти					
5	0	1,01325	0,7735	399,38	3,7933
6	201,89	7,093	0,1922	603,51	3,7933
7	850	7,093	$\rho=2,1949$ $v=0,4556$	$h=1315,1$ $u=991,97$	4,7295
8	161	0,2	6,2454	563,05	4,7295
9	-101,55	0,2	2,4615	297,68	3,7933
Модифікований цикл з ізобарним процесом підведення теплоти					
5	0	1,01325	0,7735	399,38	3,7933
6'	64,55	2,1280	$\rho=2,1949$ $v=0,4556$	$h=464,19$ $u=367,24$	3,7933
7	850	7,093	$\rho=2,1949$ $v=0,4556$	$h=1315,1$ $u=991,97$	4,7295
8	67,08	0,2	6,2454	467,07	4,7295
9	-101,55	0,2	2,4615	297,68	3,7933

Використовуючи табличні дані, визначаємо енергетичні характеристики базового термодинамічного циклу:

– питому роботу турбіни I_T

$$I_T = h_3 - h_4 = 1722,2 - 1068,8 = 653,4 \text{ кДж/кг}$$

– питому роботу компресора I_K

$$I_K = h_2 - h_1 = 655,91 - 429,57 = 226,34 \text{ кДж/кг}$$

– питому роботу ГТУ

$$I_{ГТУ} = I_T - I_K = 653,4 - 226,34 = 427,06 \text{ кДж/кг}$$

– питому теплоту, що підводиться в циклі

$$q_1 = h_3 - h_2 = 1722,2 - 655,91 = 1066,29 \text{ кДж/кг}$$

– питому теплоту, що відводиться в циклі

$$q_2 = h_4 - h_1 = 1068,8 - 429,57 = 639,23 \text{ кДж/кг}$$

– термічний коефіцієнт корисної дії

$$\eta_t^{\text{бн}} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{639,23}{1066,29} = 0,4005$$

– теоретична витрата палива на 1 кВт г роботи

$$b_t^{\text{бн}} = \frac{3600}{\eta_t^{\text{бн}} \cdot Q_B^P} = \frac{3600}{0,4005 \cdot 45 \cdot 10^3} = 0,1998 \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{г}}$$

Тепер визначаємо енергетичні характеристики модифікованого термодинамічного циклу ГТУ з ізобарним процесом підведення теплоти:

– питому роботу турбіни

$$I_T = h_7 - h_8 = 1315,1 - 563,05 = 752,05 \text{ кДж / кг}$$

– суму питомих робіт компресора і вакуумного насосу

$$I_{K+BH} = I_K + I_{BH} = (h_6 - h_5) + (h_5 - h_9) = (603,51 - 399,38) + (399,38 - 297,68) = 305,83 \text{ кДж / кг}$$

– питому роботу ГТУ

$$I_{ГТУ} = I_T - I_{K+BH} = 752,05 - 305,83 = 446,22 \text{ кДж / кг}$$

– питому теплоту, що підводиться в циклі

$$q_1 = h_7 - h_6 = 1315,1 - 563,05 = 752,05 \text{ кДж / кг}$$

– питому теплоту, що відводиться в циклі

$$q_2 = h_8 - h_9 = 563,05 - 297,68 = 265,82 \text{ кДж / кг}$$

– термічний коефіцієнт корисної дії

$$\eta_t^{\text{мн}} = \frac{I_{ГТУ}}{q_1} = \frac{446,22}{752,05} = 0,5933$$

– теоретична витрата палива на 1 кВт г роботи модифікованої установки

$$b_t^{\text{мн}} = \frac{3600}{\eta_t^{\text{мн}} \cdot Q_B^P} = \frac{3600}{0,5933 \cdot 45 \cdot 10^3} = 0,1348 \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{г}}$$

Наприкінці, використовуючи дані табл. 1, розраховуємо енергетичні характеристики пропонуємого модифікованого циклу з ізохорним процесом підведення теплоти:

– питому роботу турбіни

$$I_T = h_7 - h_8 = 1315,1 - 563,05 = 752,05 \text{ кДж / кг}$$

– суму питомих робіт компресора і вакуумного насосу

$$I_{K+BH} = I_K + I_{BH} = (h_6 - h_5) + (h_5 - h_9) = (464,19 - 399,38) + (399,38 - 297,68) = 166,51 \text{ кДж / кг}$$

– питому роботу ГТУ

$$I_{ГТУ} = I_T - I_{K+BH} = 752,05 - 166,51 = 585,54 \text{ кДж / кг}$$

– питому теплоту, що підводиться в циклі

$$q_1 = u_7 - u_6 = 991,97 - 367,24 = 624,73 \text{ кДж / кг}$$

– питому теплоту, що відводиться в циклі

$$q_2 = h_8 - h_9 = 563,05 - 297,68 = 265,82 \text{ кДж / кг}$$

– термічний коефіцієнт корисної дії

$$\eta_t^{\text{мн}} = \frac{I_{ГТУ}}{q_1} = \frac{585,54}{624,74} = 0,6881$$

– теоретична витрата палива на 1 кВт г роботи в модифікованої установці

$$b_t^{\text{мн}} = \frac{3600}{\eta_t^{\text{мн}} \cdot Q_B^P} = \frac{3600}{0,6881 \cdot 45 \cdot 10^3} = 0,1163 \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{г}}$$

Для можливості аналізу важливих показників ефективності термодинамічних циклів базової і модифікованих ГТУ записуємо їх у зрівняльну табл. 2.

Таблиця 2. Співставлення важливих показників ефективності сучасного базового термодинамічного циклу ГТУ великої потужності і його модифікацій

№ п/п	Показники ефективності	Термодинамічний цикл		
		Базовий	з ізобарним процесом підведення теплоти	з ізохорним процесом підведення теплоти
1	Питома робота турбіни, кДж/кг	653,40	752,05	
2	Питома робота компресора, кДж/кг	226,34	305,83	166,51

3	Питома робота ГТУ, кДж/кг	427,06	446,22	585,54
4	Температура газів, що подаються на лопатки турбіни, °С	1195	850	
5	Питома теплота, що підводиться в циклі, кДж/кг	1066,20	711,59	624,73
6	Питома теплота, що відводиться в циклі, кДж/кг	639,23	265,82	
7	Термодинамічний ККД	0,4005	0,5933	0,6881
8	Теоретична витрата палива на 1 кВт·г роботи, b_t кг/(кВт·г)	0,1998	0,1348	0,1163
9	Відносне зменшення теплоти, що підводиться в циклі, %	–	33,3	41,4
10	Відносне зменшення теплоти, що відводиться в циклі, %	–	58,4	
11	Відносне підвищення питомої роботи ГТУ, %	–	15,1	
12	Відносне підвищення теоретичного ККД, %	–	48,1	71,8
13	Відносне зменшення питомої витрати палива, b_t , %	–	32,5	58,2

Аналіз розрахункових даних

Аналізуючи наведені в таблиці енергетичні характеристики порівнюємих циклів, можна однозначно стверджувати, що пропонуємі модифікації ГТУ мають багато енергетичних та експлуатаційних переваг над базовою.

Так, при меншій витраті питомої теплоти, що підводяться в модифікованих циклах (на 33 і 42%, в ізобарному/ізохорному процесах, відповідно), отримуєма питома робота ГТУ збільшується на 15% в порівнянні з базовою. Термічний ККД збільшується на 48 і 72%, а питома витрата палива на виконання 1 кВт·г роботи зменшуються на 33 та 58% в ізобарному/ізохорному процесах, відповідно.

З експлуатаційної точки зору в модифікованих установках значно зменшується температура газів, що надходять на лопатки турбіни (з 1195 до 850 °С), що суттєво спрощує конструкцію турбіни та підвищує її моторесурс. Проте, в модифікованих установках з'являються додаткові пристрої: це утилізаційна тепловикористовуюча комбінована енергоохолодильна установка, вакуумний насос і два теплообмінні апарати. Хоча, це разові витрати, а паливо витрачається кожного разу при використанні установки, а установка без палива – металевий брухт.

Висновки

Модифікувавши термодинамічний цикл простої відкритої ГТУ шляхом попереднього охолодження повітря, всмоктуємого і стискуємого компресором, можна суттєво підвищити її ефективність і потужність. Крім того, таким способом можна не тільки збільшувати питому потужність установки, але й зменшувати температуру газів,

що надходять на лопатки турбіни, тобто зменшувати теплову напруженість турбіни.

Ефективність цього удосконалення настільки вражаюча, що деякі конструктивні ускладнення модифікованих таким способом установок не повинні викликати сумніву в доцільність їх впровадження в практику. Особливо це актуально для головних енергосилових установок танків, кораблів, газоперекачувальних станцій, пікових ТЕЦ, тощо. Крім того, слід враховувати мобільність ГТУ при пуску/зупинці, що важливо для вказаних виробів, а керуваність тепловою напруженістю газової турбіни, сприяє підвищенню її моторесурсу. Усе це в сукупності сприяє швидкій окупності витрат, пов'язаних з виробництвом таких більш конструктивно складних виробів.

Література

- [1]/ Лавренченко Г.К., Слинько О.Г., Галкін В.М., Козловський С.В., Бойчук А.С. (2022). Утилізаційна комбінована енергоохолодильна установка з повним регенеративним теплообміном. *Refrigeration Engineering and Technology*, 58(1), 50–61. <https://doi.org/10.15673/ret.v58i1.2315>
- [2]. Lemmon E.W., Huber M.L., McLinden M.O. NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties — REFPROP, Version 8.0. – Gaithersburg, 2007. 51 p.
- [3]. Лавренченко Г.К., Слинько О.Г., Галкін В.М., Козловський С.В., Бойчук А.С. (2022). Гідродинамічний метод перетворення рідини в перегріту пару. *Refrigeration Engineering and Technology*, 58(2), 92–97. <https://doi.org/10.15673/ret.v58i2.2381>

[4]. Georg K. Lavrenchenko, Alexey G. Slinko, Artem S. Boychuk, Vitalii M. Halkin, Serhii V. Kozlovskiy (2023). Conversion of liquid to steam. how and why? *Journal of Chemistry and Technologies*, 31(3), 678–684.

<https://doi.org/10.15421/jchemtech.v31i3.285771>

[5]. Вассерман О.А., Слинько О.Г., Шутенко М.А. Інноваційні цикли енергетичних установок. Одеса: видав-тво «Фенікс», 2020. 182 с.

Відомості про авторів

Олексій Слинько, к.т.н., професор ОНМУ, професор кафедри СЕУ та ТЕ ОНМУ, Одеса, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-5310-4335](https://orcid.org/0000-0002-5310-4335).



Артем Бойчук, к.т.н., доцент кафедри СЕУ та ТЕ ОНМУ, Одеса, Україна, [ORCID ID: 0000-0003-2783-7129](https://orcid.org/0000-0003-2783-7129).



Сергій Козловський, к.т.н., доцент кафедри СЕУ та ТЕ ОНМУ, Одеса, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-3176-835X](https://orcid.org/0000-0002-3176-835X).



Георгій Лавренченко, д.т.н., професор, Президент східноєвропейської асоціації виробництва технічних газів, «Інститут низькотемпературних енерготехнологій», Одеса, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-8239-7587](https://orcid.org/0000-0002-8239-7587).



ЕФЕКТИВНІСТЬ СПОСОБІВ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ТА ПРИ СТИСКАННІ В ОСЬОВОМУ КОМПРЕСОРІ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

Бєков Б.А., Кузнецова С.А., Шевцов А.П. 

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

Анотація

Ключові слова: випарювання, рідина, об'єм, поверхня, порізність, ступень, холодильна машина.

Представлено результати порівняння контактних і рекуперативних способів охолодження повітря на витрати механічної роботи при стисканні повітря в осьових компресорах. Визначено впливи на енергетичну і екологічну ефективності суднових енергетичних установок з газотурбінними двигунами випарного охолодження на вході в компресор та при поступеному стисканні в його проточній частині. Співставлення результатів охолодження контактних способів між собою і з аналогічними показниками рекуперативних способів при використанні холодильних машин дозволило обґрунтувати рекомендації щодо рівня інтенсифікації на порізних поверхнях лопаток направляючих апаратів компресорів за рахунок випарювання води. Зроблені оцінки зниження питомої витрати палива і викидів з відпрацьованими газами різного вологовмісту.

Вступ

Підвищення енергетичної і екологічної ефективності суднових енергетичних установок з газотурбінними двигунами досягається шляхом зменшення роботи при стисканні повітря в компресорах. Дієвими способами зменшення цієї роботи є охолодження повітря на вході компресора і в процесі стискання. Впровадження охолодження повітря при стисканні можливо як проміжне між компресорами низького і високого тиску, а також як поступеневе в проточних частинах компресорів. Останній спосіб, з урахуванням наявних складнощів, в більший мірі дозволяє наблизитись до ізотермічного стиснення і отримати більш раціональні характеристики енергетичної установки.

Актуальність досліджень

На даний час мається значна кількість робіт за напрямком підвищення ефективності суднових і стаціонарних газотурбінних установок за рахунок зменшення роботи при стисканні повітря в компресорах [1, 2, 3, 4, 5] в умовах підвищеної температури оточуючого середовища.

В разі ненасиченого вологою повітря, за результатами робіт [1] обґрунтовано, що при використанні комплексних повітряочисних пристроїв з елементами охолодження і підігріву можливо забезпечити підвищення ККД і ресурсу роботи

газотурбінних установок за рахунок випарного охолодження на рівні 18...6 градусів.

В умовах значного насичення оточуючого повітря випарне охолодження є неефективним і використовуються різні схемні рішення з використання холодильних машин.

Використання способів охолодження між компресорами характеризується обмеженим впровадження в установках складного термодинамічного циклу.

Доцільність використання ізотермічних способів стискання повітря в компресорах різних енергетичних установок обґрунтована теоретично, але практичне впровадження цього напряму потребує додаткових наукових результатів, що пов'язані з визначенням показників і закономірностей процесів стиснення повітря в умовах інтенсивного тепломасопереносу з фазовими переходами в двофазових потоках та механіки обтікання решіток профілів направляючих і робочих лопаток. Тому дослідження в цьому напрямі є актуальними і мають перспективи практичного впровадження.

Викладення основного матеріалу

Результати аналізу результатів дослідження отриманих на сьогоднішній час дозволяють сформулювати наступні ознаки дослідження.

Мета – знизити витрати механічної енергії приводу компресора за рахунок раціонального процесу стискання повітря в осьовому компресорі способом його ступеневого контактного охолодження.

Об'єкт дослідження – процеси стискання в осьовому компресорі при контактному охолодженні на поверхнях його елементів направляючих апаратів ступенів та їх вплив на витрати механічної енергії приводу.

Предмет дослідження – параметри, характеристики і закономірності процесів стискання в осьовому компресорі при різних варіантах сполучення температури і вологовмісту повітря.

Метод дослідження – математичне моделювання термодинамічних, газодинамічних і тепломасообмінних процесів двофазних потоків з фазовими переходами.

Завдання дослідження:

- визначити залежності витрати механічної енергії приводу компресора від зміни температури і вологовмісту повітря;
- визначити умови забезпечення температури і вологовмісту повітря при контактному охолодженні на поверхнях елементів направляючих апаратів ступенів осьового компресора
- оцінити підвищення енергетичної і екологічної ефективності газотурбінних установок за

рахунок зниження витрати механічної енергії приводу компресора від зміни температури і вологовмісту повітря

- оцінити можливості багаторазового циклічного використання води для процесів контактного охолодження повітря, що стискається.

Вплив витрати механічної енергії приводу компресора на температуру відпрацьованих газів T_4 , питому потужність N_e і питому витрату палива C_{N_e} газотурбінної установки простого циклу від зміни температури навколишнього повітря і температури газу перед турбіною T_3 наведено на рисунку 1. З підвищення температури на вході компресора робота стискання повітря збільшується, а техніко-економічні показники газотурбінної установки простого циклу погіршуються. Для поліпшення цих показників доцільно використовувати, в разі низької відносної вологості повітря, що нижче 70%, випарне охолодження. В разі високих значень відносної вологості рекомендують використовувати холодильні машини. Результати використання однієї та двох холодильних машин для охолодження повітря перед компресором низького тиску наведено на рисунках 2 і 3. Незначний рівень отриманих результатів пояснюється значним аеродинамічним опором холодильного устаткування та вологовмістом перед компресором газотурбінної установки простого циклу (рисунок 4).

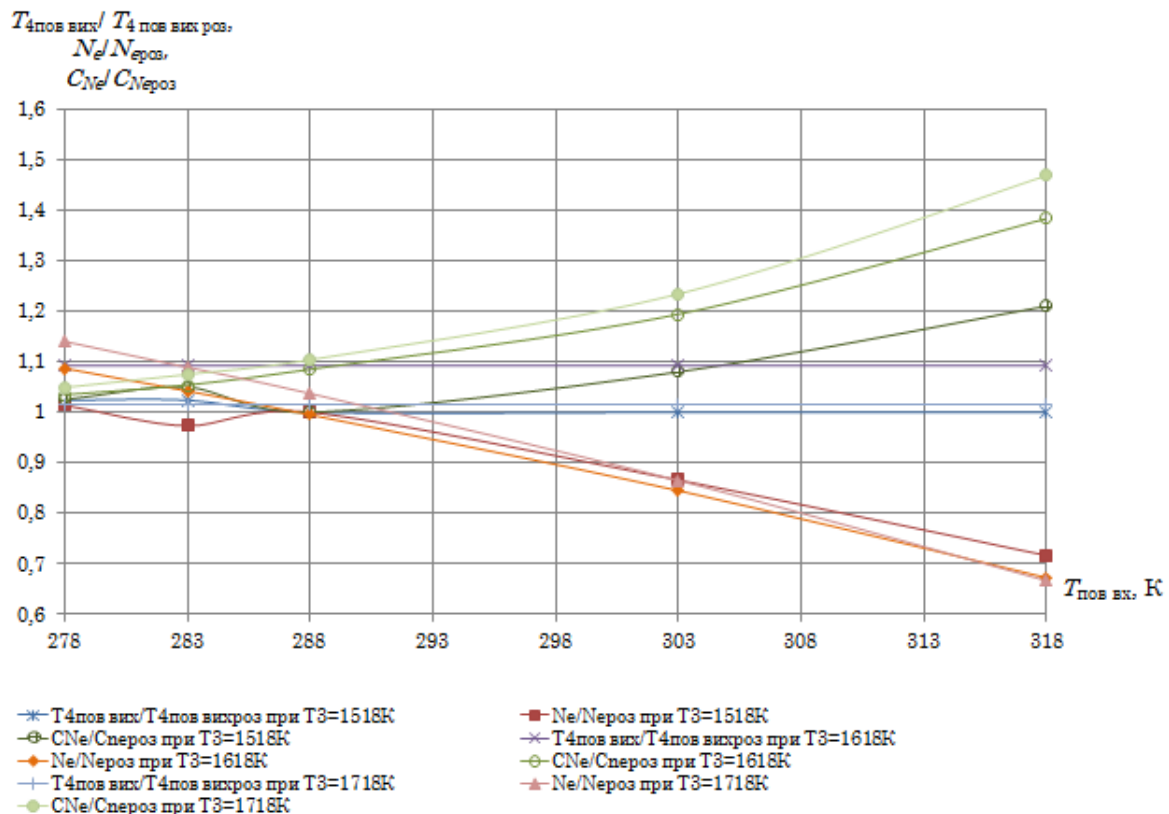


Рисунок 1. Техніко-економічні показники газотурбінної установки простого циклу в умовах зміни температури навколишнього середовища

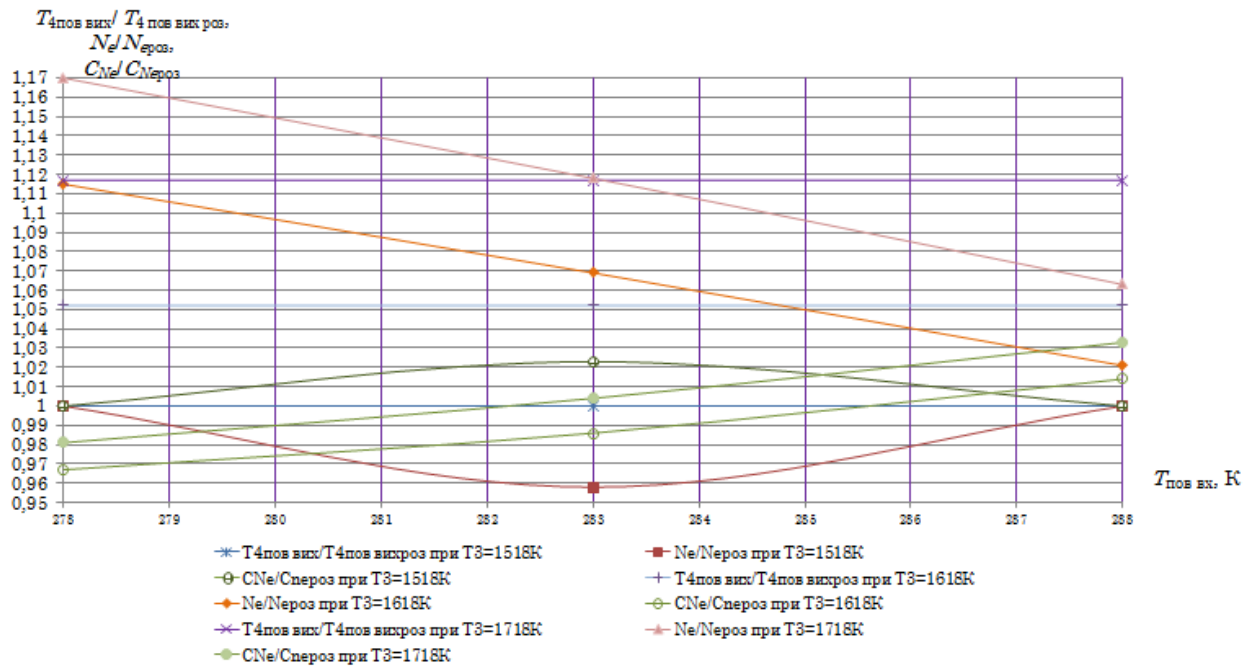


Рисунок 2. Зміна техніко-економічних показників газотурбінної установки простого циклу в умовах зміни температури на вході у компресор з однією холодильною машиною при температурі навколишнього середовища 288К

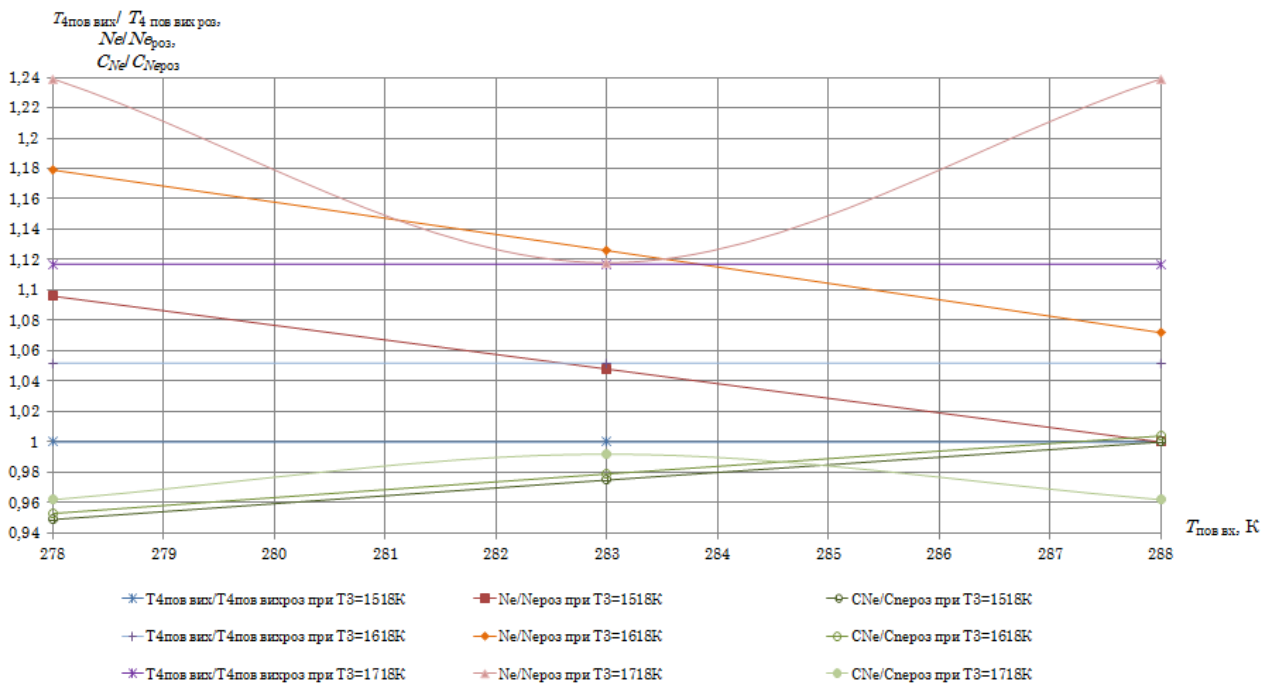


Рисунок 3. Зміна техніко-економічних показників газотурбінної установки простого циклу в умовах зміни температури на вході у компресор з двома холодильними машинами при температурі навколишнього середовища 288К

Значна ефективність ступеневого контактного охолодження водою пов'язана з використанням способів порізного тепломасопереносу, що може забезпечити квазіізотермічне стискання повітря з підвищенням температури на 12...16 градусів нижче в порівнянні з адіабатним процесом і при

значеннях вологовмісту 0,77...1,12, що дають змогу утилізувати воду з відпрацьованих газів. Завдяки неізотермічній абсорбції фізико-хімічні властивості такої води потребують додаткового очищення в залежності від палива, що використовується газотурбінним двигуном.

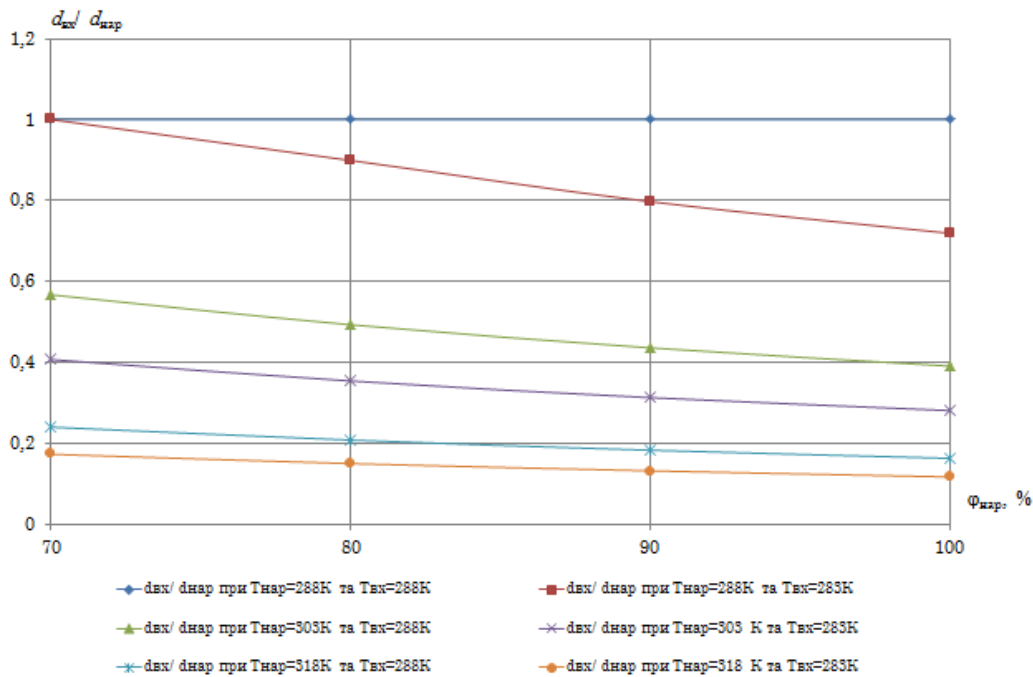


Рисунок 4. Показники вологовмісту перед компресором газотурбінної установки простого циклу в умовах зміни температури та відносної вологості навколишнього середовища

Висновки

Обґрунтовано ефективність способу ступеневого контактного охолодження водою з використанням порізного тепломасопереносу, що може забезпечити квазіізотермічне стискання повітря при значеннях вологовмісту, що дають змогу утилізувати воду з відпрацьованих газів для повторного використання при додатковому очищення від шкідливих елементів.

Література

- [1]. Jonsson, M., Yan, J. Humidified gas turbines – a review of proposed and implemented cycles. *Energy*. 2005. №30. P. 1013–1078. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.08.005>
- [2]. Thank-God, I., Dabbashi, S., Bosak, D., Sampath S., Di Lorenzo, G., Pilidis, P. Life cycle evaluation of anintercooled gas turbine plant used in conjunction with renewable energy. *Propulsion and Power Research*. 2016. Vol.5, No.3. P. 184-193. <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2016.07.005>
- [3]. Razzaq, W. H. A. Parametric Performance of Gas Turbine Power Plant with Effect Intercooler. *Modern Applied Science*. 2011. Vol.5, No.3. P. 173-184. <https://doi.org/10.5539/mas.v5n3p173>
- [4]. Colin, R. The WR-21 Intercooled Recuperated Gas Turbine Engine – Integration Into Future Warships. *Proceedings of the International Gas Turbine Congress*, Tokyo. 2003. 6 p.

- [5]. Reale, M. J. New High Efficiency Simple Cycle Gas Turbine – GE’s LMS100. *GE Energy*. 2004. 15 p.

Відомості про авторів

Богдан Беков, аспірант ННЦМІ МННІ НУК, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.



Світлана Кузнецова, к.т.н., доцент, доцент каф. ЕСЕУ та ТЕ НУК, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна, [ORCID ID: 0000-0003-0823-0583](https://orcid.org/0000-0003-0823-0583).



Анатолій Шевцов, д.т.н., професор, професор ННЦМІ МННІ НУК, Національний університет кораблебудування, Миколаїв, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-8692-6458](https://orcid.org/0000-0002-8692-6458).



РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ УТИЛІЗАЦІЇ СКИДНОЇ ТЕПЛОТИ КОРАБЕЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧОЮ СИСТЕМОЮ

Кузнецов Г.В.^{1,2}, Харитонов Ю.М.¹, Волошин А.Ю.²

¹ Національний Університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

² ТОВ «Дослідно-проектний центр кораблебудування», Україна

Анотація

Ключові слова: фазовий перехід, зарядка, розрядка, вихідні гази, мастило, охолоджуюча рідина.

У роботі з метою підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів корабельної енергетичної установки обґрунтовано їх схемні рішення з теплоакumuлюючими системами, які дозволяють комплексно використовувати скидну теплоту від різних джерел для потреб різних споживачів та загальнокорабельних потреб. Для різних рівнів потенціалів скидної теплоти відпрацьованих газів, мастила та охолоджуючої рідини для основних типів корабельних енергетичних установок підібрано низку теплоакumuлюючих матеріалів, що забезпечують вимоги як джерел теплоти так і споживачів. Для цих матеріалів представлено результати розрахунку їх температурного стану при послідовних процесах: зарядки, збереження та розрядки.

Вступ

Джерелами скидної теплоти при використанні енергетичних установок надводних кораблів є система газovýchлопу, мастильна система та система охолоджуючої рідини. Ці джерела відповідно характеризуються наступними потенціалами: 250 – 530 °С, 80 – 98 °С та 82 – 98 °С.

Теплота даних джерел може бути використана в елементах енергетичних установок і для загальнокорабельних потреб. Необхідні температурні рівні для споживання характеризуються наступними значеннями: для енергетичних установок (мастильна система – 70-88 °С; система охолоджуючої рідини – 72-88 °С), а для загальнокорабельних потреб – 45-55 °С.

Наведені вище умови обґрунтовують раціональне використання скидної теплоти для потреб КЕУ та загальнокорабельних потреб при використанні теплоакumuлюючих систем (ТАС) з метою економії енергоресурсів.

Актуальність досліджень

Основні результати впровадження теплоакumuлюючих систем в суднові енергетичні установки наступні:

– обґрунтовано спосіб утилізації теплоти відпрацьованих газів при застосуванні системи теплової підготовки, яка призначена для прогріву

охолоджуючої рідини, блоку циліндрів, головки блоку циліндрів і теплових витрат [1];

– визначено, що температурний потенціал відпрацьованих газів дозволяє виконати попередній прогрів суднового дизельного двигуна (СДВЗ) від мінімальної температури оточуючого середовища +5 °С до температури 50 °С [2-4].

– запуск СДВЗ при температурах системи охолодження у межах +40...50 °С дозволяє забезпечити подальшу роботу, що сприяє швидкому та ефективному прогріву двигуна до оптимальної температури системи охолодження +85 °С [2-5].

Наведені вище результати підтверджені експериментальними дослідженнями при модернізації системи охолодження суднового двигуна на прикладі MAN D2876 LE301 [2-5].

Аналіз існуючих публікацій показує, що дослідження в даній області в основному зосереджені на використанні відпрацьованих газів.

Таким чином, розробка схемних рішень теплоакumuлюючих систем, що комплексно використовують скидну теплоту різного температурного потенціалу у складі КЕУ є актуальним завданням.

Викладення основного матеріалу

Для розробки схемних рішень КЕУ з ТАС потрібно визначити вихідні дані. Ці вихідні дані

отримані для енергетичних установок надводних кораблів згідно таблиць 1 та 2.

На базі вихідних даних були розроблені теплові схеми КЕУ з ТАС для варіантів з теплообмінними апаратами рекуперативними та термосифонними. Приклад теплової схеми дизельної

енергетичної установки з ТАС для катера наведено на рисунку 1.

Згідно схемних рішень КЕУ з ТАС для відповідних джерел теплоти підібрано теплоакуючі матеріали, які наведені в таблиці 3.

Таблиця 1. Типи КЕУ та характеристики їх джерел скидної теплоти [6]

Клас корабля	Тип КЕУ	Водотоннажність, т	Джерела скидної теплоти		
			Відпрацьовані гази, °С	Масило, °С	Охолоджуюча рідина, °С
Фрегати	CODOG	1300 - 3000	330-370	82-92	80-90
		3200 - 5000	330-350	80-95	83-94
		5400 - 7200	320-380	84-98	80-95
	CODAG	2900 - 6000	330-450	84-98	80-90
	COGOG	3700 - 4400	330-450	84-98	80-90
Корвети	COGAG	3700 - 4400	330-450	82-92	82-93
	CODAG	2100	340-440	82-95	80-90
	COGAG	485	350-480	86-98	80-95
Патрульні та ракетні катери	CODAG	250 - 2100	320-380	82-92	81-92
	COGAG	462 - 510	310-480	82-95	83-94
	ДУ	273-520	330-370	82-92	80-90

Таблиця 2. Типи КЕУ та характеристики їх споживачів

Тип КЕУ	Тип двигуна	Споживачі			
		Система змащення	Система охолодження	Паливна система	Корабельні потреби
CODOG	ДД	70-80	80-90	80-90	45-50
CODAG	ГТД	60-70	-	82-95	45-55
COGOG	ГТД	60-70	-	80-90	45-55
COGAG	ГТД	60-70	-	81-93	45-55
ДУ	ДД	72-88	82-98	82-95	45-50

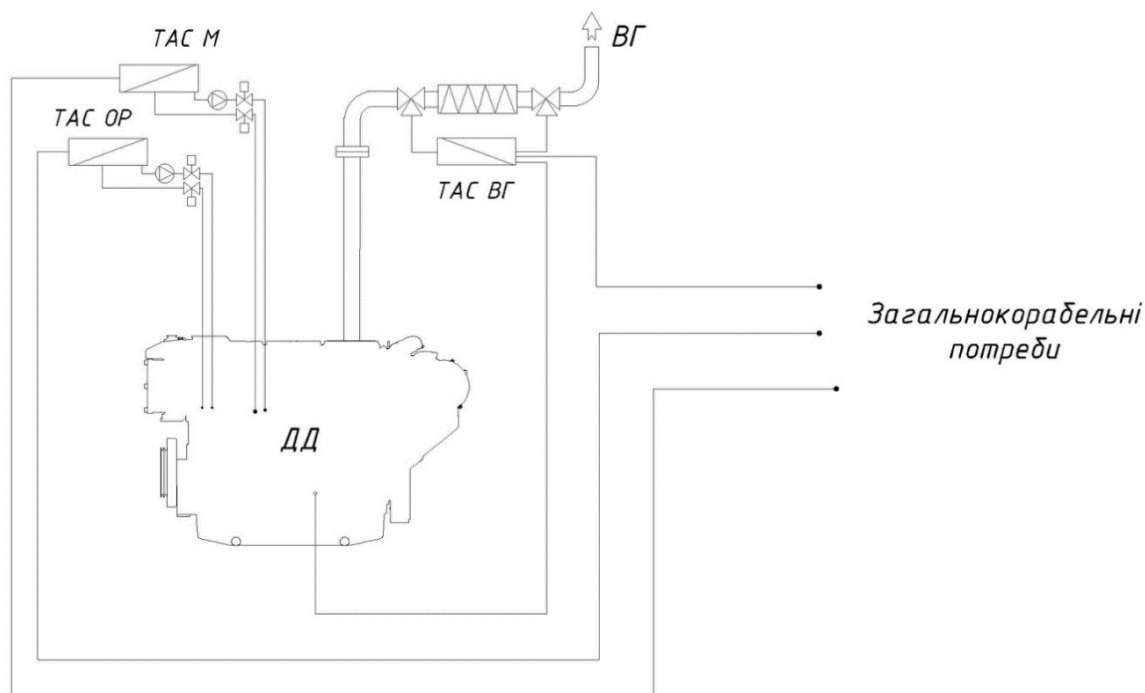


Рисунок 1. Теплова схема дизельної енергетичної установки з ТАС: ДД – дизельний двигун, ТАС ВГ – теплоакуюча система відпрацьованих газів, ТАС М – теплоакуюча система масла, ТАС ОР – теплоакуюча система охолоджуючої рідини

Оцінки часів зарядки, збереження та розрядки теплового акумулятора в системі ТАС виконувалися згідно математичної моделі наведеної в [7].

Результати розрахунку температурного стану теплоакуюючих матеріалів при послідовних процесах: зарядки, збереження та розрядки наведено на рисунку 2 та 3.

Таблиця 3. Теплоакуючі матеріали для КЕУ з ТАС

Показник	Джерело скидної теплоти		
	Відпрацьовані гази	Масило	Охолоджуюча рідина
Температурний потенціал, $K (^{\circ}C)$	520-770 (247-497)	353-370 (80-97)	355-370 (82-97)
Теплоакуючий матеріал (температура плавлення, K)	Натрій гідроксид (596), Нітрит натрію (544), Нітрат літію (525)	Сульфат натрію (368), Барій гідроксид (351), Парафін 46 – 48 (320)	Сульфат натрію (368), Барій гідроксид (351), Парафін 46 – 48 (320)

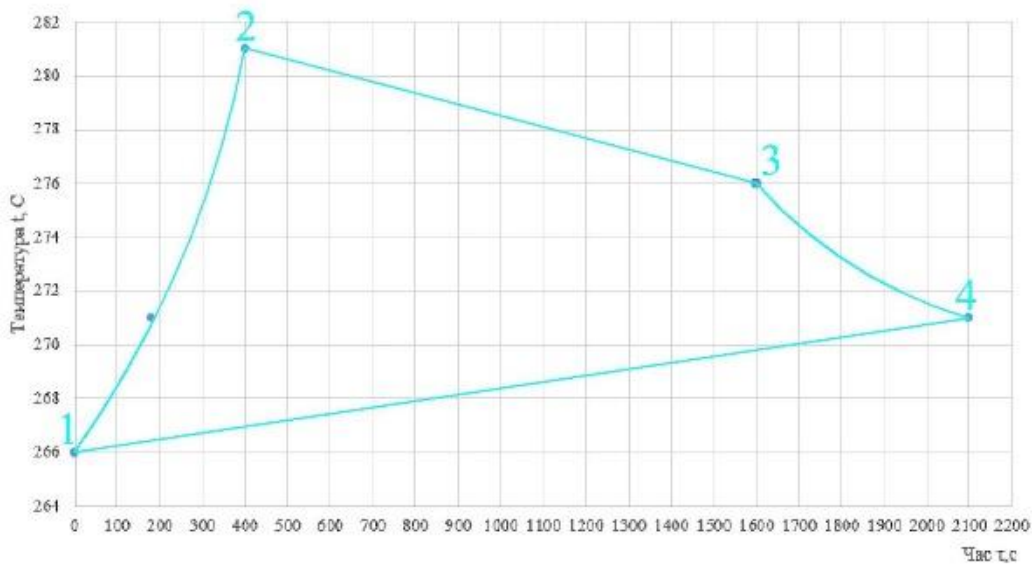


Рисунок 2. Температурний стан нітриту натрію при роботі теплового акумулятора: 1-2 зарядка, 2-3 збереження, 3-4-1 розрядка

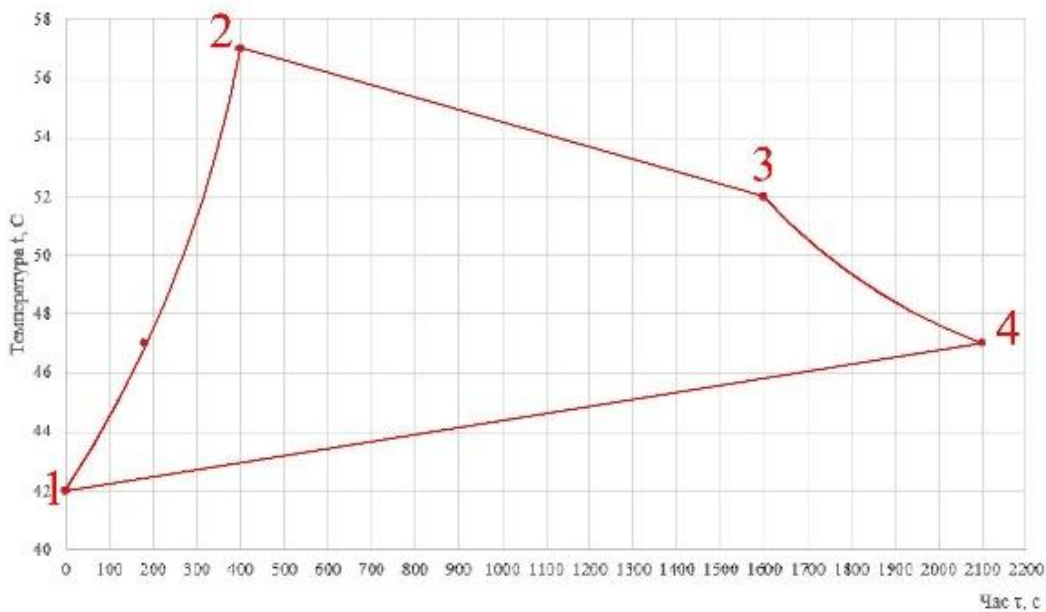


Рисунок 3. Температурний стан парафіну при роботі теплового акумулятора, позначення як на рисунку 2

Висновки

Визначено рівні потенціалів скидної теплоти відпрацьованих газів, мастила та охолоджуючої рідини для різних типів корабельних енергетичних установок, що характеризуються відповідно наступними потенціалами: 250...530 °С, 88...98 °С та 82...98 °С.

Обґрунтовано схемні рішення корабельних енергетичних установок з теплоакumuлюючими системами, що дозволяють комплексно використовувати скидну теплоту від різних джерел для потреб різних споживачів енергетичної установки та загальнокорабельних потреб.

Згідно схемних рішень корабельних енергетичних установок з теплоакumuлюючими системами для відповідних джерел теплоти підбрано низьку теплоакumuлюючих матеріалів: натрій гідроксид, нітрит натрію, нітрат літія, барій гідроксид, сульфат натрію, парафін 46 - 48, що забезпечують вимоги як джерел теплоти так і споживачів.

Для послідовних процесів зарядки, збереження та розрядки визначено температурні стани вищезазначених теплоакumuлюючих матеріалів.

Література

[1]. Дехтяренко М.В. Покращення паливної економічності суднової енергетичної установки засобами ресурсозберігаючої теплової підготовки двигуна. *Сучасні проблеми морського транспорту та безпека мореплавства*: матеріали ІХ Всеукр. студент. наук. конференції. Херсон, 2019. С. 30–32.

[2]. Погорлецький Д.С., Грицук І.В., Симоненко Р. В., Білай А. В., Котов А. І. Формування системи теплової підготовки транспортного засобу, працюючого на зрідженому газовому паливі: матеріали VI Міжн. Науково-Технічної конференції, присвяченої 150-літтю від дня народження Некрасова І. С. Миколаїв, 2020.

[3]. Грицук І.В., Погорлецький Д.С., Худяков І.В., Дзигар А.К., Волков В.В. Теплова підготовка двигуна енергетичної установки судна портового флоту. *Сучасні підходи до вискоефективного використання засобів транспорту*: матеріали XI Міжн. Наук.-Практ. конф. Ізмаїл, 2020.

[4]. Грицук І.В., Погорлецький Д.С., Вербовський В.С., Вольська О.М., Вербовський О.В., Сімагін А.Ф. Забезпечення теплової підготовки двигуна енергетичної установки за допомогою

системи прогріву з фазоперехідними тепловими акумуляторами: матеріали Міжнар. наук.-практ. конференції, присвяченої пам'яті професорів Фоміна Ю.Я. і Семенова В.С. Одеса (Україна) – Стамбул (Туреччина) - Одеса (Україна), 2019.

[5]. Погорлецький Д.С., Худяков І.В., Грицук І.В., Манжелей В.С. Тепловая подготовка двигателя судовой энергетической установки для улучшения топливной экономичности. *Научные труды Азербайджанской государственной морской академии*. 2019. № 3.

[6]. Jane's Fighting Ships, 2019-2020. 1162 p.

[7]. Кузнецов Г.В. Аналіз існуючих рішень по утилізації теплоти для корабельних енергетичних установок. *«Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування»*: матеріали 14-ї Міжн. наук.-практ. конференції. 2023.

Відомості про авторів

Георгій Кузнецов, аспірант, інженер-конструктор 3 категорії, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, ТОВ «Дослідно-проектний центр кораблебудування», Україна, [ORCID ID: 0000-0002-1028-4102](https://orcid.org/0000-0002-1028-4102).



Юрій Харитонов, д.т.н., професор, керівник Навчально-наукового центру морської інфраструктури, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-2425-1758](https://orcid.org/0000-0002-2425-1758).



Андрій Волошин, к.т.н., начальник механічного відділу, ТОВ «Дослідно-проектний центр кораблебудування», Миколаїв, Україна, [ORCID ID: 0000-0000-9165-3733](https://orcid.org/0000-0000-9165-3733).



DIRECTIONS IN THE DEVELOPMENT OF HERMETIC COMPRESSOR UNITS OF SHIPBOARD EQUIPMENT OF AIR CONDITIONING AND REFRIGERATION

Olena V. Lytosh[✉]

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ukraine

Abstract

Key words: hermetic compressor unit; compression refrigeration machine; shipboard air conditioning and refrigeration equipment; cooling capacity

The issue is discussed related to the concept of application and improvement of hermetic compressor units (HCU) of shipboard equipment air conditioning and refrigeration (EACR). The purpose of this study is to analyze the development of HCU in our country and abroad and the prospects for the application and improvement of domestic HCU for shipboard EACR development. The choice and application of HCU for shipboard EACR is analyzed. This choice depends on the energy efficiency of the HCU, its reliability, noise level and manufacturing cost.

Introduction

Hermetic compressor units (HCU) are widely used on ships of the sea and river fleet for refrigeration supply of autonomous air conditioners (local and central), monoblock low-temperature cooling and refrigeration units [1].

The rapid development and improvement of hermetic Vapor Compressor Refrigerating Machines VCRM is not least due to the current trend of transition to environmentally friendly refrigerants (R134A, R404A, R407C, R410A, etc.). However, these refrigerants are expensive and work with polyester oils that are poorly compatible with other brands of oils. Also, their thermodynamic properties are inferior to traditional refrigerants, they are non-azeotropic mixtures, the leakage of which leads to a change in composition and an increase in the nonisothermal process of boiling. Transition to hermetic VCRM partially avoids these shortcomings.

Aim

Analysis of the development of hermetic steam compressor refrigerating machines (SCRM) in our country and abroad and the prospects for the application and improvement of domestic hermetic SCRM for shipboard air conditioning and refrigeration systems.

Presentation of the main material

From the analysis of studies and publications it follows that there was a problem of choice and prospects for the use of various types of hermetic

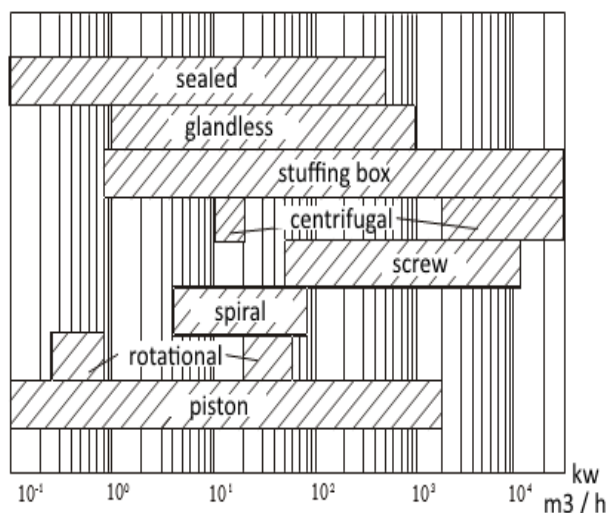
compressor units, in particular, for VCRM of shipboard equipment air conditioning and refrigeration.

More and more widespread VCRM with units with two, three and four sealed compressor units in parallel [2]. In addition to the economic regulation of performance, they are of interest in terms of reducing the cost of redundancy. Large autonomous central air conditioners with pressurized VCRM are being created. An example is the AK 63/25 sectional autonomous central air conditioners for the "Monolith" facility with a cooling capacity of about 90 kW, developed by Central Scientific Research and Design Institute "Typhoon" and manufactured by PA "Equator" [3].

In Fig. 1 shows the classification of VCRM by cooling capacity, types of compressor units and the method of arrangement of the drive motor. The most important part of the VCRM is the compressor unit, so the classification of these machines basically coincides with the classification of their compressor units [1].

The classification chart shows that the cooling capacity of sealed VCRM has reached 500 kW and has a tendency to further increase Cooling capacity (volumetric capacity).

I want to say a few words in defense of the R22 refrigerant, which relates to hydrochlorofluorocarbons (HCFC), the application of which is regulated by the Montreal Protocol (their phased restriction is provided with a complete ban by 2030) [4]. R22 refrigerant has indisputable advantages (one-component, safety, low cost, etc.) that modern refrigerants do not have, and its use could be resolved in pressurized systems.



Cooling capacity (volumetric performance)

Figure 1. Classification of VCRM according to cooling capacity, types of compressor units and method of arrangement of the drive motor

Conclusions

Thus, one of the widespread and promising consumers of cold on sea and river vessels are hermetic units (small and large), autonomous air conditioners (local or central) with hermetic compressor units (HCU). In connection with the creation of domestic low-temperature cooling and refrigeration units, the need for HCU for working in low-temperature modes has increased.

References

[1]. Radchenko N.I., Dorosh V.S., Radchenko A.N., Radchenko R.N., Lytosh E.V. Germetichnyye

parokompressionnyye kholodil'nyye mashiny sudovykh sistem konditsionirovaniya i refrizheratsii [Hermetic vapor compression refrigeration machines of the ship systems of conditioning and refrigeration] / Radchenko N.I., Dorosh V.S., Radchenko A.N., Radchenko R.N., Lytosh E.V.; Monograph. Nikolaev: NUS, 2011. 400 p.

[2]. Dorosh V.S. Tendencii v razvitii holodilnykh germetichnykh kompressorov sudovykh sistem konditsionirovaniya i refrizheratsii [Trends in the development of refrigerated hermetic compressors of marine air conditioning and refrigeration systems]. *Materiali I Mizhnar. n.-t. konf. "Holod v energetici i na transporti", ch. II.* – Mikolayiv: NUK, 2008. S. 132 – 144.

[3]. Romashkan V.H., Medvedev B.I, Kantor S.A. i dr. Zavod "Ekvator". Stranitsyi istorii [PA "Equator". Pages of history] / Romashkan V.H., Medvedev B.I, Kantor S.A. et al. Nikolaev: "Atoll", 2003. 222 p.

[4]. James M. Calm Sleduyushcheye pokoleniye khladagentov [Next generation of refrigerants]. *Cooling technology.* 2008. № 7. P. 26–30 p.

Authors' Information

Olena Lytosh, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, [ORCID ID: 0000-0002-8109-4680](https://orcid.org/0000-0002-8109-4680)



ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА МАСОГАБАРИТНІ ПОКАЗНИКИ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА З ОХОЛОДЖЕННЯМ ВХІДНОГО ПОВІТРЯ

Бєков Б.А. 

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

Анотація

Ключові слова: газотурбінний двигун, ефективність, охолодження, вхідне повітря, холодильна машина.

Порівняно декілька способів охолодження зі встановленням додаткового обладнання у впускний колектор газотурбінної установки. Проаналізовано метод розпилення води, типу „Туман” на вході [1] в газотурбінний двигун. Дослідження визначає оптимальні параметри розпилення води для досягнення максимальної ефективності. Проаналізовано метод охолодження вхідного повітря, за допомогою використання холодильної машини і встановлення охолоджувача повітря на вході в газотурбінну установку. Розглядається взаємодія між холодильною машиною та газотурбінним двигуном з метою підвищення ефективності її роботи. Порівняно масогабаритні показники обох методів охолодження вхідного повітря на вході в газотурбінний двигун.

Вступ

На підставі сучасного стану інтенсифікації пристрою охолодження в енергетичних установках його практичне здійснення пов'язане з необхідністю подолання значних труднощів як наукового, так і конструктивного та технологічного характерів. Тому відсутність результатів і рекомендацій про процеси тепломасоперенесення при випарному охолодженні вологого повітря через поверхні напрямних лопаток при його стисканні стримують створення на їх основі газотурбінних установок з покращеними економічними, екологічними, ресурсними та масогабаритними показниками.

Актуальність досліджень

Охолодження вхідного повітря в газотурбінних двигунах залишається актуальним напрямком досліджень через його потенційний вплив на підвищення термодинамічної ефективності та зменшення викидів. Застосування цієї стратегії дозволяє знизити температуру вхідного повітря, що позитивно впливає на роботу двигуна та може забезпечити покращення його продуктивності. В умовах постійного прагнення до сталого розвитку та зменшення впливу транспорту на довкілля, дослідження в сфері охолодження вхідного повітря залишається важливим для досягнення екологічної ефективності та підвищення конкурентоспроможності газотурбінних двигунів. Використання розпилення води для

охолодження вхідного повітря в газотурбінних двигунах залишається важливим інженерним рішенням. Цей метод сприяє зниженню температури вхідного повітря, що може позитивно впливати на підвищення ефективності та зменшення викидів оксидів азоту. Актуальність цього підходу зумовлена бажанням оптимізувати роботу газотурбінних двигунів, забезпечуючи ефективніше використання пального та зменшення негативного впливу на довкілля. Використання холодильної машини для охолодження вхідного повітря в газотурбінних двигунах є перспективним технологічним рішенням [2]. Цей підхід може сприяти підвищенню термодинамічної ефективності та зменшенню викидів, оптимізуючи роботу двигуна за рахунок зниження температури вхідного повітря. Актуальність цього методу визначається прагненням до збереження енергії та зменшення впливу на довкілля, розвиваючи більш ефективні та екологічно чисті рішення для газотурбінних систем.

Таким чином, відсутність науково обґрунтованих результатів, які комплексно дозволяють підвищити технічну ефективність газотурбінних установок, стримують їх удосконалення та доводять актуальність теми дослідження.

Викладення основного матеріалу

Об'єкт дослідження – процеси тепло- і масопереносу при випаровуванні двофазного потоку в умовах квазіізотермічного стиску в елементи

суднових енергетичних установок та його характеристики.

Предмет дослідження – закономірності та параметри процеси тепло- та масопереносу при випаровуванні двофазного потоку в умовах квазіізотермічного стиску та їх вплив на економічні, екологічні, ресурсні та масогабаритні показники суднових енергетичних установок.

Метод дослідження – фізичне моделювання процесів тепло- і масопереносу при охолодженні впускного повітря шляхом встановлення додаткового охолоджувального обладнання.

Завдання наукового дослідження.

-Інтеграція системи охолодження вхідного повітря на основі розпилення води та холодильної машини.

-Використання програмного забезпечення для моделювання різних сценаріїв охолодження вхідного повітря та оцінка їх впливу на робочі параметри.

-Аналіз масогабаритних характеристик при умові використання запропонованих способів охолодження вхідного повітря на вході в газотурбінну установку.

При вирішенні завдань розглянуто структурні схеми енергетичних установок з охолодженням циклового повітря на вході компресора низького тиску, що приведені на рисунках 1, 2 і 3. Масогабаритні показники окремих елементів енергетичних установок наведено в таблиці.

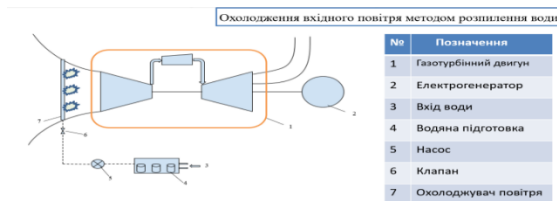


Рисунок 1. Структурна схема газотурбінної установки з випарним охолодженням на вході

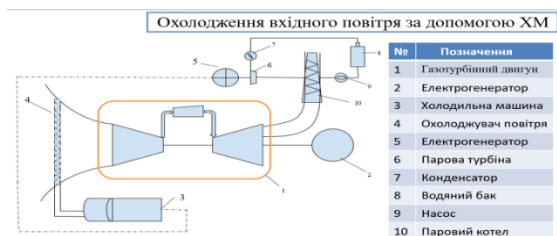


Рисунок 2. Структурна схема газотурбінної установки з охолодженням на вході холодильною машиною з приводом електричною енергією

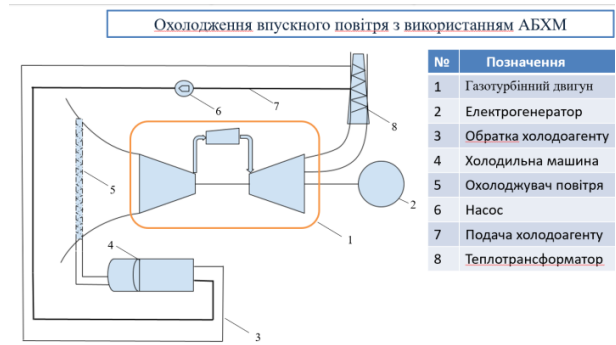


Рисунок 3. Структурна схема газотурбінної установки з охолодженням на вході холодильною машиною при теплотрансформації скидної теплоти

Аналіз отриманих результатів питомих значень витрати палива, маси і об'єму енергетичних установок визначив наступне.

Використання холодильних машин для охолодження циклового повітря на вході компресора низького тиску забезпечує скорочення питомої витрати палива на 6...10 г/(кВт·год), що складає 2...3 % при одночасному підвищенні питомої маси до 1,2 кг/кВт і питомого об'єму до 0,002 м³/кВт.

Співставлення останніх показників з аналогічними для газопаротурбінних установок з утилізацією теплоти відпрацьованих газів в яких скорочення витрати палива складає до 14 %, підвищення питомої маси до 2 кг/кВт і питомого об'єму до 0,007 м³/кВт характеризує, що вибір раціонального варіанту потребує узгодження ефективності охолодження повітря не тільки за показниками економії палива, а додатково за показниками ресурсу, екологічності і масогабаритів.

Таблиця 1. Масогабаритні показники елементів енергетичних установок [3, 4]

Показник	Довжина, м	Ширина, м	Висота, м	Вага, т.
ГТД	6.4	2.5	2.7	16
Паровий котел	3.9	2.7	2.5	8.6
АБХМ2-3000П-10	7.3	3.2	3.8	20
Насос №1	0.3	0.7	0.6	0.15
Водопідготовка	2.4	5.5	1.6	0.9
Насос №2	0.1	0.3	0.4	0.07
Електрогенератор	1.5	1.5	1.5	1
Парова турбіна	4	2.5	2.5	4
Конденсатор	2	1.2	0.4	0.5
Водяний бак	15	6	14	1.7

Висновки

Обґрунтування ефективності способів охолодження циклового повітря на вході компресора низького тиску з подальшим охолодженням в процесі стискання повинно виконуватися комплексно на базі одночасного аналізу показників економічності, екологічності, ресурсу і масогабаритних показників.

Література

- [1]. Минячихин А.В., Петухов І.І., Сорогин Ф.Г., Турна Р.Ю. *Застосування випарних панелей для системи охолодження вхідного повітря газотурбінного приводу.*
- [2]. Радченко А.Н., Рамзі Эл Гербі., *Охолодження повітря на вході рекуперативних*

газотурбінних двигунів абсорбційно-ежекторними холодильними машинами. 2014. С. 99-103.

- [3]. Бондин Ю.Н., Султанський Ю.О., Сташок А.Н. *Газотурбінні двигуни для промислового застосування. С. 135.*

- [4]. URL: <http://mos-compressor.ru/products/>

Відомості про авторів

Богдан Беков, аспірант ННЦМІ МННІ НУК, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.



СЕКЦІЯ 3
РОБОЧІ ПРОЦЕСИ, ДИНАМІКА ТА МІЦНІСТЬ
ТРАНСПОРТНОГО І ТЕХНОЛОГІЧНОГО
ОБЛАДНАННЯ

ОРГАНІЗАЦІЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ СУДНОВОГО МАЛООБЕРТОВОГО ДИЗЕЛЯ

Самарін О.Є. 

Херсонська державна морська академія, Україна

Анотація

Ключові слова: модуль подачі газового палива, форкамерно-іскровий модуль запалення, випускний клапан, газотурбокомпресор, компресор, гідравлічний сервопривід з електронним управлінням, електрична машина.

Поставлена задача вирішується тим, що випускний клапан оснащено гідравлічним сервоприводом з електронним управлінням, а газотурбокомпресор – електричною машиною. Завдяки наявності гідравлічного сервоприводу з електронним управлінням, між колінчастим валом двигуна і приводом клапана немає механічного зв'язку, що дозволяє змінювати алгоритми відкриття і закриття клапану, закладений в програмі модуля управління. Збільшуючи час відкриття клапана, можна управляти масовим зарядом циліндра. Так як при форкамерно-іскровому запаленні наприкінці стискування не потрібна температура, достатня для самозаймання, таким методом можна регулювати двигун в широких межах навантажувально-швидкісних режимів. Таке регулювання можна розглядати як цикл Міллера з керованим ступенем стискування, при якому збільшення кута затримки закриття випускного клапана веде до підвищення ефективності робочого процесу за рахунок різниці між ділянкою робочого ходу, яка використовується для стиснення та ділянкою на якій відбувається розширення продуктів згоряння.

Вступ

Відомо систему організації робочого процесу суднового малооберткового газового двигуна, що складається з циліндра, модуля подачі газового палива, форкамерно-іскрового модуля запалення, випускного клапана і газотурбокомпресора, у складі якого є турбіна і компресор [1, 2].

Головними недоліками використання такої системи організації робочого процесу є зниження літрової потужності, пов'язаної зі зменшенням вагового наповнення циліндрів. Крім того, при ступенях стиснення, характерних для дизельних двигунів, у широкому діапазоні навантажень відзначається поява детонації, що перешкоджає використанню таких двигунів в установках з безпосередньою передачею потужності на гвинт. Стійка робота двигунів з високими показниками потужності та ефективності відзначається лише у порівняно вузькому діапазоні на досить бідних сумішах. Оптимальний коефіцієнт надлишку повітря лежить у дуже вузькому діапазоні. При його зменшенні двигун працює з детонацією, а при збільшенні виникає небезпека пропуску запалювання горючої суміші.

Ступінь стиснення залишається постійною і високою на всіх режимах роботи двигуна, що сприяє утворенню небезпечних викидів з відпрацьованими газами.

Актуальність досліджень

Поставлено задачу створити таку систему організації робочого процесу суднового малооберткового газового двигуна, у якій тиск у циліндрі при згорянні газу зменшено, а подача свіжого заряду повітря у циліндр залишається оптимальною на всіх режимах роботи двигуна [1, 2].

Постановка завдання

З метою зменшення вказаних недоліків пропонується випускний клапан оснастити гідравлічним сервоприводом з електронним управлінням, а газотурбокомпресор - електричною машиною.

Викладення основного матеріалу

Завдяки наявності гідравлічного сервоприводу з електронним управлінням, між колінчастим валом двигуна і приводом клапана немає механічного зв'язку, що дозволяє змінювати алгоритми відкриття і закриття клапану, закладений в програмі модуля управління. Збільшуючи час відкриття клапана, можна управляти масовим зарядом циліндра. Так як при форкамерно-іскровому запаленні наприкінці стискування не потрібна температура, достатня для самозаймання, таким методом можна регулювати двигун в широких межах навантажувально-швидкісних режимів.

Таке регулювання можна розглядати як цикл Міллера з керованим ступенем стиснення, при якому збільшення кута затримки закриття випускного клапана веде до підвищення ефективності робочого процесу за рахунок різниці між ділянкою робочого ходу, яка використовується для стиснення та ділянкою на якій відбувається розширення продуктів згоряння [1, 2].

Подовжена продувка сприяє більш якісному очищенню циліндра від продуктів згоряння, які залишилися від попереднього циклу.

Застосування газотурбокомпресора, що поєднує у собі турбіну, компресор та електричну машину, дозволяє збалансувати потоки потужності при зміні режимів та умов експлуатації двигуна. У всьому діапазоні експлуатаційних режимів, може підтримуватися постійний тиск перед робочим циліндром.

На рис. 1 показана система організації робочого процесу суднового малооборотного газового двигуна.

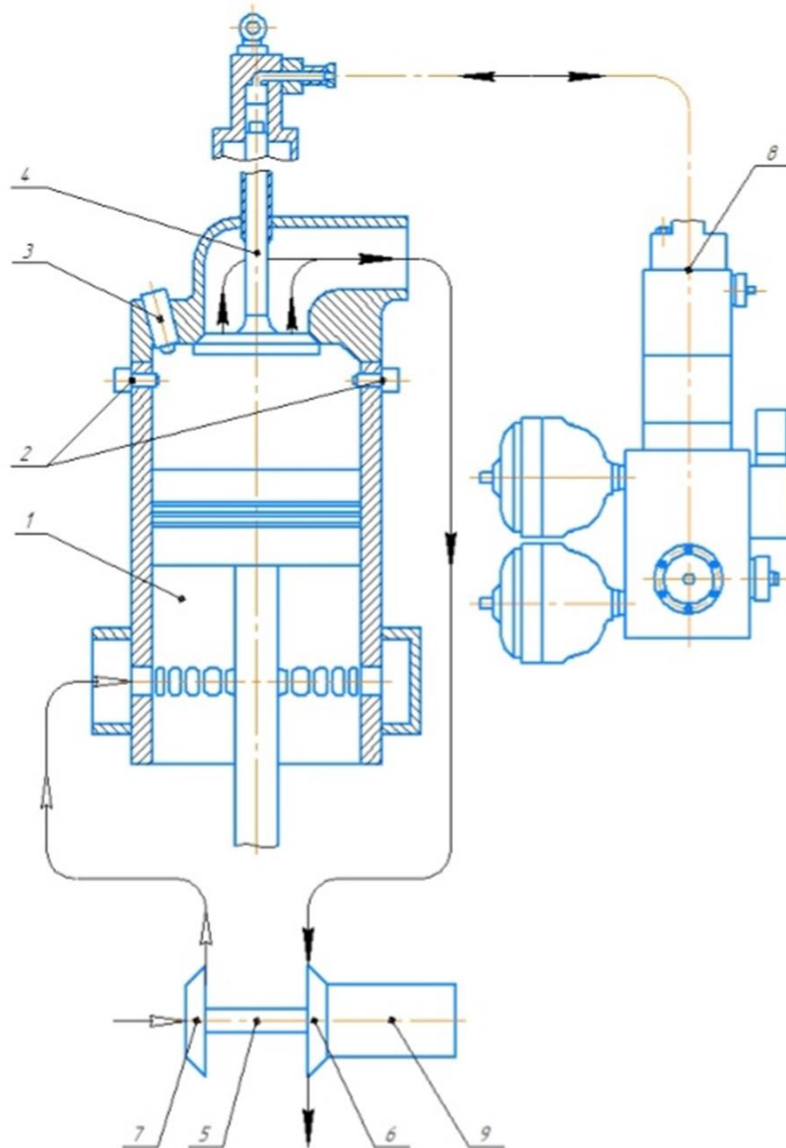


Рисунок 1. Система організації робочого процесу суднового малооборотного дизеля: 1 – циліндр; 2 – модуль подачі газового палива; 3 – форкамерно-іскровий модуль запалення; 4 – випускний клапан; 5 – газотурбокомпресор; 6 – турбіна; 7 – компресор; 8 – гідравлічний сервопривід з електронним управлінням; 9 – електрична машина

Система організації робочого процесу суднового малооборотного газового двигуна складається з циліндра 1, модуля подачі газового палива 2, форкамерно-іскрового модуля запалення 3, випускного клапана 4 і

газотурбокомпресора 5, у складі якого є турбіна 6 і компресор 7. Випускний клапан 4 оснащено гідравлічним сервоприводом з електронним управлінням 8, а газотурбокомпресор 5 - електричною машиною 9.

Система схема організації робочого процесу застосовуються наступним чином.

Після продування циліндра 1 від газотурбокомпресора 5 випускний клапан 4 закривається за допомогою гідравлічного сервоприводу з електронним управлінням 8 за встановленим алгоритмом, що забезпечує зменшення тиску у циліндрі 1.

Після подачі газу через модуль подачі газового палива 2 відбувається його перемішування зі свіжим повітрям і примусове запалювання від форкамерно-іскрового модуля запалення 3. Далі у циліндрі 1 відбувається згоряння газового палива робочий хід.

На режимах номінальної потужності, коли у двотактних двигунів спостерігається надлишок потужності турбіни 6, яка перевищує потреби компресора 7, частина енергії відводиться електричною машиною 9 шляхом її перетворення в електричну енергію, яка віддається до суднової мережі.

При необхідності підтримання продуктивності компресора 7, коли турбіна 6 не виробляє необхідної потужності (наприклад на часткових навантаженнях), необхідна різниця енергії підводиться електричною машиною 9 з використанням електричної енергії, відібраної від суднової електричної мережі. Тим самим тиск наддувного повітря залишається незмінним, що сприяє кращому наповненню циліндра 1.

Висновки

Проведення модернізації дозволяє створити таку систему організації робочого процесу суднового малообертового газового двигуна, яка дозволяє зменшити тиск у циліндрі при згорянні газового палива і забезпечити оптимальну подачу

свіжого заряду повітря у циліндр на всіх режимах роботи двигуна.

Модернізація може бути проведена в умовах виробника двигуна і застосована силами машинної команди при виконанні ремонтно-профілактичних робіт на судні.

Запропоноване технічне рішення є універсальним і може бути застосоване на судах з двотактними малообертовими дизельними двигунами різної потужності, що працюють на газі.

Література

- [1]. Білоусов Є.В. Паливні системи сучасних суднових дизелів. Херсон, ХДМА, 2014. 260 с.
- [2]. Наливайко В.С., Тимошевський Б.Г., Ткаченко С.Г. Суднові двигуни внутрішнього згоряння: навч. посіб. Миколаїв: видавець Торубара В.В., 2015. 332 с.
- [3]. Woodyard D. Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines – Oxford, Elsevier Linacre House, 9th ed., 2009. 903 p.
- [4]. Mollenhauer K., Tschoeke H. Handbook of Diesel Engines. Heidelberg, Springer, 2010. 636 p.

Відомості про авторів

Олександр Самарін, к.т.н., доцент, доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-2690-7298](https://orcid.org/0000-0002-2690-7298).



CALCULATION OF LOADS DURING OPERATION OF TOWER CRANES

Ievgenii Gorbatyuk¹, Oleg Bulavka^{2✉}

¹ Kyiv National University of Construction and Architecture, Ukraine

² LLC «KSM-TRANS», Ukraine

Abstract

Key words: crane, mechanism, indicator, element, load, moment.

In order to simplify calculations of structures under dynamic loads in operation, a diagram is given according to which the rest of all elements of the mechanism are brought to its first element (engine). This allows you to greatly simplify the equation for solving and determine the values of the elasticity or stiffness factors of the elements.

Introduction

Loading and unloading works are an integral part of the technological process of construction. Cranes of different types are mainly used to perform these works [1]. Cranes as lifting machines are widely used in construction for the movement of goods and installation of structures.

The scientific and technological progress taking place in all countries of the world strongly requires an increase in productivity, load lifting and an increase in the working speeds of lifting machines, which leads to a reduction in transients, that is, to a decrease in the time of acceleration and braking of machines. All this leads to an increase in the intensity of the load-lifting machine, causes additional forces on all elements of the machine, received in the technique the name – external dynamic loads [2].

Relevance of research

For safe operation of cranes, it is important to take into account the value of all types of dynamic loads operating when calculating their structures and selecting component elements [3, 4].

Therefore, at present, the actual problem is the development of a technique for determining dynamic loads in the mechanism of lifting the cargo of cranes in case of lack of movement in order to simplify complex calculations.

Presentation of the main material

Elements of dynamic loads of the crane load lifting mechanism are its elastic components – ropes and shafts, which are deformed under the influence of loads. The value of this deformation of the elements is taken into account by the coefficients of elasticity or compliance with linear and steep or

their inverse value – stiffness coefficients. These coefficients depend respectively on linear or angular strains.

Due to the fact that the lifting mechanism consists of a large number of elastic elements, the assembly and solution of equations for determining these coefficients is difficult. In order to simplify the equations and these calculations, the given calculation scheme according to which the remaining elements of the mechanism are brought to its first element (engine) is recommended. This allows you to greatly simplify the equation for solving and determine the values of the elasticity factors or stiffness of the elements of the dynamic loads of the crane lifting mechanism.

Therefore, it is necessary to develop a methodology for determining dynamic loads in the mechanism of lifting the crane load in case of non-stop movement with the use of the given design schemes in order to simplify complex calculations.

Any mechanism or any machine has elements or assemblies of massive or rigid bodies, which in the course of the transition process move as a whole. Such elements can be considered absolutely rigid bodies, and their entire mass can be concentrated at a point coinciding with the center of weight of this element or node.

Thus, the mechanism or machine consists of "point masses" which include: transported cargo, rotating parts of the engine, brake pulley, drum, gear wheels, etc. [5].

These "point masses" are connected by elastic elements – shafts, ropes and other elements that determine, mainly, the deformation of the mechanism. These elastic elements have a relatively small mass, compared to "point masses," so they can, in the first approximation, be considered massless or absolutely elastic elements.

The elastic elements of the machine under its load are appropriately deformed. The amount of this deformation of the element is taken into account by the coefficient of elasticity or compliance.

The coefficient of elasticity or compliance is defined as the ratio of the value of linear deformation or the angle of twist of this element to the value of the force or torque acting on it.

In practice, more often use the value of the inverse coefficient of elasticity, which is called the stiffness coefficient.

Thus, the design scheme can be represented by a number of "point masses" connected by weightless absolutely elastic bonds.

To illustrate the dynamic action of individual masses, depending on the task, they are led to some one elastic link located on one elastic link. Due to the fact that each mechanism has both rotating and progressively moving masses, two design drive schemes are possible.

If the drive is made to some shaft of the mechanism, then the given scheme of rotational motion is applied.

For such a scheme, external loads (torques), inertial forces (moments of inertia or flywheels), elasticity of kinematic elements (coefficients of torsion stiffness), backlash or clearances are specified.

If brought to the translational moving elastic element - rope, chain, rod, then the given scheme of translational stroke is applied.

For such a scheme, external loads (starting or moving forces of the engine, brake forces, supports of motion), inertial properties (masses), elastic kinematic elements (rigidity factors), backlash (linear gaps) are specified.

Conclusions

It follows from the analysis of data of calculation schemes that if we take into account all the elements of the machine in the design scheme, then the scheme is very difficult, and the definition of dynamic loads is an intractable task. Therefore, in order to study dynamic processes in a mechanism or machine, it is advisable to use the so-called given calculation schemes that reflect the actual operation of the mechanism or machine and allow non-difficult decisions to obtain and analyze dynamic loads.

References

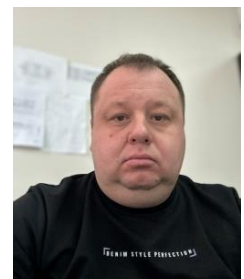
- [1] Determination of dynamic loads in the crane lifting mechanism / Volianiuk V.O., Gorbatyuk Ie.V., Terentyev A.A., Bulavka O.O. Modern engineering and innovative technologies. Issue №22. Part 1. August 2022. P. 3-14. doi:10.30890/2567-5273.2022-22-01-006
- [2] Volyanyuk V.O., Gorbatyuk Ie.V. (2021). Rozrahunok mehanizmv vantazhopidijmal'nyh mashyn [Calculation of mechanisms of lifting machines] Kyiv: KNUCA [in Ukrainian].
- [3] Volyanyuk V. Determination of inertial loads of the rotary boom of a self-propelled crane / V. Volyanyuk, D. Mishchuk, E. Gorbatyuk. Kyiv: Mining, construction, road and reclamation machines, 2020, 96. 13-21. <https://doi.org/10.3247/gbdmm2020.96.05.25> [in Ukrainian].
- [4] B. Jerman, P. Podržaj, J. Kramar. (2004). An investigation of slewing-crane dynamics during slewing motion—development and verification of a mathematical model. International Journal of Mechanical Sciences. 46 (5), 729-750. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2004.05.006>.
- [5] Volianiuk V. Michuk D., Gorbatiyk E. (2021). The inertial loads of a telescopic boom of a truck crane. Automobile transport, 49, 54-62. <https://doi.org/10.30977/AT.2019-8342.2021.0.49.01.25> [in Ukrainian].

Authors' Information

Ievgenii Gorbatyuk, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Machinery, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [ORCID ID: 0000-0002-8148-5323](https://orcid.org/0000-0002-8148-5323).



Oleg Bulavka, Ph.D. degree, Chief Mechanic, LLC «KSM-TRANS», Kyiv, Ukraine, [ORCID ID: 0000-0003-4119-174X](https://orcid.org/0000-0003-4119-174X).



МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ РОТОРА ДАР'Є, КЕРОВАНОВОГО ЗМІНАМИ ДОВЖИНИ ТРАВЕРС

Тарасов С.В., Молотков О.Н. 

Інститут транспортних систем та технологій НАН України, Україна

Анотація

Ключові слова: Вертикально-осьові турбіни, площа, що омітається, довжина траверс, стійкість системи стабілізації

В роботі побудована та проаналізована математична модель динаміки ротора вертикально-осьової вітроенергетичної установки із змінною довжиною траверс як об'єкта управління. Доведена повна динамічна подібність моделей динаміки ротора як об'єкта управління із змінною довжиною траверс і змінною довжиною лопатей. Умови стійкості алгоритмів стабілізації швидкості обертів ротора, керованого змінами довжини лопатей, розповсюджені на випадок системи стабілізації змінами довжини траверс.

Вступ

На сьогоднішній день альтернативні джерела видобутку електроенергії набули в Україні досить широкого поширення. Це значний спектр сонячних та вітрових електростанцій різної потужності. Вітрові електростанції мають суттєву перевагу по відношенню до сонячних – меншу площу для їх розміщення. Серед вітроенергетичних установок (ВЕУ) у зв'язку із низкою причин – здебільшого історичних – перевагу отримали горизонтально-осьові ВЕУ. Але вертикально-осьові ВЕУ на сьогодні мають практично рівні до горизонтально-осьових узагальнені енергетичні характеристики, а саме, – коефіцієнт швидкохідності та коефіцієнт потужності [1]. Наряду із цим вертикально-осьові ВЕУ мають низку додаткових переваг, таких як, наприклад, нечутливість до змін напрямку вітру, відносну простоту конструкції лопатей та значно менші вимоги до систем керування роботою ВЕУ [1]. Помітне зниження кількості електроенергії, що виробляється горизонтально-осьовими ВЕУ при частих змінах напрямку вітру, примушує до збільшення кількості розробок вертикально-осьових ВЕУ, зокрема ВЕУ із ротором Дар'є. В зв'язку із цим аналіз динаміки та розробка ефективних методів керування вертикально-осьовими ВЕУ із ротором Дар'є є задачею актуальною, такою що має не аби який практичний інтерес.

Актуальність досліджень

Достатньо значна складність динаміки ВЕУ потребує різних підходів для забезпечення їх працездатності. Одним із перспективних підходів до управління роботою ВЕУ є використання принципу регулювання швидкості обертів ротора шляхом зміни площі, яка омітається під час

обертів ротора [1]. Реалізація цього підходу для горизонтально-осьових ВЕУ була виконана в роботі [2]. Узагальнення та розповсюдження підходу на випадок вертикально-осьових ВЕУ проведено в роботі [3], де розроблена загальна модель динаміки ротора Дар'є ВЕУ змінної конфігурації, розглянуті переваги ротору змінної конфігурації для забезпечення ефективного функціонування ВЕУ. Продовження роботи [3] виконано в роботі [4], де сформульовано задачу роздільного аналізу каналів стабілізації швидкості обертів ротора із змінами довжини лопатей і змінами довжини траверс, запропоновані та проаналізовані алгоритми стабілізації та умови забезпечення їх стійкості в одному каналі стабілізації обертів ротора – каналі змін довжини лопатей. Чисельні моделювання динаміки системи стабілізації із змінами довжини лопатей, виконані в роботі [4], а також в роботах [5, 6], дозволили сформулювати рекомендації для обрання конструктивних параметрів ВЕУ та алгоритмів формування зворотних зв'язків. В роботі, що пропонується, розробляється модель динаміки ротора ВЕУ, керованого змінами довжини траверс як об'єкта управління, яка може бути використана при обґрунтуванні конструктивних рішень при проектуванні вертикально-осьових ВЕУ із ротором Дар'є.

Викладення основного матеріалу

Вивчимо вплив змін швидкості вітру на динаміку ротора вертикально-осьової ВЕУ, керованого шляхом зміни площі, що омітається, а саме шляхом зміни довжини траверс. Для цього отримаємо рівняння динаміки ротора у відхиленнях від стану, що встановився.

Припустимо, що обертання ротора ВЕУ попередньо приведено в стан, який встановився, наприклад, з використанням систем розгону і гальмування. У цьому стані момент рушійних сил урівноважується моментом сил опору

$$M_{вд}^o = M_r^o, \quad (1)$$

де $M_{вд}^o$, M_r^o - відповідно значення обертального моменту ротора та моментів сил опору трансмісії і генератора, що встановилися.

При зміні швидкості вітрового потоку на величину ΔV рівність (1) порушується і з'являється динамічний момент

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{вд} - M_r, \quad (2)$$

де $M_{вд}$, M_r - поточні значення обертального моменту ротора та моментів сил опору.

Будемо вважати, що

$$\begin{aligned} M_{вд} &= M_{вд}^o + \Delta M_{вд}, \\ M_r &= M_r^o + \Delta M_r, \\ \omega &= \omega_o + \Delta\omega, \end{aligned} \quad (3)$$

де $\Delta M_{вд}$, ΔM_r , $\Delta\omega$ - відхилення моментів та швидкості обертів ротора ω від значень, що встановилися.

Тоді, підставляючи вирази (3) в (2) і віднімаючи від них (1), отримуємо рівняння динаміки ротора у відхиленнях від стану, що встановився

$$J \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta M_{вд} - \Delta M_r. \quad (4)$$

Відхилення моментів сил отримаємо з використанням співвідношень [1]

$$\begin{aligned} M_{вд} &= \frac{P_{вд}}{\omega_{вд}}, \quad P_{вд} = \frac{1}{2} C_p \rho S V^3, \\ M_r &= \frac{N_r}{\omega_r}, \quad N_r = P_{вд}, \quad \eta = \eta_{мех} \eta_{эл}, \end{aligned} \quad (5)$$

де N_r - потужність генератора, η - загальний к.к.д. трансмісії і генератора, $\eta_{мех}$, $\eta_{эл}$ - к.к.д. трансмісії і генератора, відповідно.

Розкладаючи функції (5) в ряди Тейлора і залишаючи тільки перші члени ряду, при $R=const$ і $\omega_{вд} = \omega_r = \omega_o$ одержуємо

$$\Delta M_{вд} = \frac{\partial M_{вд}}{\partial P_{вд}} \left(\frac{\partial P_{вд}}{\partial V} \Delta V + \frac{\partial P_{вд}}{\partial S} \frac{\partial S}{\partial R} \Delta R \right) + \frac{\partial M_{вд}}{\partial \omega} \Delta\omega, \quad (6)$$

$$\Delta M_r = \frac{\partial M_r}{\partial N_r} \Delta N_r + \frac{\partial M_r}{\partial \omega} \Delta\omega. \quad (7)$$

Підставляючи (6) і (7) у співвідношення (4), приводячи подібні і обчисливши відповідні похідні, одержуємо

$$T \frac{d\Delta\omega}{dt} + \Delta\omega = k_1 \Delta V + k_{2r} \Delta R + k_3 \Delta N_r, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} T &= \frac{2J\omega_o^2}{C_p \rho_o S_o V_o^3 (1-\eta)}, \\ k_1 &= \frac{3\omega_o}{V_o (1-\eta)}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$k_{2r} = \frac{2H_o \omega_o}{S_o (1-\eta)},$$

$$k_3 = -\frac{2\omega_o}{C_p \rho_o S_o V_o^3 (1-\eta)},$$

де ΔR , ΔN_r - відхилення довжини траверс R та потужності генератора від значень, що встановились;

T , k_1 , k_{2r} , k_3 - відповідні числові коефіцієнти, що обчислюються за конструктивними параметрами та умовами роботи турбіни.

Співвідношення (8), (9) утворюють математичну модель динаміки ротора вертикально-осьової ВЕУ із змінною довжиною траверс як об'єкта управління. Порівнявши рівняння (8), (9) із моделлю динаміки ротора із змінною довжиною лопатей, отриманою в [4], можна зробити висновок про повну динамічну подібність моделей - моделі відрізняються лише значенням коефіцієнту k_{2r} . Це дозволяє розповсюдити всі висновки роботи [4] на системи стабілізації швидкості обертів ротора змінами довжини траверс із відповідними алгоритмами формування зворотних зв'язків. Але необхідно зазначити, що зміна довжини траверс на відміну від змін довжини лопатей призводить до змін моменту інерції ротора. Це потрібно враховувати при побудові алгоритмів формування зворотних зв'язків, або утримувати малими відхилення довжини траверс від значень, що встановлюються.

Висновки

Побудовано математична модель динаміки ротора вертикально-осьової ВЕУ із змінною довжиною траверс як об'єкта управління. Доведена повна динамічна подібність моделей динаміки ротора як об'єкта управління із змінною довжиною траверс і змінною довжиною лопатей. Умови стійкості алгоритмів стабілізації швидкості обертів ротора, керованого змінами довжини лопатей, розповсюджені на випадок системи стабілізації змінами довжини траверс. Проведені дослідження можуть бути використані при обґрунтуванні конструктивних рішень при проєктуванні вертикально-осьових ВЕУ із ротором Дар'є.

Література

- [1]. Дзензерский В. А. Ветроустановки малой мощности / В.А. Дзензерский, С.В. Тарасов, И.Ю. Костюков. – Киев: Наук. думка, 2011. – 592 с.
- [2]. Оборский Г.А., Моргун Б.А., Бундюк А.Н. Построение математической модели ветроэлектрической установки как объекта управления оборотами ротора / Г.А. Оборский, Б.А. Моргун, А.Н. Бундюк // Праці Одеського політехнічного університету. – 2013. Вип. 2(41). – С. 142-147.
- [3]. Тарасов С. В., Редчиць Д. О., Тарасов А. С., Дорош О. В. Модель динаміки ротора Дар'є змінної конфігурації. / С. В. Тарасов, Д. О. Редчиць, А. С. Тарасов, О. В. Дорош // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (ІТММ-2023), 22 березня 2023 р. Зб. наук. праць. Дніпро: Український державний університет науки і технологій. 2023. С. 208–211. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2023.01.057>.
- [4]. Тарасов С. В., Молотков О.Н. Алгоритми стабілізації швидкості обертів ротора Дар'є вітроенергетичної установки, керованого змінами довжини лопатей / С. В. Тарасов, О.Н. Молотков - Технічна механіка - 2023, № 4, с. 50 - 59. <https://doi.org/10.15407/itm2023.04.050>.
- [5]. Тарасов С.В., Молотков О.Н., Тарасов А.С., Чернявський Є.Ю. Аналіз показників якості системи стабілізації обертів ротора Дар'є ВЕУ / С. В. Тарасов, О.Н. Молотков, А.С. Тарасов, Є.Ю. Чернявський // Матеріали 14-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» (СЕУТТОО-2023) 16-18 березня 2023 р. Зб. наук. праць. – Херсон: Херсонська державна морська академія. 2023. – С. 284-286
- [6]. Тарасов С.В., Молотков О.Н. Моделювання перехідних процесів в системі стабілізації обертів ротора Дар'є вітрової турбіни / С. В. Тарасов, О.Н. Молотков // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (ІТММ-2023) 22 березня 2023 р. Зб. наук. праць. – Дніпро: Український державний університет науки і технологій. 2023. – С. 204-207. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2023.01.056>.

Відомості про авторів

Сергій Тарасов, к.т.н., доцент, с.н.с., заст. директора з науково-технічної роботи, завідувач відділом, Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна, [ORCID ID 0000-0002-9254-1503](https://orcid.org/0000-0002-9254-1503).



Олег Молотков, к.т.н., доцент, с.н.с., Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна, [ORCID ID 0000-0002-8498-1269](https://orcid.org/0000-0002-8498-1269).



ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВОДУ ПАЛИВНОГО НАСОСУ ДИЗЕЛЯ 9L21/31 ВИРОБНИЦТВА MAN B&W

Будко В.П.^{1,2}, Білоусов Є.В.^{2✉}, Дзигар А.К.², Сатулов А.І.²

¹ТОВ «Транспортний Судноплавний Менеджмент», Україна

²Херсонська державна морська академія, Україна

Анотація

Ключові слова: профіль паливного кулачка, швидкість плунжеру, паливний насос.

Дослідження динамічних характеристик робочого процесу пов'язано з вирішенням ряду проміжних задач, до яких відносяться визначення динамічних характеристик паливної апаратури дизеля. Зазвичай інформація про ці характеристики не є доступною для широкого загалу, тому виникає потреба у отриманні такої інформації шляхом прямих вимірювань з наступною обробкою отриманих даних.

Вступ

Судна проекту 17620 типу «Бут» (Hull-Mach General cargo ship) було спроектовано ВАТ «Чорноморсудопроект» та побудовано ССЗ «Океан», м. Миколаїв [1]. Всього у період 2005-2007 років було побудовано дев'ять суден даного типу з необмеженим районом плавання. Судна призначені для перевезення генеральних наволочних, насипних вантажів, а також контейнерів у трюмах та відкритих палубах.

Використання на судах даної серії в якості головного, високооборотного високофорсованого двигуна 9L21/31 виробництва MAN-B&W [2], на час побудови було достатньо нетрадиційним рішенням, особливо враховуючи, що на ринку цей двигун з'явився лише у 2002 році. На той час практично був відсутній досвід експлуатації даного класу дизелів, як в складі потужних дизель-генераторів великих контейнеровозів, для яких даний двигун створювався, так і в якості головного двигуна судна. Під час досить тривалої експлуатації було виявлено ряд проблем пов'язаних з застосуванням даного класу двигунів в якості головних.

На сьогодні два судна серії знаходяться у власності компанії Lion Shipping Grup, а їх технічне супроводження здійснює Українська компанія Транспортний Судноплавний Менеджмент, яка стикнулася з необхідністю більш детального вивчення проблеми системного передчасного виходу з ладу підшипників колінчатого валу дизелів.

Для вирішення цієї науково-технічної задачі необхідно визначитися з деякими проміжними питаннями, одним з котрих є встановлення динамічних характеристик паливної апаратури

даного двигуна. Саме цьому питанню була присвячена дана частина дослідження.

Актуальність досліджень

Оскільки динаміка руху плунжера паливного насоса напряму впливає на перебіг робочого процесу дизеля, якісна обробка початкових даних є актуальним питанням, яке потребує окремого розгляду.

Викладення основного матеріалу

Для вирішення завдань, пов'язаних з визначенням динамічних характеристик робочого процесу двигуна, необхідно знати динамічні характеристики приводу плунжера паливного насоса високого тиску, які задаються профілем приводного кулачка. У той же час, інформація про профілювання не відноситься до тієї, яку виробники включають до посібників з експлуатації та ремонту. Авторам така інформація знадобилася для вирішення науково-технічного завдання пов'язаної із встановленням причин передчасного виходу з ладу підшипників головних двигунів 9L21/31 фірми MAN, які використовуються як головні на судах проекту 17620 [3]. Найбільш доступним методом отримання такої інформації є прямий вимір ходу плунжера на зупиненому двигуні. Однак такий підхід не позбавлений недоліків, пов'язаних із великими похибками вимірювань, як методологічних, так і апаратних. Тому інформація, отримана таким чином, вимагає попередньої обробки.

На рис. 1 показана отриманий методом прямого вимірювання профіль лінії підйому плунжера (крива 1) яка не відповідає умовам монотонності, як це має бути на практиці. Особливо добре це видно по лінії похідної (крива 3).

Для практичного використання у такому вигляді ця інформація непридатна і вимагає попередньої обробки, методика якої була запропонована та використана авторами.

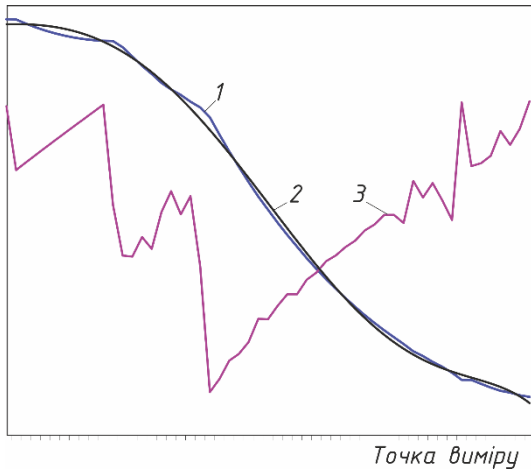


Рисунок 1. Побудова лінії підйому плунжера за результатами прямого вимірювання

На першому етапі отримана крива описується інтерполяційним поліномом (крива 2) який підбирається за критерієм максимальної відповідності даної залежності.

Далі за рівнянням полінома відбудовується нова монотонна крива, що згладжує дефекти експериментальної кривої. У цьому деякі невідповідності по краях досліджуваного ділянки не так важливі, оскільки цей етап покликаний встановити лише принципові залежності.

Похідна даної кривої дозволяє виявити закономірності побудови профілю кулачка, який, як відомо, формується з лінійних ділянок зміни швидкості на різних етапах руху плунжера (рис. 2).

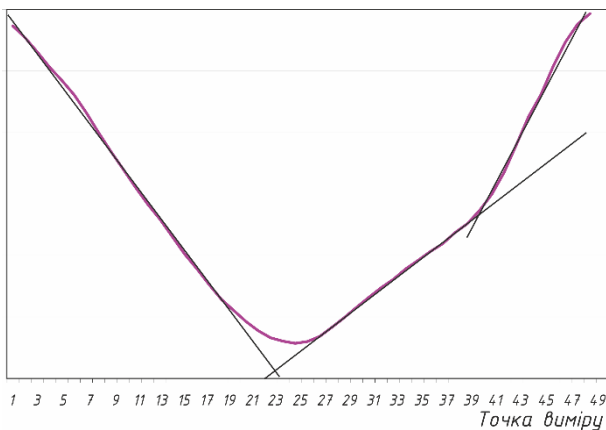


Рисунок 2. Похідна кривої, одержаної за результатами згладжування експериментальних даних

Визначивши межі кожної з ділянок зміни швидкості, формуємо набір лінійних рівнянь кожної ділянки і з них будуюмо інтегральну характеристику.

Після перебудови у формат традиційного представлення даних та відповідного масштабування отримуємо криву ходу плунжера на ділянці нагнітального ходу (рис. 3).

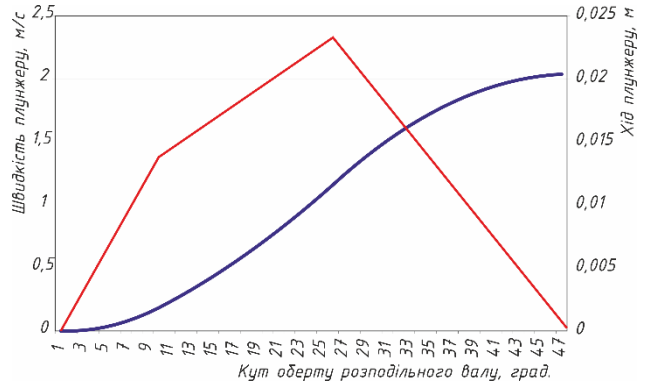


Рисунок 3. Крива зміни швидкості плунжера та отримана по ній інтегральна крива його переміщення

З рис. 3 видно, що закон зміни швидкості плунжера складається з двох ділянок швидкості на лінії прискорення і однієї ділянки на лінії уповільнення. Даний метод формування профілів паливних кулачків є традиційним для всіх двигунів фірми MAN, що добре узгоджується з отриманими результатами. Максимальна швидкість плунжера у 2,32 м/с теж відповідає прийнятним значенням, які зазвичай лежать у діапазоні 2...2,8 м/с.

В результаті запропонованого методу обробки даних прямих вимірювань була отримана монотонна функція придатна для подальшого аналізу процесів паливподачі та характеру перебігу робочого процесу двигуна.

На рис. 4 представлені профілі паливних кулачків, отримані при вимірюваннях ходу плунжера до обробки та після обробки описаним методом.

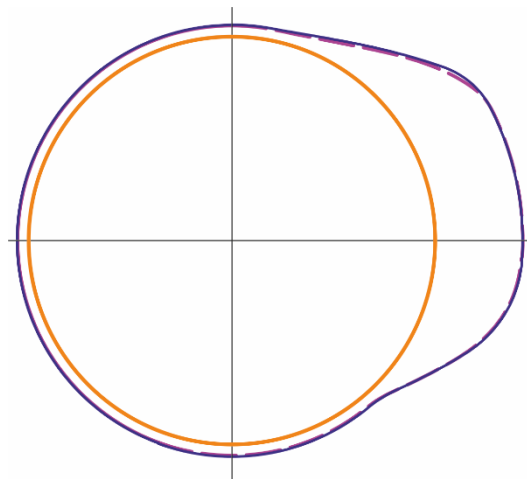


Рисунок 4. Профіль паливного кулака за результатами обробки даних прямого вимірювання

Як видно, в області підйому лінії плунжера досягається необхідний для інженерних цілей рівень відповідності.

Висновки

Запропонований авторами підхід щодо обробки даних прямих вимірювань, з застосуванням елементів теорії побудови профілів приводних кулачків паливних насосів дозволяє отримати профілі паливоподачі з достатньою для подальшого аналізу точністю.

Література

- [1]. Karewood Brave, IMO 9281516 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ships.jobmarineman.com/pl/karewood-brave-9281516/> – Дата перегляду: 05.02.2024.
- [2]. Modern Marine Internal Combustion Engines / I. Bilousov, M. Bulgakov, V. Savchuk. – Springer Series on Naval Architecture, Marine Engineering, Shipbuilding and Shipping, Springer, Cham., 2020, doi.org/10.1007/978-3-030-49749-1.
- [3]. Будко В.П., Білоусов Є.В. Аналіз відмов головних двигунів типу MAN-B&W 9L21/31 в процесі їх експлуатації на судах проекту 17620. Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції Суднова енергетика: стан та проблеми, присвяченій пам'яті професора Горбова В.М., 07-08 листопада 2023 року. – С. 35-37 р.

Відомості про авторів

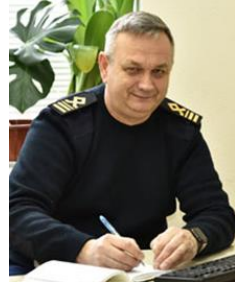
Вадим Будко, технічний директор ТОВ «Транспортний судноплавний менеджмент», аспірант кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна.



Євген Білоусов, д.т.н., професор, професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-8185-8209](#).



Анатолій Дзигар, механік I розряду, старший викладач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-5947-6263](#).



Анатолій Сатулов, механік I розряду, старший викладач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0003-2985-3755](#).



ЗАДАЧА УПРАВЛІННЯ ДИФУЗІЙНИМ НАСИЧЕННЯМ ГТН - ПОКРИТТІВ В УМОВАХ ТЕРМОЦИКЛІЧНОГО ІОННОГО АЗОТУВАННЯ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ СТЗ

Агєєв М.С.[✉], Устїнцев С.М., Дзигар А.К., Котов А.І.

Херсонська державна морська академія, Україна

Анотація

Ключові слова: відновлення, зміцнення, азотування, прискорена дифузія, експлуатаційні властивості, довговічність.

Основними недоліками відновлювальних покриттів отриманих газотермічним напиленням є пористість та недостатня твердість. Суттєво підвищити ці властивості можна за допомогою додаткової хіміко-термічної обробки, зокрема, термоциклічного іонно-плазмового азотування. В роботі проведено аналіз сучасних моделей механіки, що описують взаємопов'язані процеси силової, термічної та дифузійної природи і фізичні уявлення про вплив структурних параметрів на інтенсивність масопереносу в пористих середовищах з метою постановки задачі управління дифузійним насиченням пористих покриттів в умовах термоциклічного іонного азотування.

Вступ

Одним із завдань сучасної інженерії поверхні є забезпечення параметрів міцності та довговічності поверхневих шарів, а у випадку втрати геометричних характеристик деталей в результаті зношування, відновлення їх профілю з одночасним забезпеченням новосформованих областей поверхні необхідним комплексом експлуатаційних властивостей. При цьому запропоноване технологічне рішення має бути оптимальним не тільки з позицій максимального подовження терміну експлуатації виробу, але і з точки зору економічної доцільності витрат енергії та ресурсів.

Характерною особливістю методів поверхневого зміцнення є те, що одночасно не вдається підвищити експлуатаційні властивості деталі для всього спектру режимів роботи [1].

Усунення цього недоліку покриттів досягається при використанні багатоопераційних технологій та нанесенні багатошарових, багатофункціональних покриттів [2].

Однією з технологій, що використовується в сучасному машинобудуванні є газотермічне напилення (ГТН) покриттів [3]. Її застосування зумовлене достатньою простотою відновлення геометрії поверхонь деталей, відносно невеликою вартістю обладнання та ціни відновлення конкретного виробу [4].

Разом з тим покриття, отримані за допомогою газотермічного напилення мають ряд недоліків. До них відносять низьку міцність зчеплення з основою, високу пористість та недостатню

твердість [2, 3]. Суттєво підвищити ці властивості можна за допомогою додаткової хіміко-термічної обробки, зокрема, термоциклічного іонно-плазмового азотування.

Використання такого варіанту інтегрованих технологій дозволяє суттєво підвищити довговічність елементів конструкцій, що працюють в умовах абразивного та ерозійного зношування [3, 4].

Актуальність досліджень

Відмітимо, що при термоциклічному іонному азотуванні приповерхневих шарів, які отримані за допомогою газотермічного напилення, виникає проблема раціонального вибору режимів азотування з метою отримання покриттів із наперед заданими властивостями.

Підвищення експлуатаційних характеристик приповерхневих шарів вимагає вирішення наукової проблеми управління дифузійними процесами у приповерхневих шарах деталей судових технічних засобів (СТЗ) отриманих в результаті газотермічного напилення.

Викладення основного матеріалу

Ефект прискореної дифузії речовини, що отримав назву «аномальний масоперенос», реалізується в різних видах механіко-термічної обробки матеріалів, і на даний час використовуються для підвищення експлуатаційних властивостей поверхневих шарів деталей, які працюють в умовах контактних навантажень. Особливо чітко

процес аномального масопереносу реалізується при термоциклічному іонному азотуванні [1].

Широке впровадження даного ефекту призводить до необхідності управління цим явищем – вибором таких параметрів зовнішніх впливів, які формують покриття із заданим комплексом властивостей.

Для розв'язання даної проблеми будемо використовувати підходи термодинаміки - дифузійну теорію пружності Підстригача Я.С. та локально-нерівноважну термодинаміку Бурака Я.Й. [5, 6].

В літературі накопичено велику кількість експериментальної інформації про зміну швидкості дифузійних процесів під дією впливів на тіло полів різної природи. Ця інформація досить повно відображена в роботах [7, 8].

До факторів, які мають вплив на швидкість масоперенесення, відносять:

- температуру;
- параметри зовнішніх силових впливів;
- структурно-фазовий стан матеріалу в початковий момент часу.

При цьому швидкість деформації є одним з визначальних фактором, що змінює як рухливість атомів як основного металу, так і домішкових елементів, а залежність коефіцієнта дифузії в середовищі від швидкості деформації має вид:

$$D_M = D_0 + C|\dot{\epsilon}|^a \cdot \exp\left(\frac{\beta}{T}\right), \quad (1)$$

де D_0 - коефіцієнт дифузії у випадку відсутності деформацій;

$|\dot{\epsilon}|$ - швидкість деформацій;

a, β - константи;

T - температура.

Процес іонного азотування включає в себе наступні етапи [4]:

1. Підведення азоту з відповідного середовища до поверхні деталі.

2. Утворення приграничного шару біля поверхні деталі, де на міжфазній межі середовище-метал відбувається дисоціація азотовмісного середовища і адсорбція поверхнею атомів азоту.

3. Проникнення атомів азоту через поверхню в матеріал деталі.

4. Дифузія атомів азоту у поверхневий шар по границях зерен і через зерна.

При цьому керуючими параметрами є: 1) температура насичення; 2) тиск газу; 3) склад газу; 4) час повної обробки; 5) форма і часова інтенсивність енерговведення [2].

Якщо параметри (1)-(4) є досить важливим з позиції отримання покриттів із заданим рівнем властивостей, то остання характеристика визначає можливість прискорення дифузійних процесів і, як результат, формування поверхневих шарів деталей з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Для врахування форм і часових особливостей зовнішнього введення енергії в рамках описаних вище емпіричних співвідношень розглянемо векторну величину – потік введення енергії, який описується співвідношенням:

$$\vec{j}_E(s, \tau) = -\left(\frac{\partial^2 E}{\partial v \partial \tau}\right) \vec{n}(s), \quad (2)$$

де $\vec{j}_E(s, \tau)$ - вектор потоку введення енергії у точці поверхні s ;

$\vec{n}(s)$ - зовнішня одинична нормаль до поверхні в точці s ;

$\left(\frac{\partial^2 E}{\partial v \partial \tau}\right)$ - змішана похідна від введення енергії за часом і по нормалі до поверхні.

При побудові співвідношення (2) використовувалися апріорні припущення про те, що границю тіла є гладка поверхня, в кожній точці якої можливо побудувати одиничну нормаль і знайти похідну по поверхні в будь-якій розглянутий проміжок часу.

Представимо $\vec{j}_E(s, \tau)$ у вигляді:

$$\vec{j}_E(s, \tau) = -|j_E^1(s)| \times |j_E^2(\tau)| \times \vec{n}(s), \quad (3)$$

де $j_E^1(s)$ - складова потоку, що відповідає за форму введення енергії;

$j_E^2(\tau)$ - складова потоку, що відповідає за часове проходження введення енергії.

Згідно робіт з локально-нерівноважної термодинаміки [5, 6], запишемо:

$$j_E^2(\tau) = j_E^2(\tau = \tau_0) + \frac{\partial j_E^2(\tau)}{\partial \tau} \Big|_{\tau=\tau_0} \tau + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 j_E^2}{\partial \tau^2} \Big|_{\tau=\tau_0} \tau^2 \quad (4)$$

$$\tau^2 = \Pi_1 + \Pi_{2\tau} + \Pi_{3\tau^2},$$

де $\Pi_1 = j_E^2(\tau = \tau_0)$ - величина часової складової енергетичного потоку у початковий момент часу;

$\Pi_2 = \frac{\partial j_E^2(\tau)}{\partial \tau} \Big|_{\tau=\tau_0}$ - величина швидкісної часової

складової енергетичного потоку в початковий момент часу;

$$\Pi_3 = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 j_E^2}{\partial \tau^2} \Big|_{\tau=\tau_0}$$

- величина прискорення часо-вої складової енергетичного потоку в початковий момент часу.

Представлення величини $j_E^1(s)$ залежить від апріорних передумов про геометричні параметри області введення енергії.

При проходженні дифузійних процесів у пористих середовищах коефіцієнт дифузії суттєво залежить від структури середовища [11, 12], яке в загальному випадку може задаватись довільною кількістю змінних.

В цьому зв'язку, із врахуванням співвідношень (1) – (4), представимо коефіцієнт дифузії пористих покриттів, який залежить як від параметрів зовнішніх енергетичних впливів, так і від характеристик пористості напиленого покриття:

$$D_0 = D_M \left(\left\{ \Pi_k^i \right\}_{i=1, \dots, k=1, \dots}; \left\{ \theta_j \right\}_{j=1, \dots} \right), \quad (5)$$

де D_M - коефіцієнт масопереносу;

Π_k^i - параметри енергетичних впливів під час технологічної модифікації;

θ_j - змінні, що описують пористість структури покриття;

i, j, k - біжучі індекси.

Вибір параметрів Π_k^i залежить від рівня конкретизації задачі опису енергетичних впливів (врахування силових, термічних та інших видів навантаження), задання змінних θ_j проводиться з врахуванням необхідного рівня деталізації пористої структури поверхні. В припущенні про ізотропію пористої структури величини θ_j приймають як змінні скалярної природи.

Оскільки в загальному випадку встановлення залежностей типу (5) на даний момент є відкритою проблемою, запропонуємо наступне подання коефіцієнту масопереносу у виді лінійного адитивного розкладу у ряд по основним змінним:

$$D_M = \sum_{i,k} C_{i,k} \Pi_k^i + \sum_j A_j \theta_j \quad (6)$$

де $C_{i,k}, A_j$ - емпіричні коефіцієнти.

Відмітимо, що задання коефіцієнту масопереносу у виді (2) знаходиться у відповідальності із сучасними роботами із дослідження фізичних особливостей дифузії в умовах високоінтенсивних енергетичних впливів [9].

При постановці задачі управління дифузійним насиченням приповерхневих шарів важливим є вибір критерію (функціоналу), згідно якого буде проводитись встановлення оптимального розв'язку.

В даній роботі в якості критерію оптимальності пропонується величина (глибина) насиченого шару, отриманого в результаті технологічної модифікації:

$$L \rightarrow \max \quad (7)$$

З врахуванням залежності функціоналу (7) від параметрів пористості конструкції та зовнішніх енергетичних впливів

$$L = L \left(\left\{ \Pi_k^i \right\}_{i=1, \dots, k=1, \dots}; \left\{ \theta_j \right\}_{j=1, \dots} \right), \quad (8)$$

задача управління дифузійним насиченням приповерхневих шарів в умовах термоциклічного іонного азотування має вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Pi_k^i - ? \\ L = L \left(\left\{ \Pi_k^i \right\}_{i=1, \dots, k=1, \dots}; \left\{ \theta_j \right\}_{j=1, \dots} \right) \end{array} \right. \rightarrow \max. \quad (9)$$

Розв'язання задачі (9) можна проводити за допомогою розкладу функціоналу (8) в системі базисних функцій $\{\Pi_k^i\}$ за допомогою методу зв'язаних неув'язок - методу Гальоркіна, або за допомогою чисельних наближень з використанням методу градієнтного спуску, на основі модельних уявлень роботи [5], або розширених уявлень, які описані в праці [6].

Висновки

Підвищення функціональних властивостей пористих покриттів вимагає вирішення наукової проблеми управління дифузійними процесами у приповерхневих шарах деталей отриманих в результаті газотермічного напилення.

Представлений аналіз сучасних моделей механіки, що описують взаємопов'язані процеси силової, термічної та дифузійної природи і фізичні уявлення про вплив структурних параметрів на інтенсивність масопереносу в пористих середовищах.

На основі проведеного аналізу запропонована постановка задачі управління дифузійним насиченням пористих покриттів в умовах термоциклічного іонного азотування.

Література

[1]. Агеев М.С., Головащук М.В. Підвищення експлуатаційних властивостей деталей засобів транспорту шляхом керування факторами

процесу електродугового напилення багатофункціональних покриттів Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету». Технічні науки. 2019 № 3(273). С. 240–248. doi 10.31891/2307–5732.

[2]. Агеев М.С., Білоцерківський М.А., Лопата В.М. Використання структурних аномалій в сталевих газотермічних покриттях при підвищенні зносостійкості засобів транспорту. Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету». Технічні науки. 2020. № 4. Том 1(287). С. 257–262. doi:10.31891/2307–5732.

[3]. Агеев М.С., Головащук М.В. Підвищення експлуатаційних властивостей деталей засобів транспорту шляхом керування факторами процесу електродугового напилення багатофункціональних покриттів Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету». Технічні науки. 2019 № 3(273). С. 240–248. doi: 10.31891/2307–5732.

[4]. Ageev M.S., Lopata L., Smirnova T. Of combined electric arc coatings. International Scientific Journal Problems of Tribology. 2019. Vol. 24, № 3/93. P. 51–61. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-93-3-51-61>.

[5]. Бурак Я.Й. Визначальні співвідношення локально-градієнтної термомеханіки / Я.Й. Бурак // Доп. АН УРСР. Сер. А. – 1987. – № 12. - С. 19-23.

[6]. Герцрікен Д.С., Мазанко В.Ф., Фільченко В.М. Імпульсна обробка та масоперенесення в металах за низьких температур. К.: Наукова думка, 1991. - 208 с.

[7]. Агеев М.С., Устінцев С.М. Особливості формування газотермічних покриттів у разі відновлення робочих поверхонь деталей суднових технічних засобів. Розвиток транспорту : науковий журнал. 2023. № 3 (18). С. 76–84. DOI: 10.33082/td.2023.3-18.06.

[8]. Агеев М.С., Рудковський А.В., Грищенко О.П. Відновлення деталей засобів транспорту комбінованим методом нанесення багатофункціональних покриттів. Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету». Технічні науки. 2020. № 3(285). С. 268–277. DOI: 10.31891/2307-5732.

[9] Підстригач Я.С., Повстенко Ю.З. Введення в механіку поверхневих явищ у твердих тілах, що деформуються. – К.: Наукова думка, 1985. 200 с.

Відомості про авторів

Максим Агеев, д.т.н., доцент, професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-5691-8986](https://orcid.org/0000-0001-5691-8986).



Сергій Устінцев, аспірант кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-4352-9579](https://orcid.org/0000-0002-4352-9579).



Анатолій Дзигар, механік I розряду, старший викладач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-5947-6263](https://orcid.org/0000-0001-5947-6263).



Анатолій Котов, механік I розряду, старший викладач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-7648-023X](https://orcid.org/0000-0001-7648-023X).



ВИЗНАЧЕННЯ ФОРМ КОЛИВАНЬ ОБОЛОНКОВИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ГОЛОГРАФІЧНОЇ СПЕКЛІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

Ткач М.Р., Золотий Ю.Г., Галинкін Ю.М.[✉], Монахов А.А.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

Анотація

Ключові слова: власні коливання, частота, форма коливань, спеклінтерферометрія.

В роботі наведено результати експериментального дослідження циліндричного оболонкової деталі діаметром 105 мм, висотою 86 мм, товщиною стінки 2,4 мм в боковій поверхні якого наявний отвір діаметром 21,5 мм, відстань між віссю бокового отвору та верхньої поверхні 34 мм. Для визначення власних форм коливань та відповідних їм частот використано метод спеклінтерферометрії реального часу. що у діапазоні 1-6100 кГц отримано 8 форм коливань, та відповідні частоти виникнення цих коливань. Встановлено що 5 належать до осьових (дихаючих) форм, 3 до радіальних (згинних).

Вступ

Власні коливання деталей характеризуються різким збільшенням амплітуди при збудженні їх певним дискретним значенням частоти. Значення частоти залежить від механічних властивостей матеріалу та геометричної форми конкретного виробу. Визначення частот та форм коливань є невід'ємною частиною проектування, оскільки дозволяє запобігти небезпечним режимів роботи деталі, виявити слабкі зони поверхні та прогнозувати надійність в умовах динамічних навантажень.

Актуальність досліджень

Деталі оболонкового типу широко розповсюджені в сучасній промисловості, з певним наближенням до таких деталей можна віднести поршні, палі, валопроводи, корпуси підводних апаратів і багато різних виробів. Не дивлячись на те, що форми коливань та частоти їх виникнення деталей відносно простої геометричної форми, як стрижень, диск, циліндр, описані емпіричними рівняннями, визначення форм коливань більш складних конструкції потребують використання сучасних методів. Про актуальність даного напрямку досліджень говорить велика кількість робіт, до яких можна віднести [1, 2, 3].

Викладення основного матеріалу

Одним з сучасних експериментальних методів визначення власних частот і форм коливань є метод спеклінтерферометрії. Цей метод полягає в опроміненні досліджуваного об'єкта когерентним опроміненням, попередньо розділеним на два потоки. Перший направляють повз об'єкт на

матрицю сприймаючої відеокамери – предметний світловий пучок, другим опромінують досліджуваний об'єкт – об'єктний пучок, при цьому другий пучок відбивається від досліджуваного об'єкта та теж потрапляє на матрицю сприймаючої відеокамери. При відсутності зміщень поверхні досліджуваного об'єкта у напрямку осі пучка опромінення, накладання пучків відбувається в паралельних фазах, тобто фактично сумарне складене опромінення рівномірно посилюється, або, якщо предметний промінь проходить через шерстку напівпрозору (матову) поверхню, відбувається рівномірне мерехтіння спеклів. При збудженні досліджуваного об'єкта п'єзокерамічним елементом та виникненні зміщень поверхні такого об'єкта у паралельному до осі опромінення напрямку, частина віддзеркаленого об'єктного пучка (ряд дискретних спеклів) поєднується з предметним у протифазі, викликаючи затемнення окремих спеклів. Як наслідок, в зображенні досліджуваного об'єкта виникають темні та світлі зони, що характеризуються певною кратністю, при цьому світлі зони показують області відсутності переміщень, або зони переміщень, кратні довжині цілої хвилі когерентного опромінення (у нашому випадку 632 нм). Темні зони (набір затемнених спеклів) показують зони зміщення на половину періоду хвилі когерентного опромінення, або кратну половині періоду величину. Таким чином, метод спеклінтерферометрії дозволяє з високою чутливістю фіксувати низькоамплітудні (близько 166 нм) зони зміщення поверхні досліджуваного об'єкта при збудженні коливань у ньому в широкому діапазоні частот збудження. Відеокамера, сприймаюча накладене опромінення двох пучків, під'єднана до системного блоку та дозволяє працювати в режимі реального часу, її використання супроводжується

авторським спеціалізованим програмним забезпеченням, розробленим у Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова, дозволяє фіксувати кожне зображення з підвищеною контрастністю, створювати фото та відеоряд для подальшої обробки. Результати

дослідження циліндричного виробу діаметром 105 мм, висотою 86 мм, товщиною стінки 2,4 мм наведено на рисунку 1. В боковій поверхні досліджуваного виробу просвердлено отвір діаметром 21,5 мм, відстань між віссю бокового отвору та верхньої поверхня 34 мм.

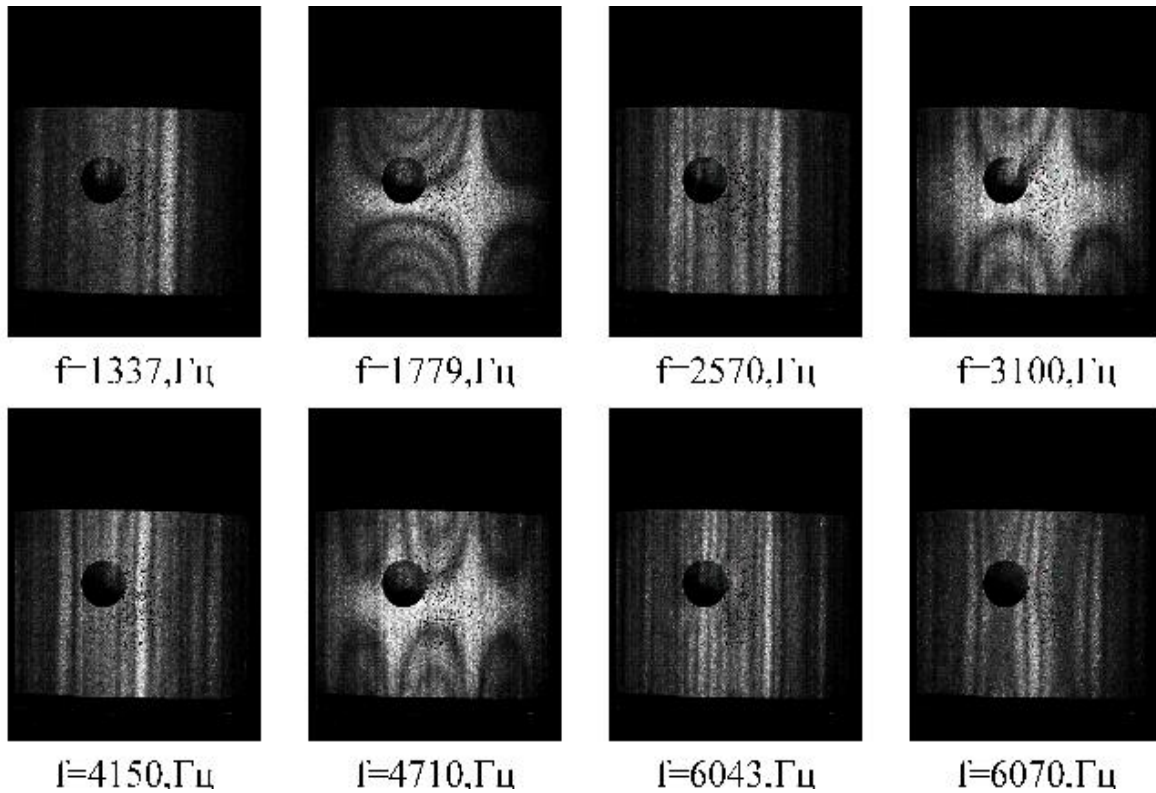


Рисунок 1. Форми власних коливань та відповідні їм частоти

З рисунку видно, що у діапазоні 1-6,1 кГц отримано 8 форм коливань, та відповідні частоти виникнення цих коливань. Встановлено що 5 належать до осевих (дишаючих) форм, 3 до радіальних (згинних).

Висновки

Встановлено ряд форм власних коливань та частоти їх виникнення. Отримані результати можуть бути використані у верифікації математичних моделей, визначенні параметрів міцності в умовах динамічних навантажень, виявленні слабких зон виробу.

Експериментальних дослідження дозволяють отримати ряд частот та форм коливань, що характерні безпосередньо для виробу, та врахувати такі особливості як неізотропність матеріалу та відхилення геометричних форм.

Література

[1]. Yao Shi, Xingfu Gao, Guang Pan. Experimental and numerical investigation of the frequency-domain characteristics of impact load for AUV during water entry. *Ocean Engineering*.

2020. Volume 202. 107203. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107203>

[2]. Tkach M., Morhun S., Zolotoy Y., Zhuk I. Modal analysis of the axial compressor blade: advanced time-dependent electronic interferometry and finite element method. *International Journal of Turbo & Jet-Engines*, vol. 39, no. 4, 2022, pp. 589-597. <https://doi.org/10.1515/tij-2020-0014>

[3]. Золотий Ю., Сипко В., Жук І. Дослідження квазістатичних деформаційних твердих тіл методом голографічної інтерферометрії у реальному часі. *Технічні вісті*. 2007. №1. – С. 88-89.

Відомості про авторів

Михайло Ткач, д.т.н., професор, завідувач кафедри ІМ та ТМ, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, [ORCID ID: 0000-0003-4944-7113](https://orcid.org/0000-0003-4944-7113).



Юрій Золотий, завідувач лабораторії кафедри ІМ та ТМ, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-6292-6624](#).



Юрій Галинкін, к.т.н., доцент кафедри ІМ та ТМ, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-5272-4156](#).



Андрій Монахов, аспірант кафедри ІМ та ТМ, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.



ВДОСКОНАЛЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ДИНАМІЧНОЇ ЯКОСТІ ПЕРЕНАЛАГОДЖУВАНИХ ВЕРСТАТНИХ ПРИСТОСУВАНЬ

Поліщук В.А. [✉], Ніколаєв О.Л.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

Анотація

Ключові слова: переналагоджувана технологічна оснастка; динамічні похибки; вібрація; жорсткість конструкції; точність обробки

В роботі виконано аналіз системи показників динамічної якості переналагоджуваних верстатних пристосувань та розглянуто можливості покращення їх експлуатаційних характеристик шляхом технологічного забезпечення показників жорсткості та вібростійкості їх конструкцій. Розглянуто зміни затискної здатності пристосування під впливом вібрацій в умовах обробки.

Вступ

Динамічні характеристики верстатних пристосувань, що є складовою частиною пружної технологічної системи, впливають на її динамічні якості та на досягнення заданої точності механічної обробки. Цей вплив проявляється при близькості власних частот елементів пристосування і елементів головного контуру зв'язку динаміки технологічної системи через вплив парціальних коливальних контурів.

У той же час пристосування мають автономність, тобто одне і те ж пристосування може бути встановлено на різних верстатах. Тому вважаємо доцільним ввести єдину систему показників динамічної якості пристосувань. Враховуючи автономність пристосувань, вважаємо, що вони повинні мати специфічні, характерні тільки для них динамічні показники, а саме: жорсткість, приведена до положення закріпленої заготовки; точність (здатність забезпечувати і зберігати задане положення заготовки в процесі обробки); стійкість пружної системи пристосування при змінних навантаженнях з певним розмахом коливань сил різання в процесі обробки.

Актуальність досліджень

Одним з основних показників якості для універсально-складаних пристосувань (УСП), який впливає на точність роботи, вібростійкість, надійність, є жорсткість. З огляду на велику кількість стиків і спряжень в конструкціях УСП, врахування впливу жорсткості на їх експлуатаційні властивості є необхідним і обов'язковим. Несталість зусиль різання та змінність жорсткості верстатних пристосувань й інших елементів технологічної системи зумовлюють виникнення вібрацій, які підвищують шорсткість оброблюваної поверхні, погіршують умови роботи ріжучого інструмента та посилюють динамічний характер

сили різання. Тому вібростійкість – одна з найважливіших експлуатаційних властивостей пристосування при обробці точних деталей, що визначає його динаміку. Динамічні параметри пристосування можуть суттєво змінювати параметри всієї технологічної системи і, головним чином, впливати на положення заготовки в просторі, що прямо пов'язано з точністю і якістю обробки. Тому дослідження експлуатаційних параметрів переналагоджуваних пристосувань, пов'язаних з жорсткістю та вібростійкістю їх конструкцій, є актуальною науково-технічною задачею.

Викладення основного матеріалу

Метою роботи є аналіз системи показників динамічної якості та покращення експлуатаційних характеристик УСП шляхом технологічного забезпечення показників жорсткості та вібростійкості конструкцій пристосувань. Об'єкт дослідження – комплекс УСП для закріплення заготовки; статична та динамічна точність при експлуатації переналагоджуваної оснастки. Предмет дослідження – твердотільні 3D-моделі конструкцій УСП, їх параметри жорсткості та вібростійкості; затискна здатність верстатного пристосування.

Статистичні дані по відмовам пристосувань, які на сьогодні є основним джерелом інформації для висновків щодо надійності, зібрати складно. Тому не статистичні дані, а розрахунок, моделювання і прогнозування можливих змін параметрів пристосування в очікуваних умовах експлуатації, технологічне забезпечення заданих показників якості, зокрема жорсткості і вібростійкості, є основою для управління надійністю пристосування і забезпечення її необхідного рівня.

Питання коливань технологічної системи при накладенні зовнішніх збурень при різанні є одним з найважливіших для розрахунків точності

та продуктивності обробки і разом з тим дотепер не до кінця вирішеним. Незважаючи на те, що розроблено фундаментальні теорії оцінки вібростійкості верстатів, конструктори зазнають значних труднощів при розрахунках динамічних параметрів верстатних пристосувань. Вважаючи їх другорядними елементами технологічної системи, дослідники мало приділяли їм уваги, чим пояснюється майже повна відсутність теоретичних і прикладних робіт в цій області.

На підставі виробничих спостережень і даних досліджень [1] до динамічних похибок пристосувань слід віднести наступні: $\varepsilon_H(t)$ – похибки зносу базових елементів, що змінюють положення заготовок у часі; $\varepsilon_T(t)$ – похибки пристосування, викликані температурними деформаціями; $\varepsilon_{\text{кол}}$ – похибки, обумовлені коливаннями технологічної системи і визначаються власними динамічними характеристиками пристосувань: масами, пружностями і демпфуючими властивостями. Тому коливання, в свою чергу, викликають похибки від інерційних сил ($\varepsilon_{\text{ин}}$), похибки демпфування в стиках ($\varepsilon_{\text{дем}}$), похибки, викликані пластичними деформаціями в стиках пристосування під дією нормальних вібрацій при різанні ($\varepsilon_{\text{инN}}$), похибки, викликані тією ж природою, але коливаннями, дотичними до площини контакту ($\varepsilon_{\text{инт}}$). Методику розрахунку похибок $\varepsilon_{\text{инN}}$ і $\varepsilon_{\text{инт}}$ викладено у [2].

В роботі вирішувались наступні задачі: розробка технологічного процесу механічної обробки деталей; комплексне оснащення розробленого технологічного процесу із застосуванням системи УСП; твердотільне 3D-моделювання конструкцій УСП; визначення напружень і деформацій, що виникають під дією зусиль різання, у спроектованих конструкціях УСП шляхом дослідження 3D-моделей оснастки за допомогою CAE-систем; корегування конструкцій пристосувань з метою підвищення жорсткості; визначення частот власних коливань системи пристосування-деталь за допомогою CAE-системи; корегування конструкцій пристосувань або режимів різання для підвищення вібростійкості системи та зменшення впливу вібрацій від зусиль різання.

Як окрему експлуатаційну властивість було розглянуто затискну здатність пристосування, яка характеризується особливостями затискних механізмів і полягає в надійному закріпленні, що попереджує вібрацію і зсув заготовки при обробці. При цьому для достовірної оцінки величини зусиль закріплення враховувалися зміни характеристик тертя в умовах обробки під впливом вібрацій.

Висновки

Підводячи підсумки огляду динамічних складових похибки установки, слід зазначити, що більшість з них піддаються точному математичному розрахунку, що дає можливість створення математичної моделі і дозволяє розробити розрахункові програми для вирішення задач автоматизації розрахунків точності верстатних пристосувань.

В результаті досліджень були також запропоновані аналітичні залежності для визначення значень ефективного коефіцієнта тертя при коливаннях для опорних елементів пристосувань (порівняно зі статичним коефіцієнтом тертя). Використовуючи ці залежності конструктор-проектувальник верстатних пристосувань може вводити в розрахунки зусиль затиску заготовки ефективні коефіцієнти тертя, що дозволяє передбачати вплив коливань в технологічній системі.

Література

[1]. Поліщук В.А., Вижул Н.В., Григорович М.В. Дослідження динаміки універсально-складаних верстатних пристосувань, *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: VIII міжнародна науково-технічна конференція*. Миколаїв: НУК, 2017. С. 62.

[2]. Поліщук В.А., Ніколаєв О.Л. Дослідження впливу динамічних похибок верстатних пристосувань на точність механічної обробки деталей. *Актуальні проблеми інженерної механіки та технології машинобудування: Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції*. – Миколаїв: НУК, 2022. С. 42-45.

<http://eir.nuos.edu.ua/handle/123456789/6442>

Відомості про авторів

Віталій Поліщук, к.т.н., доцент кафедри інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, [ORCID ID: 0000-0003-0320-4327](https://orcid.org/0000-0003-0320-4327).



Олександр Ніколаєв, к.т.н., доцент кафедри інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.



ДИНАМІКА ТРИШАРОВИХ ОБОЛОНКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Майбородіна Н.В. [✉], Герасименко В.П.

ВП НУБіП України «Ніжинський агротехнічний інститут», Україна

Анотація

Ключові слова: вимушені коливання, тришарові оболонки, нестационарне навантаження, різницеві схеми, напружено-деформований стан, прогин.

Метою роботи є розв'язання задачі про вимушені коливання тришарових еліпсоїдальних оболонок при дії нестационарного розподіленого навантаження. При побудові математичної моделі тришарових оболонок використовувалася теорія кінематичних та статистичних гіпотез для пакету шарів еліпсоїдальної оболонки. Для розв'язання поставленої задачі було використано чисельний алгоритм, заснований на застосуванні інтегро-інтерполяційного методу побудови різницевих схем по просторовим координатам, і явна скінчено-різницева схеми по часовій координаті. Наведено чисельні результати розв'язаної динамічної задачі.

Вступ

Деталі суднових систем та конструкцій в процесі експлуатації піддаються дії нестационарних навантажень. Тому для багатьох конструкцій потрібно розробляти методи оцінки їх динамічної поведінки, пружності та працездатності.

Дослідження вільних та вимушених коливань пружних елементів відіграє важливу роль у динаміці деформованих систем, особливо у динаміці оболонок та оболонкових конструкцій.

Прогнозування на стадії проектування міцності та довговічності деталей ґрунтується на інформації про криві прогину в оболонках. Рівняння коливань неоднорідної по товщині оболонки для опису кривих прогину відкриває перспективу створення обґрунтованої методики розрахунку на міцність при впливі нестационарних навантажень.

Актуальність досліджень

На сьогоднішній день в основному досліджено осесиметричні та неосесиметричні гармонічні коливання одношарових оболонок простої геометрії (циліндричні, конічні та сферичні оболонки) [2]. Результати досліджень вимушених коливань одношарових оболонок під імпульсними навантаженнями представлені в роботах [1, 3, 9]. Сучасні вчені все більше приділяють увагу в своїх дослідженнях багатошаровим оболонкам простої геометрії (циліндричні, конічні та сферичні оболонки) [4, 7, 8, 13 – 15]. Практично відсутні дослідження щодо динамічної поведінки багатошарових оболонок більш складної форми. У цьому напрямку можна виокремити роботи [5, 6, 10 – 12], у яких розглянуті вимушені коливання оболонок обертання, зокрема еліпсоїдальних

багатошарових оболонок. Складність розв'язання задач для оболонок складної форми аналітичними методами приводить до необхідності застосування різноманітних чисельних методів.

Викладення основного матеріалу

Розглядається еліпсоїдальна оболонка, геометрія серединної поверхні якої, задається наступними співвідношеннями [11]

$$x = R \sin \alpha_1 \sin \alpha_2;$$

$$y = R \sin \alpha_1 \cos \alpha_2;$$

$$z = kR \cos \alpha_1;$$

де параметри α_1 , α_2 являють собою гаусові криволінійні координати на поверхні оболонки, причому координата α_1 відповідають меридіальному напрямку, а α_2 – окружному напрямку;

$k = b/a$ – параметр еліптичності;

a, b – півосі еліпса.

Вирази для компонент метрики і форми серединної поверхні оболонки мають вигляд

$$a_{11} = R^2 (\cos^2 \alpha_1 + k^2 \sin^2 \alpha_1);$$

$$a_{22} = R^2 \sin^2 \alpha_1; \quad (1.1)$$

$$b_{11} = kR (\cos^2 \alpha_1 + k^2 \sin^2 \alpha_1)^{-1/2};$$

$$b_{22} = kR \sin^2 \alpha_1 (\cos^2 \alpha_1 + k^2 \sin^2 \alpha_1)^{-1/2}.$$

Відповідно до формул (1.1) коефіцієнти першої квадратичної форми і кривизни серединної поверхні еліпсоїдальної оболонки мають наступний вигляд:

$$A_1 = a(\cos^2 \alpha_1 + k^2 \sin^2 \alpha_1)^{1/2};$$

$$A_2 = a \sin \alpha_1;$$

$$k_1 = -\frac{b}{a^2}(\cos^2 \alpha_1 + k^2 \sin^2 \alpha_1)^{-3/2};$$

$$k_2 = -\frac{b}{a^2}(\cos^2 \alpha_1 + k^2 \sin^2 \alpha_1)^{-1/2}.$$

Як математична модель процесів вимушених коливань тришарової еліпсоїдальної оболонки, розглянута гіперболічна система нелінійних диференціальних рівнянь теорії оболонок типу Тимошенка. Приймається, що закон зміни переміщень по товщині еліпсоїдальної оболонки в системі координат (s_1, s_2, z) має вигляд

$$u_1^z(s_1, s_2, z) = u_1(s_1, s_2) + z\phi_1(s_1, s_2); \quad (1.4)$$

$$u_2^z(s_1, s_2, z) = u_2(s_1, s_2) + z\phi_2(s_1, s_2);$$

$$u_3^z(s_1, s_2, z) = u_3(s_1, s_2),$$

де $u_1, u_2, u_3, \phi_1, \phi_2$ – компоненти узагальненого вектору переміщень оболонки; $s_1 = \alpha_1 A_1$, $s_2 = \alpha_2 A_2$.

Напружено-деформований стан пружної структури описується з використанням геометрично нелінійного варіанту теорії оболонок в квадратичному наближенні [11]. При цьому деформаційні співвідношення для тришарової оболонки приймаються у вигляді:

$$\varepsilon_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial s_1} + k_1 u_3 + \frac{1}{2} \theta_1^2; \quad (1.3) \quad \text{де}$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{\partial u_2}{\partial s_2} + \frac{1}{A_2} \frac{\partial A_2}{\partial s_1} u_1 + k_2 u_3 + \frac{1}{2} \theta_2^2;$$

$$\varepsilon_{12} = \omega + \theta_1 \theta_2; \quad \varepsilon_{13} = \phi_1 + \theta_1;$$

$$\varepsilon_{23} = \phi_2 + \theta_2;$$

$$\omega = \omega_1 + \omega_2; \quad \omega_1 = \frac{\partial u_2}{\partial s_1};$$

$$\omega_2 = \frac{\partial u_1}{\partial s_2} - \frac{1}{A_2} \frac{\partial A_2}{\partial s_1} u_2; \quad \theta_1 = \frac{\partial u_3}{\partial s_1} - k_1 u_1;$$

$$\theta_2 = \frac{\partial u_3}{\partial s_2} - k_2 u_2; \quad \chi_{11} = \frac{\partial \phi_1}{\partial s_1};$$

$$\chi_{22} = \frac{\partial \phi_2}{\partial s_2} + \frac{1}{A_2} \frac{\partial A_2}{\partial s_1} \phi_1;$$

$$\chi_{12} = \tau_1 + \tau_2 + \kappa_1 \omega_1 + \kappa_2 \omega_2; \quad \tau_1 = \frac{\partial \phi_2}{\partial s_1};$$

$$\tau_2 = \frac{\partial \phi_1}{\partial s_2} - \frac{1}{A_2} \frac{\partial A_2}{\partial s_1} \phi_2.$$

Величини зусиль і моментів виражаються через величини деформацій

$$T_{11} = B_{11} \varepsilon_{11} + B_{12} \varepsilon_{22} + B_{13} \chi_{11} + B_{14} \chi_{22}; \quad (1.2)$$

$$T_{12} = S + k_2 H;$$

$$T_{22} = B_{21} \varepsilon_{11} + B_{22} \varepsilon_{22} + B_{23} \chi_{11} + B_{24} \chi_{22};$$

$$T_{21} = S + k_1 H;$$

$$T_{13} = \tilde{B}_{13} \varepsilon_{13}; \quad T_{23} = \tilde{B}_{23} \varepsilon_{23};$$

$$H = D_s \chi_{12}; \quad S = B_s \varepsilon_{12};$$

$$\bar{T}_{13} = T_{13} + T_{11} \theta_1 + S \theta_2;$$

$$\bar{T}_{23} = T_{23} + T_{22} \theta_2 + S \theta_1;$$

$$M_{11} = D_{11} \chi_{11} + D_{12} \chi_{22} + D_{13} \varepsilon_{11} + D_{14} \varepsilon_{22};$$

$$M_{22} = D_{21} \chi_{11} + D_{22} \chi_{22} + D_{23} \varepsilon_{11} + D_{24} \varepsilon_{22};$$

$$M_{12} = M_{21} = H;$$

$$B_{11} = \sum_{i=1}^I \frac{E_1^i h_i}{1 - \nu_{12}^i \nu_{21}^i}; \quad B_{12} = \sum_{i=1}^I \frac{E_1^i \nu_{21}^i h_i}{1 - \nu_{12}^i \nu_{21}^i};$$

$$B_{21} = \sum_{i=1}^I \frac{E_2^i \nu_{12}^i h_i}{1 - \nu_{12}^i \nu_{21}^i}; \quad B_{22} = \sum_{i=1}^I \frac{E_2^i h_i}{1 - \nu_{12}^i \nu_{21}^i};$$

$$B_s = \sum_{i=1}^I G_{12}^i \cdot h_i; \quad \tilde{B}_{13} = \sum_{i=1}^I G_{13}^i h_i;$$

$$\tilde{B}_{23} = \sum_{i=1}^I G_{23}^i h_i; \quad B_{23} = \sum_{i=1}^I \frac{E_2^i \nu_{12}^i}{1 - \nu_{12}^i \nu_{21}^i} \cdot \frac{(z_{i+1}^2 - z_i^2)}{2};$$

$$B_{13} = \sum_{i=1}^I \frac{E_1^i}{1 - \nu_{12}^i \nu_{21}^i} \cdot \frac{(z_{i+1}^2 - z_i^2)}{2};$$

$$B_{14} = \sum_{i=1}^I \frac{E_1^i \nu_{21}^i}{1 - \nu_{12}^i \nu_{21}^i} \cdot \frac{(z_{i+1}^2 - z_i^2)}{2};$$

$$B_{24} = \sum_{i=1}^I \frac{E_2^i}{1 - \nu_{12}^i \nu_{21}^i} \cdot \frac{(z_{i+1}^2 - z_i^2)}{2};$$

$$D_{11} = \sum_{i=1}^I \frac{E_1^i}{12(1 - \nu_{12}^i \nu_{21}^i)} \cdot \frac{(z_{i+1}^3 - z_i^3)}{3};$$

$$D_{22} = \sum_{i=1}^I \frac{E_2^i}{12(1 - \nu_{12}^i \nu_{21}^i)} \cdot \frac{(z_{i+1}^3 - z_i^3)}{3};$$

$$D_{13} = B_{13}; \quad D_{23} = B_{23}; \quad D_{14} = B_{14};$$

$$D_{24} = B_{24}; \quad D_s = \sum_{i=1}^I \frac{G_{12}^i}{12} \cdot \frac{(z_{i+1}^3 - z_i^3)}{3};$$

$$D_{12} = \sum_{i=1}^I \frac{E_1^i \nu_{21}^i}{12(1 - \nu_{12}^i \nu_{21}^i)} \cdot \frac{(z_{i+1}^3 - z_i^3)}{3};$$

$$D_{21} = \sum_{i=1}^I \frac{E_2^i \nu_{12}^i}{12(1 - \nu_{12}^i \nu_{21}^i)} \cdot \frac{(z_{i+1}^3 - z_i^3)}{3};$$

де величини $z_i \in [h/2; h/2]$ в залежності від і-го шару; I —кількість шарів; E_1^i , E_2^i , G_{12}^i , G_{13}^i , G_{23}^i , ν_{12}^i , ν_{21}^i — фізико-механічні характеристики і-го шару матеріалу оболонки.

Рівняння коливань неоднорідної по товщині оболонки в диференціальній формі мають вигляд [6]. Рівняння коливань доповнюються відповідними граничними умовами та нульовими початковими умовами.

Побудова чисельного алгоритму заснована на використанні інтегро-інтерполяційного методу побудови різницевих схем по просторовим координатам s_1 , s_2 та явної скінчено-різницевої схеми інтегрування по часовій координаті t [6].

Виконуючи операцію інтегрування рівнянь на зазначених інтервалах з використанням явної апроксимації по часовій координаті, отримаємо наступні різницеві рівняння [6]. Компоненти узагальненого вектору переміщень $\bar{U} = (u_1, u_2, u_3, \phi_1, \phi_2)$ віднесені до цілих точок по просторовим змінним $\bar{U}_{1,m} = (u_{1,l,m}, u_{2,l,m}, u_{3,l,m}, \phi_{1,l,m}, \phi_{2,l,m})$.

Для узгодження величин зусиль-моментів в (1.2) рівняння (1.3) інтегруються в областях

$$\Omega_1, \Omega_2 = \{s_{1,l-1} \leq s_1 \leq s_{1,l}; s_{2,m-1/2} \leq s_2 \leq s_{2,m+1/2}\},$$

$$\Omega_3 = \{s_{1,l} \leq s_1 \leq s_{1,l+1}; s_{2,m-1/2} \leq s_2 \leq s_{2,m+1/2}\},$$

$$\Omega_4 = \{s_{1,l-1/2} \leq s_1 \leq s_{1,l+1/2}, s_{2,m-1} \leq s_2 \leq s_{2,m}\},$$

$$\Omega_5 = \{s_{1,l-1/2} \leq s_1 \leq s_{1,l+1/2}, s_{2,m} \leq s_2 \leq s_{2,m+1}\},$$

при $t_{n-1/2} \leq t \leq t_{n+1/2}$ [6].

Досліджено динамічне деформування тришарової еліпсоїдальної оболонки з жорстко затисненими краями в області $D = \{\alpha_{10} \leq \alpha_1 \leq \alpha_{1N}, \alpha_{20} \leq \alpha_2 \leq \alpha_{2N}\}$ при дії розподіленого нормального навантаження $P_3(\alpha_1, \alpha_2, t)$. Крайові умови при цьому мають наступний вигляд:

$$\bar{U}(\alpha_{10}, \alpha_2) = \bar{U}(\alpha_{1N}, \alpha_2) = 0;$$

$$\bar{U}(\alpha_1, \alpha_{20}) = \bar{U}(\alpha_1, \alpha_{2N}) = 0.$$

Приймаються нульові початкові умови для всіх компонент узагальненого вектору переміщень при $t = 0$.

Розподілене нормальне навантаження $P_3(\alpha_1, \alpha_2, t)$ має вигляд

$$P_3(\alpha_1, \alpha_2, t) = A \cdot \sin \frac{\pi t}{T} [\eta(t) - \eta(t - T)],$$

де A — амплітуда навантаження;

T — тривалість навантаження. В розрахунках приймається, що $A = 10^6$ Па; $T = 50 \cdot 10^{-6}$ с. Задача розв'язувалася для випадку параметра $k = a/b = 1,5$.

Геометричні та фізико-механічні параметри оболонки:

$$\alpha_{10} = \frac{\pi}{12}; \quad \alpha_{1N} = \pi - \frac{\pi}{12}; \quad \alpha_{20} = -\frac{\pi}{2}; \quad \alpha_{2N} = \frac{\pi}{2};$$

$$h = h_1 + h_2 + h_3; \quad h_1 = h_3 = 10^{-2}; \quad h_2 = 3 \cdot 10^{-2};$$

$$E_1^1 = 7 \cdot 10^{10}; \quad E_2^1 = E_1^1; \quad E_1^2 = \frac{E_1^1}{1000}; \quad E_2^2 = E_1^2;$$

$$\nu_{12}^1 = \nu_{21}^1 = \nu_{12}^2 = \nu_{21}^2 = \nu_{12}^3 = \nu_{21}^3 = 0,33;$$

$$\rho_1 = \rho_3 = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; \quad \rho_2 = 3 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3.$$

На рисунках 1 – 2 наведені результати розрахунків на часовому інтервалі $t = 40T$. На рисунках 1 – 2 представлені залежності величин u_3 по часу.

На всіх рисунках крива синього кольору відповідає випадку прогину u_3 в точці

$(\alpha_1 = \pi/4; \alpha_2 = 0)$, а крива червоного кольору відповідає випадку прогину u_3 в характерній точці $(\alpha_1 = \pi/2; \alpha_2 = 0)$, в якій прогин u_3 досягає свого максимального по модулю значень на часовому інтервалі $t = 40T$.

Порівняння прогинів в точках $\pi/4$ та $\pi/2$ (одношарова оболонка)

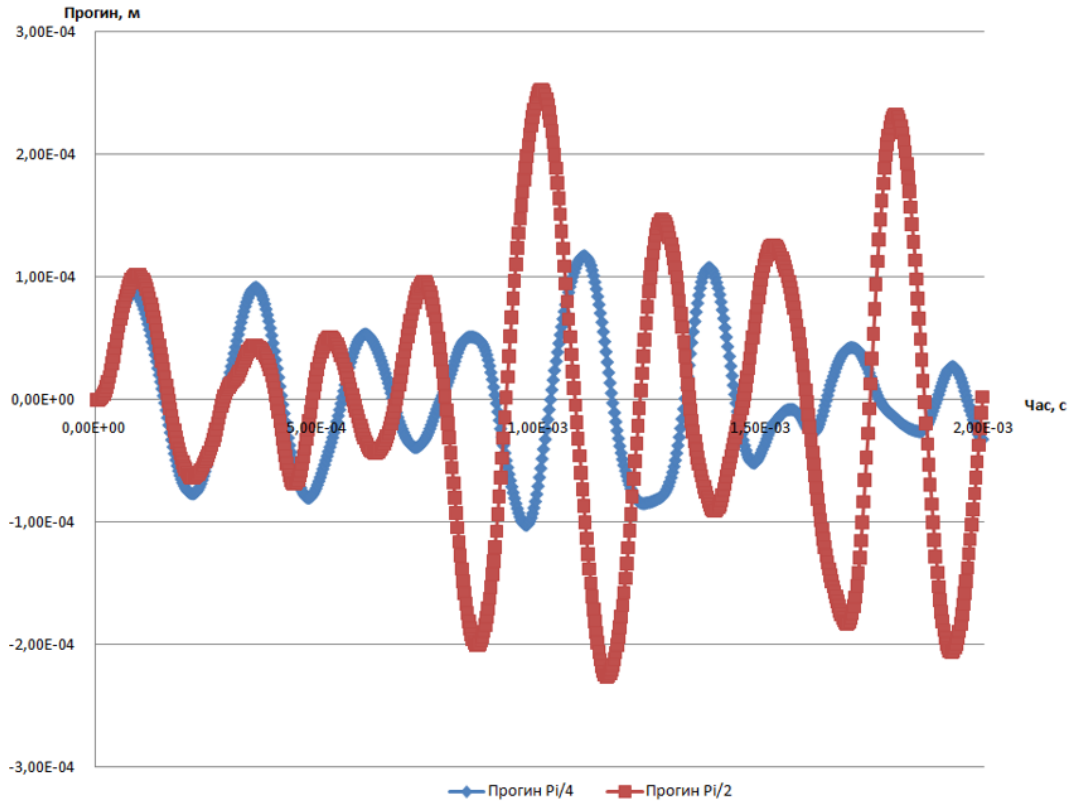


Рисунок 1. Прогин u_3 для випадку одношарової оболонки в точках $(\alpha_1 = \pi/4; \alpha_2 = 0)$ та $(\alpha_1 = \pi/2; \alpha_2 = 0)$

Рисунок 1 відповідає залежностям величин u_3 по часовій координаті для випадку одношарової оболонки. Як видно із приведеного графічного матеріалу:

– максимальне абсолютне значення величини u_3 для випадку прогину в точці $(\alpha_1 = \pi/4; \alpha_2 = 0)$ спостерігається в момент часу $t = 22T$: $u_3(\pi/4, 0)_{\text{однош}} = 1,18 \cdot 10^{-4} \text{ м}$;

– максимальне абсолютне значення величини u_3 для випадку прогину в точці $(\alpha_1 = \pi/2; \alpha_2 = 0)$ спостерігається в момент часу $t = 20T$: $u_3(\pi/2, 0)_{\text{однош}} = 2,53 \cdot 10^{-4} \text{ м}$.

$$\frac{u_3(\pi/2, 0)_{\text{однош}}}{u_3(\pi/4, 0)_{\text{однош}}} = \frac{2,53 \cdot 10^{-4}}{1,18 \cdot 10^{-4}} \approx 2,2.$$

Отже, для випадку одношарової оболонки максимальний прогин u_3 в точці $(\alpha_1 = \pi/2; \alpha_2 = 0)$ в 2 рази більше від максимального прогину u_3 в точці $(\alpha_1 = \pi/4; \alpha_2 = 0)$.

Рисунок 2 відповідає залежностям величин u_3 по часовій координаті для випадку тришарової оболонки. Як видно із приведеного графічного матеріалу:

– максимальне абсолютне значення величини u_3 для випадку прогину в точці $(\alpha_1 = \pi/4; \alpha_2 = 0)$

спостерігається в момент часу $t = 24T$:
 $u_3(\pi/4, 0)_{\text{триш}} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ m}$;

спостерігається в момент часу $t = 29T$:
 $u_3(\pi/2, 0)_{\text{триш}} = 4,38 \cdot 10^{-4} \text{ m}$.

– максимальне абсолютне значення величини u_3 для випадку прогину в точці $(\alpha_1 = \pi/2; \alpha_2 = 0)$

$$\frac{u_3(\pi/2, 0)_{\text{триш}}}{u_3(\pi/4, 0)_{\text{триш}}} = \frac{4,38 \cdot 10^{-4}}{2,58 \cdot 10^{-4}} \approx 1,7.$$

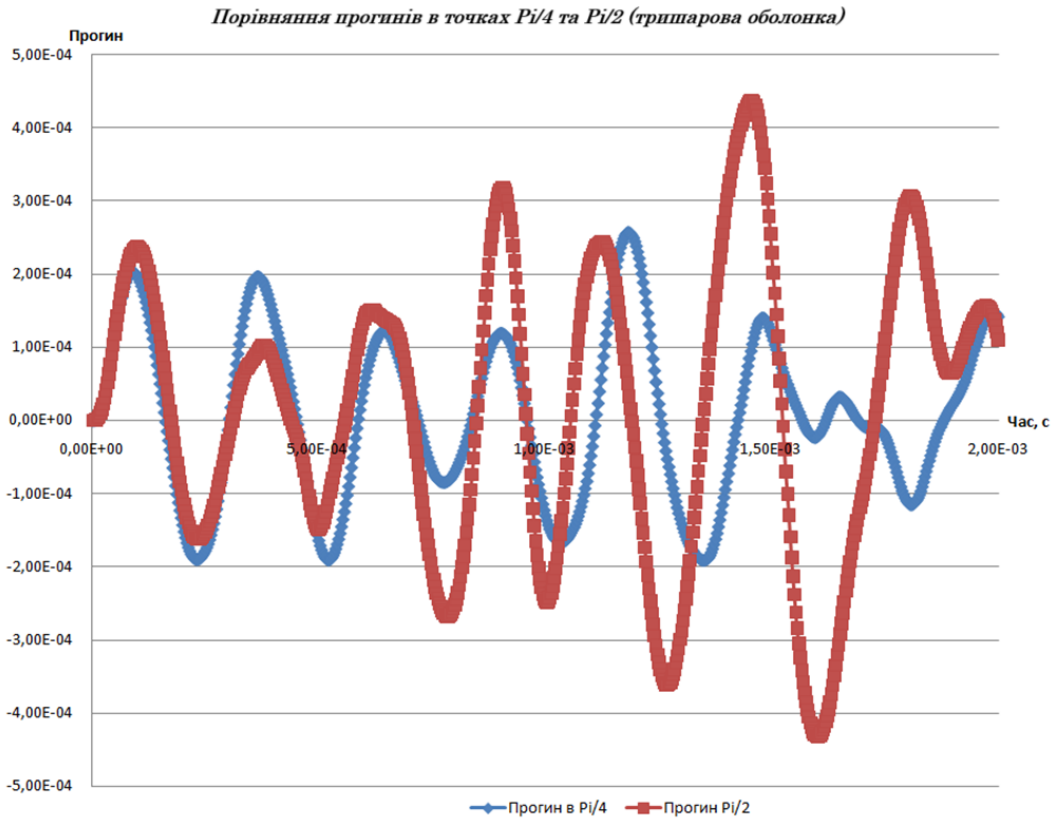


Рисунок 2. Прогин u_3 для випадку тришарової оболонки в точках $(\alpha_1 = \pi/4; \alpha_2 = 0)$ та $(\alpha_1 = \pi/2; \alpha_2 = 0)$

Отже, для випадку одношарової оболонки максимальний прогин u_3 в точці $(\alpha_1 = \pi/2; \alpha_2 = 0)$ майже в 2 рази більше від максимального прогину u_3 в точці $(\alpha_1 = \pi/4; \alpha_2 = 0)$.

Висновки

В даній роботі розглянуто задачу динамічної поведінки одношарових та тришарових еліпсоїдальних оболонок при дії на них нестационарного навантаження. Розглянуті рівняння коливань оболонок з відповідними граничними та початковими умовами. Для розв'язання поставлених задач побудовано чисельний алгоритм, заснований на скінченно-різницевій апроксимації вихідних рівнянь по просторовим та часовій

координатами. Наведено чисельні результати для випадків динамічної поведінки одношарових та тришарових еліпсоїдальних оболонок, наведено їх порівняльний аналіз. Даним алгоритмом розв'язання можна скористатися і для задач з іншими геометричними та фізико-механічними параметрами оболонки, а також для підкріплених ребрами оболонкових конструкцій.

Література

[1]. Головка К.Г., Луговой П.З., Мейш В.Ф. Динамика неоднородных оболочек при нестационарных нагрузках / под ред. Акад. НАН Украины А.Н. Гузя. К.: Изд. – полиграф. центр «Киевский ун-т», 2012. 541 с.
 [2]. Григоренко Я.М., Беспалова Е.И., Китайгородский А.Б., Шинкарь А.И. Свободные

колебания элементов оболочечных конструкций. К.: Наук. думка, 1986. 172 с.

[3]. Гузь А.Н., Кубенко В.Д. Теория нестационарной аэрогидроупругости оболочек. – К.: Наук. думка, 1982. 400 с. (Методы расчета оболочек: В 5-ти т.; Т.5).

[4]. Lugovoi, P.Z., Meish, V.F., Meish, Y.A. *et al.* Dynamic Design of Compound Shell Structures of Revolution Under Nonstationary Loads. *Int Appl Mech.* **56**, 22–32 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10778-020-00993-0>

[5]. Maiborodina, N.V., Meish, V.F. Forced Vibrations of Ellipsoidal Shells Reinforced with Transverse Ribs Under a Nonstationary Distributed Load. *Int Appl Mech.* **49**, 693–701 (2013). <https://doi.org/10.1007/s10778-013-0603-9>

[6]. Meish, V.F., Meish, Y.A., Maiborodina, N.V. *et al.* Deformation of Three-Layer Ellipsoidal Shells Reinforced with Longitudinal Ribs Under Non-Stationary Loading. *Int Appl Mech.* **59**, 292–303 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10778-023-01221-1>

[7]. Meish, V. & Meish, Yu & Arnauta, N. (2019). Numerical Analysis of Nonstationary Vibrations of Discretely Reinforced Multilayer Shells of Different Geometry. *International Applied Mechanics.* **55**. <https://doi.org/10.1007/s10778-019-00962-2>.

[8]. Meish, V.F., Meish, Y.A. & Pavlyuk, A.V. Dynamics of a Three-Layer Elliptic Cylindrical Shell Reinforced with Discrete Rings. *Int Appl Mech.* **54**, 172–179 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10778-018-0869-z>

[9]. Meish, V.F., Meish, Y.A. & Belova, M.A. Nonstationary Dynamics of Elliptic Isotropic Conical Shells Under Distributed Loads. *Int Appl Mech.* **56**, 424–431 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10778-020-01026-6>

[10]. Meish, V. & Maiborodina, N. (2008). Analysis of the nonaxisymmetric vibrations of flexible ellipsoidal shells discretely reinforced with transverse ribs under nonstationary loads. *International Applied Mechanics.* **44**, 1128–1136. <https://doi.org/10.1007/s10778-009-0125-7>.

[11]. Meish, V.F., Maiborodina, N.V. Nonaxisymmetric vibrations of ellipsoidal shells under

nonstationary distributed loads. *Int Appl Mech.* **44**, 1015–1024 (2008). <https://doi.org/10.1007/s10778-009-0117-7>

[12]. Meish, V.F., Maiborodina, N.V. Stress State of Discretely Stiffened Ellipsoidal Shells Under a Nonstationary Normal Load. *Int Appl Mech.* **54**, 675–686 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10778-018-0922-y>

[13]. Noor, A. K., and Burton, W. S. (April 1, 1990). Assessment of Computational Models for Multilayered Composite Shells. *ASME. Appl. Mech. Rev.* 1990; 43(4): 67–97. <https://doi.org/10.1115/1.3119162>

[14]. Qatu, M. S. (July 30, 2002). Recent research advances in the dynamic behavior of shells: 1989–2000, Part 1: Laminated composite shells. *ASME. Appl. Mech. Rev.* July 2002; 55(4): 325–350. <https://doi.org/10.1115/1.1483079>

[15]. Mohamad S. Qatu, Rani Warsi Sullivan, Wenchao Wang. Recent research advances on the dynamic analysis of composite shells: 2000–2009. *Composite Structures*, 93(1), 2010, 14–31, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.05.014>.

Відомості про авторів

Наталія Майбородіна, к.ф.м.н., доцент, доцент кафедри природничо-математичних та загальноінженерних дисциплін, ВП НУБіП України "Ніжинський агротехнічний інститут", Ніжин, Україна, [ORCID ID: 0000-0003-1754-6790](https://orcid.org/0000-0003-1754-6790).



В'ячеслав Герасименко, к.т.н., доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, ВП НУБіП України "Ніжинський агротехнічний інститут", Ніжин, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-4017-1141](https://orcid.org/0000-0002-4017-1141).



ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНІЗМУ СУЧАСНИХ СУДНОВИХ МАЛООБЕРТОВИХ ДВИГУНІВ

Савчук В.П. [✉], Марков Н.В., Анікейчик Р.В.

Херсонська державна морська академія, Україна

Анотація

Ключові слова: скорочення витрати палива, суднові енергетичні установки, режими навантаження, кривошипно-шатунний механізм, працездатність підшипників.

Робота досліджує сучасні тенденції у судновій енергетиці, спрямовані на зменшення витрати палива шляхом використання оптимальних швидкостей та режимів навантаження малооберткових двигунів. Описуються можливості оптимізації витрати палива за допомогою налаштувань *Delta Bypass Tuning* та *Low-Load Tuning* на прикладі двигунів серії *RT-flex/X* виробника *WinGD*. Досліджується вплив цих налаштувань на працездатність підшипників кривошипно-шатунного механізму, особливо в контексті екологічних обмежень *IMO Tier II* та *Tier III*. Визначено необхідність детального аналізу впливу робочих режимів на працездатність підшипників та необхідність оптимізації конструкції і обслуговування кривошипно-шатунного механізму для досягнення кращої ефективності та дотримання екологічних стандартів.

Вступ

З урахуванням зростаючих вимог до зменшення викидів шкідливих речовин і екологічного впливу суднових перевезень, а також збільшення вартості палива, розробка та впровадження нових технологій та стратегій енергозбереження стають пріоритетним завданням. Дослідження оптимальних режимів роботи малооберткових двигунів, що працюють на різних навантаженнях, та використання різних налаштувань для забезпечення оптимальної ефективності є важливими напрямками. Посилення регулюючих норм щодо викидів та енергоефективності суден змушує компанії активно шукати ефективні технологічні рішення для забезпечення сталого розвитку та конкурентоспроможності в галузі морських перевезень.

Викладення основного матеріалу

Сучасні тенденції до скорочення витрати палива судновими енергетичними установками призводять до застосування оптимальних швидкостей руху суден. Це впливає на вибір режиму навантаження головних малооберткових двигунів, що працюють на гвинт фіксованого кроку. Сучасні контейнерні судна часто застосовують низькі режими навантаження «slow steaming» (10...20 % *SMCR*) обмежений час роботи та 20...40 % *SMCR* тривалий час.

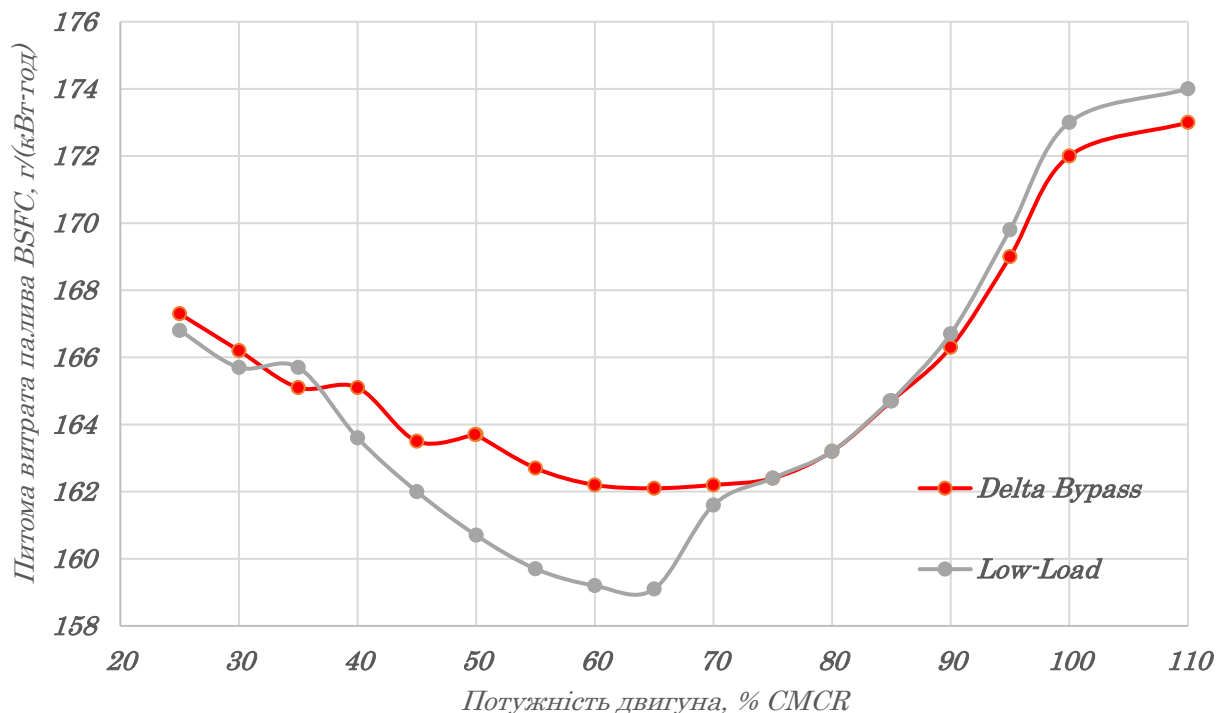
Малооберткові двигуни серій *RT-flex/X* виробника *WinGD* демонструють здатність стабільно

працювати на дуже низьких обертах, що можливо завдяки точному контролю впорскування палива при високих тисках впорскування, що досягаються на малих частотах обертання, та відключенням паливних форсунок при роботі на таких режимах. Для можливості оптимізації витрати палива головними двигунами, що працюють переважно в обмежених діапазонах навантаження, виробником передбачено застосування варіантів налаштувань параметрів робочого процесу **Delta Bypass Tuning** та **Low-Load Tuning**. Налаштування оптимальної витрати палива при часткових навантаженнях **Delta Bypass Tuning** забезпечує зниження питомої витрати палива *BSFC* при потужності дизелів нижче 50 % режиму *SMCR* та сумісність з екологічними вимогами *IMO Tier II* (рис. 1а). Дані налаштування спрямовані на збільшення вироблення пари енергетичною установкою при навантаженні вище 50 % режиму *SMCR* для забезпечення потреб зокрема турбокомпаундних систем. Налаштування **Low-Load Tuning** відповідає екологічним обмеженням відповідно *IMO Tier II* та оптимізовано для навантажень двигуна нижче 75% режиму *SMCR* (рис. 1б).

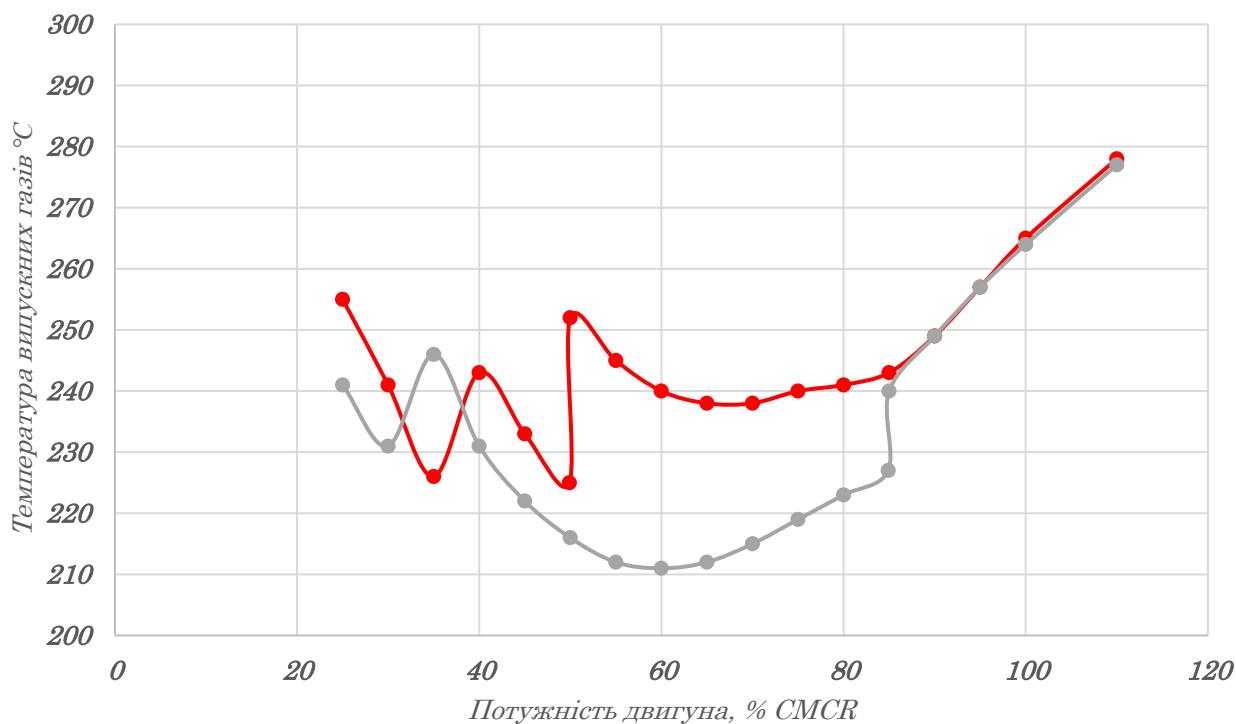
Враховуючи можливість адаптації даних двигунів до екологічних обмежень рівня *Tier III* та використання альтернативних видів палив, таких як метан, метанол, та ін., то постає питання впливу застосовуваних налаштувань та режимів роботи дизелів на умови експлуатації підшипників кривошипно-шатунного механізму. Це очевидно пов'язано із зміною частоти обертання

підшипникових вузлів та зменшення співвідношення сили тиску газів до сили інерції деталей механізму руху, що призводить до зміни режиму

роботи зокрема головних підшипників, та відповідно впливає на їх працездатність.



a)



б)

Рисунок 1. Порівняльна характеристика питомої витрати палива (а) та температури випускних газів після ГТН (б) при різних методах оптимізації питомої витрати палива

Висновки

Враховуючи наявність різних варіантів налаштування протікання робочого процесу малооборотних дизелів з метою забезпечення як вимог до зменшення емісії NOx із випускними газами та декарбонізації енергетичної установки, що впливають на умови навантаження підшипникових вузлів та режими їх мащення, сучасні дизелі потребують детального аналізу впливу таких режимів на працездатність підшипників КШМ з метою оптимізації їх конструкції та/чи корегування періодичності проведення робіт з їх технічного обслуговування.

Література

- [1]. Савчук В.П., Белоусов Е.В., Самарин А.Е. Обеспечение надежности головных подшипников судовых малооборотных двигателей, работающих на режимах частичных нагрузок. *Вестник двигателестроения*. 2018. С. 21-27.
- [2]. Белоусов Е.В., Варбанец Р.А., Савчук В.П. и др. Исследование процессов топливоподачи в газодизельных малооборотных двухтактных двигателях низкого давления. *Всеукраинский научно-технический журнал «Двигатели внутреннего сгорания»*. 2019. № 1. С. 27-33.
- [3]. Савчук В.П., Зінченко Д.О., Акімов О.В. Моделювання робочих параметрів мотилевих підшипників малооборотного судового дизельного двигуна WARTSILA RT-FLEX82C. *Розвиток транспорту*. 2021. №1(8). Рр. 91-102. doi: <https://doi.org/10.33082/td.2021.1-8.09>

Відомості про авторів

Володимир Савчук, к.т.н, доцент, завідувач кафедри експлуатації судових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-5266-850X](https://orcid.org/0000-0002-5266-850X).



Нікіта Марков, ЗВО спеціальності 271 «Морський та внутрішній водний транспорт», кафедра експлуатації судових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна.



Роман Анікейчик, ЗВО спеціальності 271 «Морський та внутрішній водний транспорт», кафедра експлуатації судових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна.



ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ ПІДШИПНИКІВ КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНІЗМУ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ

Зінченко Д.О.^{1✉}, Тулученко Г.Я.², Онацький М.В.¹

¹ Херсонська державна морська академія, Україна

² Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна

Анотація

Ключові слова: підшипники ковзання, кривошипно-шатунний механізм, гідродинамічне мащення, режим роботи, моделювання, товщина мастильної плівки, напруження.

Робота присвячена аналізу працездатності підшипників кривошипно-шатунного механізму тронкових двигунів внутрішнього згоряння. Зокрема, розглядається особливість їхньої роботи у режимі гідродинамічного мащення, яке моделюється за допомогою диференціального рівняння Рейнольдса. У дослідженні також розглядається вплив механічного навантаження, руху шатуна та режимів роботи на працездатність підшипників. Застосовуються чисельні методи моделювання, а також оцінка рівня напружень в підшипниках за максимальними значеннями тиску мастильної плівки та мінімальною товщиною мастильного шару. Результати дослідження можуть бути використані для покращення конструкції та ефективності роботи підшипників у двигунах внутрішнього згоряння.

Вступ

З урахуванням стрімко зростаючих технологічних вимог до суднових енергетичних установок, а також підвищення стандартів екологічної безпеки та ефективності, питання про ефективність роботи підшипників стає надзвичайно важливим.

Надійність та ефективність роботи кривошипно-шатунного механізму визначає продуктивність та безперебійну роботу двигунів, що використовуються у широкому спектрі сфер.

Підшипники ковзання в кривошипно-шатунному механізмі тронкових двигунів внутрішнього згоряння відіграють критичну роль у забезпеченні ефективності та надійності роботи цих двигунів. Гідродинамічне мащення, яке є основним режимом роботи таких підшипників, вимагає комплексного аналізу і моделювання для забезпечення оптимальних умов роботи.

Актуальність досліджень

Значний інтерес до дослідження цієї теми спричинений постійними змінами в екологічних стандартах та вимогах щодо викидів, які ставлять перед інженерами нові завдання з покращення енергоефективності та зменшення технологічних втрат у системах згоряння.

Розуміння та вдосконалення працездатності підшипників ковзання у кривошипно-шатунному механізмі є актуальним завданням, яке спрямоване на забезпечення стабільності та ефективності виробництва в різних сферах промисловості.

Викладення основного матеріалу

Підшипники ковзання в двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) працюють в режимі гідродинамічного мащення. Основою для моделювання гідродинаміки в підшипниках ковзання є диференціальне рівняння Рейнольдса, яке описує потік мастильного матеріалу в мастильному зазорі шляхом моделювання руху (рівняння Нав'є-Стокса), пов'язаного з умовою безперервності. Задля спрощення, численні ідеалізовані припущення та передумови зазвичай робляться в єдиному чисельно можливому розв'язку диференціального рівняння Рейнольдса. Прийнятність більшої частини цих припущень була достатньо підтверджена в експериментальних дослідженнях і в умовах експлуатації. Моделювання підшипника визначає робочі параметри трибосистеми підшипника ковзання, що складається з елементів корпусу підшипника, вкладишів підшипника, оливи та шийки вала. Робочі параметри, визначені для кожного відповідного режиму роботи, необхідно порівнювати зі стандартними

робочими значеннями (граничними значеннями, отриманими з випробувань та досвіду) і їх дійсність перевірена на справжню експлуатаційну надійність.

Математична перевірка функціонування підшипників ковзання в основному полягає у визначенні механічного навантаження та відстані цапфи від підшипника (**мінімальна товщина мастильної плівки**) у робочому стані. Іншими параметрами оцінки є втрати на тертя, швидкість потоку мастила та кінцева температура підшипника.

Моделювання роботи підшипників ковзання двигуна починається з визначення сил навантаження. При моделюванні орбіти переміщення шатунної шийки в підшипниках шатуна та рамових підшипниках сила F розкладається до двох складових у напрямку перпендикулярному до вісі мінімального мастильного зазору h_{min} , які врівноважуються з відповідними компонентами

сил реакції. Числа Зоммерфельда використовуються для отримання змін ексцентриситету цапфи Δe та його позиційного кута $\Delta \delta$, коли кут кривошипа змінюється при збільшенні $\Delta \varphi$. Додавання цих змін до відповідних поточних значень імітує орбіту зміщення цапфи для одного або кількох циклів згоряння, доки не буде отримана періодична та замкнута крива, тобто конвгенція.

Висновки про правильне розташування конструктивно необхідних елементів подачі оливи (змащувальних отворів, оливорозподільних канавок і виїмок) у підшипниках, що мінімально впливатиме на їхню вантажопідйомність, також можна зробити за характеристиками навантаження і переміщення шийки (рис. 1, 2) з полярних діаграм. Полярні діаграми забезпечують відповідну допомогу для вибору положення елементів подачі оливи в шийці (мастильні отвори).

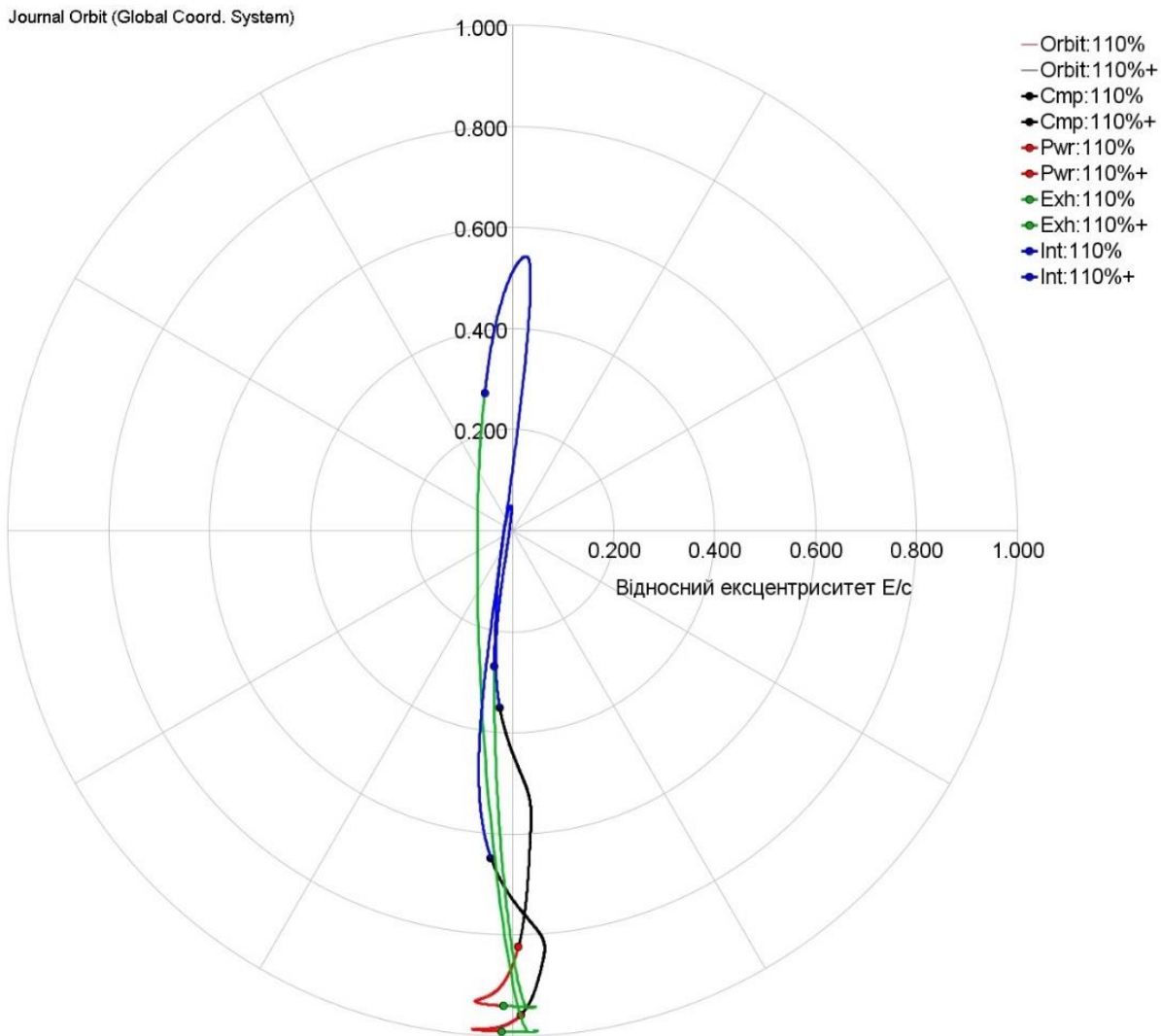


Рисунок 1. Типова характеристика переміщення поршневого пальця в залежності від кута повороту кривошипа φ

Journal Orbit (Global Coord. System)

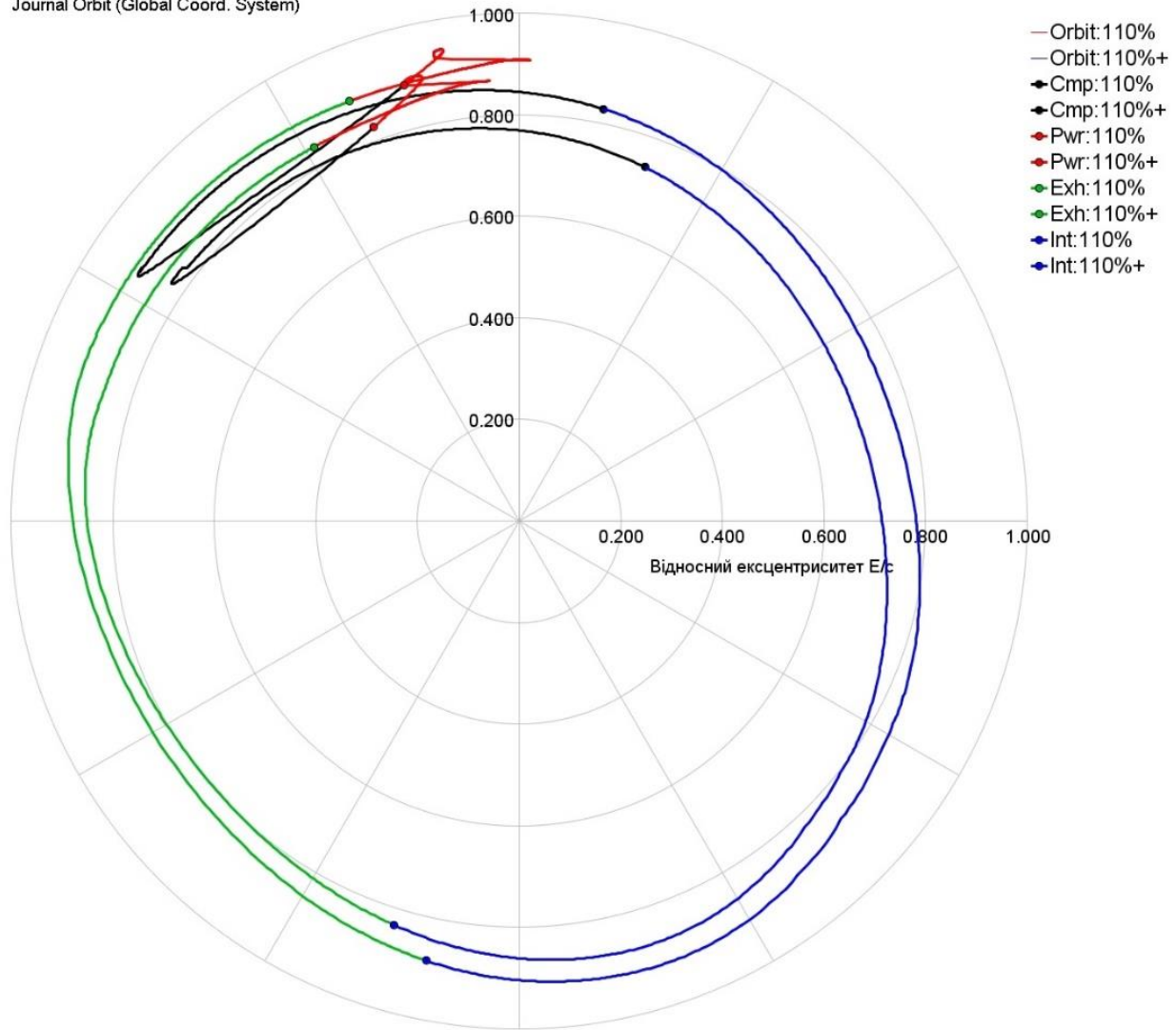


Рисунок 2. Типова характеристика переміщення шатунного підшипника в залежності від кута повороту кривошипа φ

Оцінка рівня напружень в підшипниках ковзання в ДВЗ базується в основному на максимальних значеннях питомого навантаження на підшипник і тиску мастильної плівки, а також на мінімальних значеннях товщини мастильної плівки.

Висновки

Гідродинамічне мащення, що є основним режимом роботи підшипників ковзання, вимагає комплексного аналізу та моделювання для забезпечення оптимальних умов експлуатації.

Математична перевірка функціонування підшипників ковзання полягає у визначенні механічного навантаження та відстані цапфи від підшипника у робочому стані. Додатково оцінюються параметри, такі як втрати на тертя, швидкість потоку оливи та кінцева температура підшипника.

Отже, результати дослідження вказують на важливість та необхідність подальшого вивчення проблеми працездатності підшипників ковзання у кривошипно-шатунному механізмі для підвищення ефективності та надійності роботи двигунів внутрішнього згорання.

Література

[1]. Frondelius Tero. Development of methods in engine design process. University of Oulu Graduate School; University of Oulu, Faculty of Technology Acta Univ. Oul. C 744, 2020

[2]. Mollenhauer Klaus, Tschoeke Helmut. Handbook of Diesel Engines. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. 634 p. ISBN:978-3-540-89082-9

[3]. Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines / Eighth edition, Edited by Doug Woodyard, 2004. 884 p.

[4]. Савчук В.П., Зінченко Д.О., Кочетов Г.А., Дзигар А.К. Аналіз працездатності підшипників шатуна середньообертового двигуна Hyundai HiMSEN H25/33 при експлуатації з допустимими значеннями зазорів без ремонту. *Водний транспорт*, 2023, 2(38), 115-127. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.13

[5]. Савчук В.П. Методи дослідження впливу експлуатаційних показників на працездатність підшипників ковзання двигунів внутрішнього згорання. *Матеріали 10-ї міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування»*, 2019, 208-211.

[6]. Савчук В.П., Зінченко Д.О., Котов А.І., Дзигар А.К. Моделювання робочих параметрів мотилевих підшипників малообертового суднового дизельного двигуна. *Матеріали III-ї Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету «MPP&O-2021 (Marine Power Plants and Operation)»*. 2021. 65-68.

[7]. Савчук В.П., Курносенко Д.В., Літусенко С.О. Моделювання показників працездатності головних підшипників малообертового двигуна MAN B&W 12K98MC. *Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Strategiczne pytania światowej nauki – 2021»*, 07-15.02.2021. 44-50.

Відомості про авторів

Дмитро Зінченко, к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-7333-7347](https://orcid.org/0000-0002-7333-7347).



Галина Тулученко, д.т.н., професор, професор кафедри вищої математики, НТУ «ХП», Харків, Україна.



Максим Онацький, ЗВО спеціальності 271 «Морський та внутрішній водний транспорт», кафедра експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна.



СЕКЦІЯ 4

ПРОБЛЕМИ РОЗВИТКУ ТА ОСОБЛИВОСТІ

ПРОЕКТУВАННЯ І ВИРОБНИЦТВА

ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК І ДОПОМІЖНОГО

ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ,

ЙОГО ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

ПЛАНУВАННЯ ЕФЕКТИВНОЇ ЧЕРГОВОСТІ ВІДНОВЛЕННЯ БОРТОВОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ, ПОШКОДЖЕНОЇ В РЕЗУЛЬТАТІ СТАРІННЯ, ПРИРОДНОГО, ТЕХНОГЕННОГО АБО ВІЙСЬКОВОГО ВПЛИВУ

Соловей В.В., Зевін Л.І.✉

Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України

Анотація

Ключові слова: Інфраструктура території, коефіцієнт готовності, допустимі значення, ризик.

У статті розглядається завдання щодо планування при обмежених ресурсах відновлення бортової інфраструктури, що зазнала руйнувань. Передбачається, що в якості руйнувань можуть розглядатися наслідки землетрусів, повеней, військових дій та наслідки інших подій, що породжують ризики відмови від об'єктів бортової інфраструктури. Зміст завдання полягає в мінімізації загального ризику відмови бортової інфраструктури. А розв'язання задачі базується на використанні теорії надійності, декомпозиції інфраструктури території на окремі системи забезпечення споживачів.

Вступ

Сприятливим мотивом звернутися до такої тематики стали події в Україні, коли внаслідок військових дій виявилася частково зруйнована інфраструктура деяких міст та селищ. Відновлення цих об'єктів буде неминучим процесом. Для його реалізації будуть потрібні значні ресурси. Раціональне їх використання можна рекомендувати шляхом вирішення на ЕОМ екстремальної математичної задачі планування відновлення об'єктів бортової інфраструктури (ІТ). Для формулювання цільової функції завдання обрано критерій якості ІТ – загальний ризик відмови об'єктів ІТ, а для характеристик працездатності елементів ІТ – коефіцієнти їхньої готовності (КГ). Інфраструктура території являє собою технічні системи (ТС), які утворюють виробничі комплекси, житлові будинки та інші об'єкти з системами забезпечення водою, теплом, енергією для створення сприятливих умов роботи та проживання людей. У структурному відношенні ТС ІТ можуть бути пов'язаними або роздільними, а розміри ІТ можуть бути малими або великими. Для масштабного об'єкта рішення оптимізаційної задачі, як правило, ґрунтуються на декомпозиції об'єкта. Структура поділяється на окремі підструктури, для котрих здійснюється вирішення завдань, що мають меншу розмірність. Ці рішення використовуються у вирішенні задачі для всієї структури [1-3].

Підструктури ІТ розглядаються як ТС забезпечення споживачів (СЗС) S_k , $k = 1, 2, \dots, L$, для кожної з яких може бути визначена ознака

відмови. Тоді якість кожної СЗС можна характеризувати оцінками показників надійності та ризику. План черговості відновлення елементів ІТ формується шляхом вирішення задачі мінімізації загальної суми ризиків відмови всіх СЗС ІТ у задоволенні споживачів послуг. Інакше висловлюючись, потрібні коефіцієнти готовності елементів СЗС ІТ, неприйнятні значення яких обумовлені змінами, зокрема, ушкодженнями, відновити до нових значень, які забезпечують допустимий рівень загального ризику відмови СЗС ІТ. Мінімальний сумарний ризик відмови всіх СЗС ІТ буде забезпечений, якщо коефіцієнти готовності всіх елементів СЗС ІТ в результаті відновлення набудуть значення, що дорівнює одиниці. Тоді ризик відмови СЗС ІТ буде мінімальним. Максимальний сумарний ризик відмови елементів СЗС ІТ утворюється тоді, коли коефіцієнти їхньої готовності дорівнюють нулю. У цьому випадку працездатність СЗС ІТ дорівнюватиме нулю. Відповідно, максимальним буде ризик відмови всіх СЗС ІТ. Тобто, розв'язання задачі щодо мінімізації сумарного ризику відмови СЗС ІТ може бути отримане шляхом знаходження відповідних значень коефіцієнтів готовності елементів СЗС ІТ.

Актуальність досліджень

Важливою складовою транспортної інфраструктури південних регіонів є морські та річкові порти, які відіграють важливу роль в забезпеченні міжнародних перевезень продукції експортного призначення, що надзвичайно важливо для поповнення держбюджету. В зв'язку з цим, проблема

забезпечення їх сталого функціонування є безумовно актуальною. Тому задача відновлення їх роботи в повному обсязі в умовах обмежень фінансових можливостей потребує раціонального планування необхідних робіт. Це забезпечить їх проведення в найкоротші терміни з мінімальною витратою наявних ресурсів.

Планування відновлення інфраструктури території

Для математичної постановки завдання приймаються такі угоди.

1. Боргова інфраструктура позначається символом S ; L – число споживачів ІТ. Кожна СОП S_k , складається з $i = 1, 2, \dots, n_k$ елементів, де $e_{1_k}, e_{2_k}, \dots, e_{n_k}$, де n_k – кількість елементів СЗС S_k .

2. Будь-якому одному споживачу може знадобитися кілька послуг, наприклад, водопостачання, теплопостачання і т.д. Кожна послуга $j = 1, 2, \dots, J$ призначення реалізується СЗС S_k^j , $k = 1, 2, \dots, L$. Наприклад, СЗС S_k^1 – система забезпечення споживача S_k холодною водою; СЗС S_k^2 – система забезпечення Споживача S_k теплом; і т.д.

3. Наслідків відмов СЗС S_k , $k = 1, 2, \dots, L$ може бути кілька. Наприклад, загибель людей; матеріальні втрати тощо. При математичному формулюванні завдання кожної СЗС ІТ враховується лише один показник наслідків відмови – величина фінансових втрат від відмови СЗС S_k , $k = 1, 2, \dots, L$.

4. Для кожного i елемента $e_{1_k}, e_{2_k}, \dots, e_{n_k}$, СОП S_k , $k = 1, 2, \dots, L$ коефіцієнт готовності і коефіцієнт неготовності обчислюються за формулами [2]:

$$g_i = \frac{T_i}{T_i + T_i^B}, \quad 1 - g_i = \frac{T_i^B}{T_i + T_i^B}, \quad i = 1, 2, \dots, n_k \quad (1)$$

де T_i , T_i^B – середній час безвідмовної роботи та середній час відновлення елемента СЗС S_k , $k = 1, 2, \dots, L$ відповідного призначення.

5. Коефіцієнт готовності Γ_{S_k} будь-якої СЗС S_k , $k = 1, 2, \dots, L$ обчислюється як КГ структури, що описується відповідною структурною схемою, утвореною іменами її елементів.

6. У задачі використовуються відносні годинні обсяги u_k , послуги відповідного призначення, що надаються СЗС S_k , $k = 1, 2, \dots, L$. Вони

приймаються постійними величинами та обчислюються за формулою:

$$v_k = G_k / G, \quad (2)$$

де G_k – годинний обсяг послуги відповідного призначення, що надається СЗС S_k , $k = 1, 2, \dots, L$;

G – сумарний обсяг послуг відповідного призначення, що надаються всієї ІТ.

Якщо в якості послуги, що надається СЗС S_k^j , j типу призначення, приймається забезпечення технічного стану будівлі або її частини, то як годинний обсяг послуги (u_k) може прийматися середня кількість людей, які використовують будівлю або її частину протягом однієї години. З метою спрощення записів величини u_k і G_k індексуються за їх призначенням.

7. Відносний годинний ризик Y_{S_k} відмови СЗС S_k у послугі одного призначення визначається за такою формулою:

$$Y_{S_k} = (1 - \Gamma_{S_k}) v_k, \quad k = 1, 2, \dots, L \quad (3)$$

Відповідно, сумарний відносний годинний ризик Y_S відмов всіх СЗС S_k , $k = 1, 2, \dots, L$, в послугі одного призначення обчислюється за формулою:

$$Y_S = \sum_{k=1}^L Y_{S_k} = \sum_{k=1}^L (1 - \Gamma_{S_k}) v_k, \quad (4)$$

Аналогічно обчислюються сумарні відносні годинні ризики $\sum_{k=1}^L Y_{S_k^j}$, j типу призначення, $j = 1, 2, \dots, J$, $k = 1, 2, \dots, L$.

8. Початковий технічний стан всіх елементів СЗС ІТ визначається значеннями їхнього КГ на певний момент часу t_0 . Якщо елемент не працездатний, значення його КГ належить рівним нулю ($g_i = 0$). Якщо елемент працездатний, то значення його КГ не дорівнює нулю ($g_i \neq 0$) і обчислюється за формулою (1).

9. Для відновлення ІТ відводяться витрати Z_S^{**} . А для відновлення i елемента ІТ приймаються витрати $Z_i \neq 0$, що відповідають відновленню елемента до технічного стану, у якого значення коефіцієнта готовності дорівнює одиниці ($g_i = 1, 0$). З метою спрощення записів елементи в цій статті не поділяються на піделементи, і тому не індексуються за параметром, піделементи.

10. Дослідником встановлюються гранично допустимі мінімальні значення КГ $\Gamma_{СК}^*$ СЗС S_k , $k = 1, 2, \dots, L$. Відновлення технічного стану всіх СЗС ІТ має забезпечувати виконання вимог: $\Gamma_{S_k} \geq \Gamma_{S_k}^*$, $k = 1, 2, \dots, L$. Інакше висловлюються, відновлення технічного стану систем S_k , $k = 1, 2, \dots, L$ забезпечення Споживачів має здійснюватися не гірше рівня, що визначається заданими коефіцієнтами готовності $\Gamma_{S_k}^*$ СЗС S_k , $k = 1, 2, \dots, L$. Ця умова пов'язана з тим, що споживачі можуть мати різну важливість, і цю обставину треба враховувати. Наприклад, різною важливістю можуть мати військова інфраструктура, дитсадки, лікарні та інші Споживачі. Відповідно і вимоги до показників їх надійності можуть бути різними.

11. У виразі (3), який визначає ризик відмови $Y_{S_k} = (1 - \Gamma_{S_k}) \cdot v_k$ будь-якої СЗС S_k , $k = 1, 2, \dots, L$ величини коефіцієнтів їх неготовності $(1 - \Gamma_{S_k})$ можуть бути обчислені за їх структурною схемою і за даними про КГ елементів $e_{1_k}, e_{2_k}, \dots, e_{n_k}$ відповідної СЗС S_k . А величини v_k повинні бути відомі як відносні годинні обсяги послуги, що надаються СЗС S_k . Якщо у формулі (3) КГ $\Gamma_{S_k} = 1,0$ СЗС S_k , то ризик її відмови дорівнюватиме нулю, $Y_{S_k} = 0$, і необхідність відновлення СЗС S_k буде відсутня. Якщо формулі (4), хоча б однієї СЗС S_k , $k = 1, 2, \dots, L$, $\Gamma_{S_k} \neq 1,0$ то необхідність у вирішенні завдання відновлення СЗС ІТ може існувати. Таким чином, величина сумарного часового відносного ризику Y_s відмови у наданні послуг j типу призначення, $j = 1, 2, \dots, J$ СЗС ІТ S_j залежить:

- 1) від структурної організації ІТ, утвореної безліччю СОП S_k , $k = 1, 2, \dots, L$;
- 2) від структурних організацій кожної СЗС S_k , $k = 1, 2, \dots, L$, утворених відповідними її елементами $e_{1_k}, e_{2_k}, \dots, e_{n_k}$;
- 3) від значень КГ елементів $e_{1_k}, e_{2_k}, \dots, e_{n_k}$ СЗС S_k , $k = 1, 2, \dots, L$ до застосування витрат на їх відновлення;
- 4) від величин вартових відносних обсягів витрат v_k , СЗС S_k , $k = 1, 2, \dots, L$;
- 5) від сумарної величини витрат Z_s^{**} , що відводиться на відновлення всіх елементів СЗС ІТ.
- 6) від призначаються гранично допустимих значень КГ $\Gamma_{S_k}^*$ СЗС S_k , $k = 1, 2, \dots, L$. Значимо, що в результаті застосування витрат

$(z_{1_k}, z_{2_k}, \dots, z_{n_k})$, $i = 1, 2, \dots, n_k$, $k = 1, 2, \dots, L$, $j = 1, 2, \dots, J$ на відновлення СЗС S_k , $k = 1, 2, \dots, L$, в момент часу t_0 утворюються нові КГ $\Gamma_{S_k}(z_{1_k}, z_{2_k}, \dots, z_{n_k})$ СЗС S_k замість КГ $\Gamma_{S_k}(0_{1_k}, 0_{2_k}, \dots, 0_{n_k})$, що характеризують рівень технічного стану СЗС S_k , $k = 1, 2, \dots, L$, до застосування витрат.

Алгоритм розв'язання задачі

Розв'язання задачі на ЕОМ може бути здійснено відповідно до наступної принципової схеми алгоритму.

1. Підготовляються вхідні дані: структура СЗС ІТ S_k , $k = 1, 2, \dots, L$; дані для розрахунку КГ елементів e_{ik} , $i = 1, 2, \dots, n_k$.

2. Обчислюються КГ $g_{i_k}(0, 0, \dots, 0)$ елементів e_{i_k} , $i = 1, 2, \dots, n_k$, СЗС S_k , $k = 1, 2, \dots, L$ при нульових витрат за відновлення.

3. Обчислюються КГ $\Gamma_{S_k}(0, 0, \dots, 0)$ СЗС S_k , $k = 1, 2, \dots, L$, при нульових витратах на відновлення. Величини КГ $\Gamma_{S_k}(0, 0, \dots, 0)$ СЗС S_k , $k = 1, 2, \dots, L$ обчислюються за спеціально розробленим методом розрахунку показника надійності об'єкта, що представляється структурною схемою [3].

4. Обчислюються ризики $(1 - \Gamma_{S_k}(0, 0, \dots, 0)) \cdot v_k$ відмови СЗС ІТ S_k , $k = 1, 2, \dots, L$.

5. Серед ризиків СЗС ІТ: $(1 - \Gamma_{S_k}(0, 0, \dots, 0)) \cdot v_k$, $k = 1, 2, \dots, L$, знаходиться такий ризик, який має максимальне значення. Нехай це буде ризик відмови СЗС S_k .

6. Оскільки СЗС S_k є носієм максимального ризику $(1 - \Gamma_{S_k}) \cdot v_k$, то серед величин витрат $(z_{1_k}, z_{2_k}, \dots, z_{n_k})$, які можуть бути відведені на відновлення елементів СЗС S_k , знаходиться така змінна z_{i_k} , у якої зміна коефіцієнта готовності, що припадає на одиницю витрат, була б найбільшою:

$$\delta_{i_k} = \max_{z_{i_k}} \frac{\Gamma_{S_k}(z_{i_k}) - \Gamma_{S_k}(0)}{z_{i_k}}. \quad (5)$$

7. Формується компонент ефективного плану відновлення СЗС S_k :

$$P_{S_k}(t_0, z_{i_k}) = (0, 0, \dots, z_{i_k}, \dots, 0). \quad (6)$$

Для інших СЗС ІТ, мають спільні елементи з СЗС S_k , і загальні змінні Z_{ik} , будується подібний компонент плану.

8. Обчислюється КГ $\Gamma_{S_k}(0,0,\dots,z_{i_k},\dots,0)$ та ризик відмови СЗС S_k , з новими ненульовими витратами.

9. Проводиться аналіз. Якщо умови (8) не виконуються для КГ $\Gamma_{S_k}(0,0,\dots,z_{i_k},\dots,0)$, то зазначені вище обчислення повторюються до тих пір, поки з вирішення завдання, умови (8) не виконуються для всім СЗС S_k , $k = 1,2,\dots,L$, чи, окремо, всім СЗС S_M , $M = 1,2,\dots,M_1$. Задоволення цих умов визначає момент закінчення розв'язання задачі.

Висновки

Об'єкти ІТ з причин природного чи примусового руйнування втрачають свої властивості та стають непридатними або частково непридатними для використання. Одні об'єкти треба повністю замінювати, інші об'єкти можна відремонтувати, і продовжити їх експлуатацію. Для масштабної ситуації кількість варіантів черговості відновлення об'єктів при обмеженості коштів може бути дуже великою. Людині, яка приймає рішення, важко проаналізувати всі варіанти, оцінити їх і вибрати хороший варіант. В наш час у таких випадках застосовують, так званий, інструмент інтелектуальної підтримки прийняття рішень, що базується на вирішенні математичних завдань на ЕОМ з використанням баз даних. Працездатність ІТ, що включає будівлі, системи водо-тепло-газо-електропостачання та інші об'єкти, може бути оцінена показниками надійності. Чисельні значення показників надійності ґрунтуються на відповідних даних. У деяких випадках ці дані мають експертний характер. Наприклад, обсяг руйнувань будівлі після воєнних дій навряд можна отримати статистичним шляхом. Але можна експертно оцінити обсяг руйнувань. У цій статті як показник надійності елементів систем використовується коефіцієнт готовності, їх значення можуть бути визначені, у тому числі й експертним шляхом. Розглянутий у статті розрахунок має відношення до різних аспектів

пошкодження бортової інфраструктури як щодо окремих компонентів структур, так і по всій структурі в цілому. Як інструментарій її рішення виступає програмний комплекс. Його застосування спрямоване на побудову раціональних планів відновлювальних робіт з метою зниження ризиків відмови інфраструктурних об'єктів. Для вирішення цього завдання на ЕОМ в ІПМаш НАН України розроблено програмний комплекс. Наявність такого інструментарію дає можливість визначати, аналізувати та коригувати плани відновлювальних заходів.

Література

- [1]. Ергономіка / Під ред. Г.В. Дуганова. – К.: Вища шк., 1976. -174 с.
- [2]. Острейковський В.А. Теорія надійності. - М.: Виц. шк., 2003. - 463 с.
- [3]. Зевін Л.І., Кріль Г.Г. Розрахунок показників надійності технічних систем методом типових структурних схем. Пробл. машинобудування. 2019. Т. 22. № 2. С. 53-59. <https://doi.org/10.15407/pmach2019.02.053>

Відомості про авторів

Віктор Соловей, д.т.н., проф., провідний науковий співробітник, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-5444-8922](https://orcid.org/0000-0002-5444-8922).



Леонід Зевін, к.т.н., с.н.с., Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, Україна, [ORCID ID: 0009-0003-0567-8590](https://orcid.org/0009-0003-0567-8590).



АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ БЕЗПЛОТНОГО ЕЛЕКТРОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

Латвинський В.Д. [✉], Багач Р.В. [✉]

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Анотація

Ключові слова: безпілотні електромобілі, система V2X, комунікація електромобілів, дорожній рух.

Дана стаття досліджує застосування та розвиток технологій безпілотних електромобілів та їх вплив на транспортну систему. У статті висвітлюються різноманітні аспекти застосування безпілотних електромобілів. Особлива увага приділяється потенційному впливу безпілотних електромобілів на транспортну систему, такі як безпека дорожнього руху та підвищення ефективності використання дорожньої інфраструктури. Робота підкреслює значимість подальших досліджень та інновацій у галузі безпілотних електромобілів для створення безпечної, ефективної та стійкої транспортної системи.

Вступ

Очевидно, що безпілотні електромобілі потребують бездротового зв'язку з навколишнім середовищем. Проте така комунікація може бути корисною не лише для автономного водіння, а й для допомоги водієві та підвищення загальної безпеки на дорозі. Наприклад, електромобілі можуть отримувати в реальному часі інформацію про доступні місця на парковці, передавати дані про свій технічний стан до сервісних центрів та повідомляти свої координати центрам управління трафіком для отримання рекомендацій щодо оптимального маршруту. Крім того, вони можуть встановлювати зв'язок з іншими транспортними засобами та навіть смартфонами пішоходів, що дозволяє уникати аварійних ситуацій. Такі системи мають безліч переваг. Такі системи називаються Vehicle-to-X, що означає "Транспортний засіб – X", де X може представляти різні об'єкти. У межах цього терміна виділяються наступні основні типи комунікації [1].

V2V (Vehicle-to-Vehicle) – зв'язок між автомобілями, спрямований перш за все на запобігання аваріям та обмін інформацією про рух [2].

V2I (Vehicle-to-Infrastructure) – зв'язок з інфраструктурою, який дозволяє отримувати інформацію про сигнали світлофорів, переходи для пішоходів та інше [3].

V2N (Vehicle-to-Network) – зв'язок з мережею для отримання різних послуг і інформації, такої як трафік або виклик екстрених служб [4].

V2P (Vehicle-to-Pedestrian) – зв'язок з пішоходами для підвищення безпеки [5].

На даний момент 3GPP стандартизує бездротовий зв'язок електромобіля з оточуючим

середовищем в мережах 5G. Цей стандарт відомий як C-V2X, де літера "C" вказує на "Cellular" - "стільниковий", що відображає те, що основою цього стандарту є стільникова мережа.

Викладення основного матеріалу

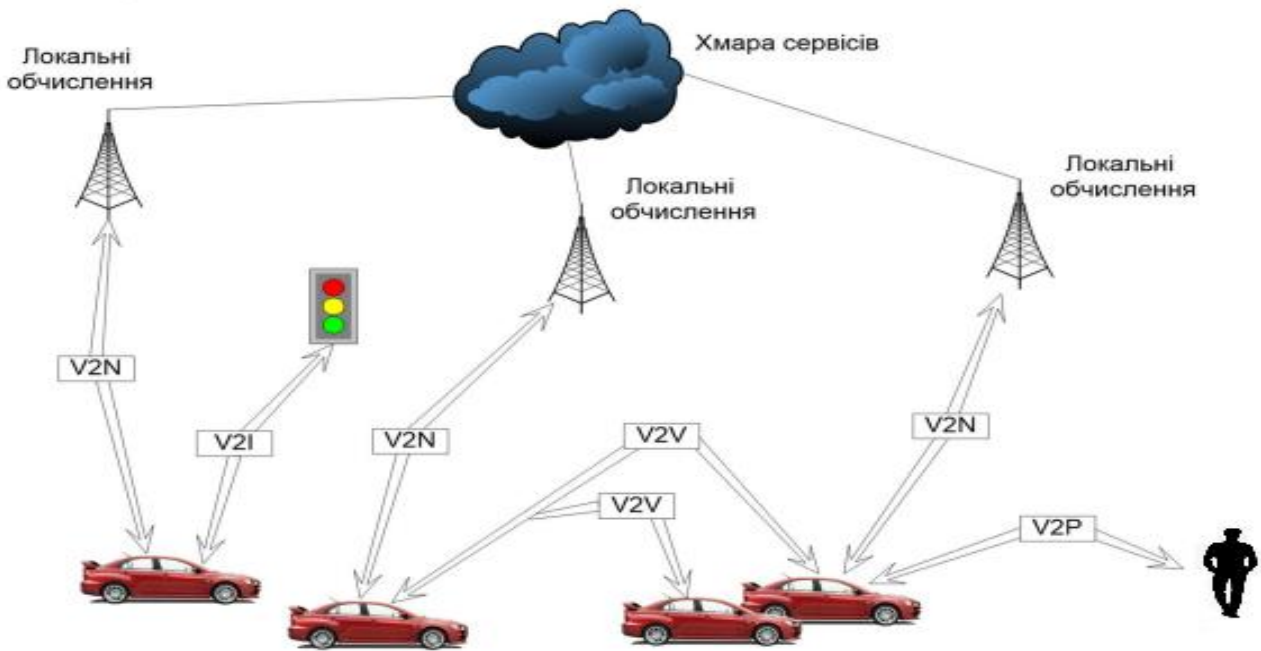
Хоча C-V2X є важливим стандартом для забезпечення комунікації електромобіля з оточуючим середовищем, він не єдиний претендент на провідну роль. Його конкурентом є DSRC, або 802.11p, що базується на стандарті Wi-Fi. DSRC включений до ряду прийнятих стандартів, таких як американські SAE J2735 та SAE J2945, європейський ITS G5 та японський ARIB STD-109, і вже використовується для певних завдань, переважно в США, наприклад, для внесення плати за використання доріг [6].

Обидва стандарти мають свої переваги та недоліки. Основна перевага DSRC полягає в його готовності з погляду стандартизації. Крім того, будучи заснованим на стандарті Wi-Fi, DSRC працює на менш завантажених частотах, ніж стільниковий зв'язок. Однак дальність дії DSRC відносно невелика, що потребує створення мережі з великою кількістю точок доступу, і модель монетизації послуг DSRC є не зовсім зрозумілою.

Стандарт C-V2X позбавлений цих недоліків, оскільки для його застосування не потрібно розгортання спеціальної мережі, а проблема монетизації може бути легко вирішена за допомогою спеціальних тарифів стільникових операторів. Ще однією перевагою C-V2X перед DSRC є його більша захищеність, що важливо для комунікацій між електромобілем та оточуючим середовищем, які передбачають обмін конфіденційною інформацією та вплив на безпеку руху.

Крім того, C-V2X передбачає можливість прямого спілкування між транспортними засобами за допомогою служби Proximity Service (ProSe) через інтерфейс PC5, рис. 1. Це забезпечує певну незалежність комунікаційної системи від доступності мережі стільникового зв'язку і може бути особливо корисним у важкодоступних місцевостях, принципово важливою може виявитися навіть не дуже велика можливість того, що повідомлення буде передано послідовно через декілька

електромобілів, що їдуть один за одним. Це особливо актуально, коли мова йде про рятувні заходи для людських життів. У сценаріях, де це стає більш ймовірним, прямий зв'язок між транспортними засобами дозволяє отримувати інформацію від інших декількох електромобілів про дорожні ситуації, які знаходяться поза межами видимості водія, швидше і надійніше, що сприяє попередженню аварій.



Рисунк 1. Схема комунікації у технології V2X [7]

Отримання інформації про місцезнаходження та синхронізація також є невід'ємною частиною систем комунікації електромобіля з оточуючим середовищем, і в C-V2X це реалізується за допомогою сервісів глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС).

Незважаючи на можливість використання існуючих мереж для застосування стандарту C-V2X, повноцінне впровадження стикається з рядом проблем. Одна з них - різке збільшення кількості абонентів, з яким мережа може не впоратися. Ще одна з причин, чому початок широкого використання C-V2X лише зведення в експлуатацію мереж п'ятого покоління - 5G. На даний момент стандарт 3GPP прийнятий, та затверджений. Однак європейські країни більшою мірою орієнтовані на нього, і, ймовірно, для України він також представлятиме більший інтерес, ніж DSRC.

З повноцінним розгортанням систем V2X пов'язані інші складності, незалежно від обраного стандарту. Враховуючи те, що ці системи безпосередньо впливатимуть на безпеку дорожнього

руху, виникає питання про підтвердження вимог безпеки під час розвитку стандартів

Особливо важливим фактором є кібербезпека, оскільки транспортні засоби можуть експлуатуватися в різних країнах, тому необхідно забезпечити відповідність міжнародним та регіональним вимогам.

Також, важливо забезпечити взаємозамінність модулів, оскільки системи можуть будуватися на апаратурі різних виробників. Ще однією особливістю систем V2X є необхідність безперебійної роботи в умовах інтерференції, особливо в міських умовах, де радіочастотна обстановка складна і підсилюється перевідображеннями від будівель та інших об'єктів.

З асоціацією 5GAA і регламентуючими організаціями очікується, що список складнощів розгортання систем V2X буде розширюватися, проте зазначені проблеми повинні враховуватися в системах тестування V2X вже зараз.

На рівні програм застосування стандартів C-V2X та DSRC не матиме значних відмінностей для користувача. З точки зору кінцевого

користувача, на якому стандарті ґрунтується комунікація між електромобілем та зовнішнім середовищем, не буде великого значення. Водночас, на рівні протоколів та структури мережі між стандартами існують істотні відмінності, і конкретні рішення для тестування також будуть відрізнятися.

Тестування систем C-V2X вимагає оцінки різних параметрів, які визначають їхню ефективність і надійність. Основними вимірюваними параметрами при тестуванні систем C-V2X є:

- затримка - час, необхідний для передачі сигналу між двома пристроями або вузлами;

- надійність передачі (PER) - коефіцієнт помилок пакетів, який вказує на частку переданих пакетів, що містять помилки;

- перешкоди та сумісність - можливі перешкоди у передачі сигналу та сумісність з іншими пристроями чи системами;

- дальність дії (чутливість) - максимальна відстань, на яку може бути отриманий сигнал з визначеної точності;

- адаптація до завантаженості мережі - здатність системи працювати ефективно при високому навантаженні мережі.

- максимальні відносні швидкості транспортних засобів - максимальна швидкість, при якій система може ефективно передавати дані між електромобілями;

- динамічні спотворення у каналах - зміни у каналі зв'язку, які можуть впливати на якість та швидкість передачі;

- пропускна здатність - максимальна швидкість передачі даних через систему;

- точність визначення координат за допомогою ДПСС - точність, з якою система може визначати місцезнаходження на основі сигналів ГНСС;

- функціональна сумісність (узгодженість) - можливість системи працювати разом з іншими системами та пристроями без конфліктів;

- безпека каналу - заходи для захисту від несанкціонованого доступу та атак на канал зв'язку;

- характеристики антен та інше - властивості антен, які можуть впливати на якість зв'язку та прийом сигналу.

Для реалізації тестування систем C-V2X використовуються три основні рішення:

- РЧ-тестування всього ланцюжка, включає високочастотні тести, перевірки протоколів, тестування стека та функціональний контроль;

- емуляція ГНСС для синхронізації за місцем та часом, дозволяє емулювати сигнали від різних

супутників для точного позиціонування та синхронізації;

- верифікація та налагодження: Включає в себе перевірку результатів тестів і налаштування системи для оптимальної продуктивності;

Сигнальне РЧ-тестування C-V2X відрізняється від тестування пристроїв стільникового зв'язку тим, що воно включає не лише реєстрацію та перевірку пристрою в емульованій мережі, але й емуляцію реального середовища, включаючи інші транспортні засоби, пішоходів, дорожні події і т. д. Тестований модуль підключається до емулятора мережі і емулятора навігаційного сигналу, після чого запускається певний сценарій для функціонального контролю пристрою, рис. 2. Наприклад, одним з таких сценаріїв може бути ситуація руху з попередженням про аварію на дорозі, де може бути емульована видача попередження, як від базової станції, так і від іншого транспортного засобу [8].

Для несигнальних тестів на етапі досліджень і розробки використовуються аналізатори спектру і програмні засоби, які ґрунтуються на стандарті.

Keysight пропонує рішення для несигнальних ВЧ-тестів абонентських пристроїв у виробництві, такі як комплект для тестування засобів бездротового зв'язку EXM E6640A, який містить генератор і аналізатор сигналів, що дозволяє оптимізувати часові витрати при виробничому тестуванні.

При розгортанні системи C-V2X на основі мереж 5G передбачається використання міліметрового діапазону, що створює нові вимоги для тестування через неможливість виконання вимірювань при високих частотах через коаксіальний кабель. Це може призвести до застосування бездротових камер і організації бездротового тестування ("по повітрю"), для чого Keysight також має ряд рішень.

Проблема використання спрямованого проміння базової станції виникає через складність реалізації цього процесу, як на апаратному, так і на програмному рівні. Пристрої повинні мати можливість визначати, коли на них спрямований промінь, тоді як базова станція повинна направляти промінь відповідно до певного алгоритму, заснованого на поточних умовах. Наприклад, якщо на деякому відрізку дороги утворюється затор електромобілів, базова станція в цьому напрямку повинна забезпечувати передачу більшого обсягу даних і направляти промінь відповідно до цих умов. При зміні дорожньої обстановки вона повинна також адаптувати напрямок променів. Це вимагає розробки нових видів тестів, і такі тести вже реалізовані Keysight у їхніх рішеннях з використанням емулятора каналів PropSim.



Рисунок 2. Конфігурація для сигнального тестування модуля C-V2X

Висновки

Впровадження безпілотних електромобілів у транспортну систему може справді значно вплинути на повсякденне переміщення. Дані свідчать про те, що популярність та поширення безпілотних електромобілів зростають у всьому світі. Вони можуть підвищити безпеку дорожнього руху завдяки використанню передових систем безпеки, хоча все ще потребують подальшого вдосконалення. Крім того, безпілотні електромобілі можуть підвищити ефективність використання дорожньої інфраструктури, скоротити затримки та покращити завантаження доріг. Це може призвести до збільшення прохідності та скорочення часу в дорозі. З економічного погляду, впровадження безпілотних електромобілів може призвести до зменшення витрат на паливо, страхування та обслуговування, а також створення нових робочих місць. Однак необхідно приділити увагу розвитку нормативної бази та правовому регулюванню, щоб забезпечити безпеку та ефективність використання безпілотних електромобілів. Загалом, безпілотні електромобілі відкривають нові перспективи для покращення транспортної системи.

Література

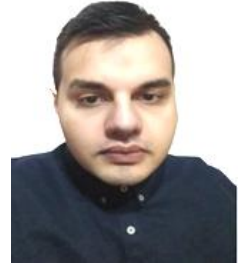
- [1]. V2X Wiki.URL: <https://www.autotalks.com/technology/v2x-wiki/>
- [2]. What Is Vehicle To Vehicle OR V2V Communication Technology? URL: <https://carbiketech.com/vehicle-to-vehicle-v2v-communication/>
- [3]. What is Vehicle to Infrastructure V2I Technology? URL: <https://blog.rgbsi.com/what-is-v2i-technology>
- [4]. Making the connection with Vehicle to Network(V2N).URL:<https://blog.rgbsi.com/connection-with-vehicle-to-network-v2n>
- [5]. Vehicle-to-everything (V2X): V2V, V2I, V2P, V2N & V2H vorgestellt. URL: <http://www.fuehlerscheinblog.de/2019/07/06/vehicle-to-everything-v2x/>
- [6]. Dedicated Short-Range Communications (DSRC) Standards in the United States.URL: https://www.researchgate.net/publication/224242297_Dedicated_ShortRange_Communications_DSRC_Standards_in_the_United_States

[7]. Лушпол Т.Ю. Використання технології V2X для контролю руху і управління автотранспортом: дипломна робота бакалавра: 171 Електроніка. - Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 63 с.

[8]. Chen, S., Hu, J., Shi, Y., Zhao, L., & Li, W. (2020). A vision of C-V2X: Technologies, field testing, and challenges with Chinese development. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(5), 3872-3881.

Відомості про авторів

Владислав Латвинський, асистент кафедри автомобільної електроніки, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, [ORCID ID: 0009-0002-4891-2925](#).



Руслан Багач, асистент кафедри автомобільної електроніки, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, [ORCID ID: 0000-0003-0157-5933](#).



Самохвалов В.С., Шостак В.П., Воїнов О.П. ✉

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

Анотація

Ключові слова: морський бойовий дрон, пропульсивний комплекс, невразливість, радіолокаційне спостереження, підрулюючий пристрій, рухомий об'єкт

Метою дослідження є пошук шляхів підвищення невразливості морських бойових дронів (МБД) на основі підвищення їх маневреності та протидії передбачення напрямку руху. Методом дослідження обрано системно-структурний підхід для визначення та обґрунтування існуючої проблеми. Об'єктом дослідження є процеси, які забезпечують рух МБД. Предметом дослідження виступають параметри процесу руху МБД. На основі виконаного аналізу існуючої проблеми, яка полягає у вразливості МБД, запропоновано за рахунок допоміжного рушія та зміни форми корпусу МБД досягти покращення його маневрових властивостей і, як наслідок, завдяки непередбаченості траєкторії руху, забезпечити невразливість.

Вступ

На сучасному етапі розвитку озброєння застосування МБД вважають доцільним.

Пошуки нових технічних рішень тривають.

Стратегічно отримає перемогу в цьому поєдинку той, хто перший реалізує нестандартні рішення, які забезпечують невразливість МБД.

Актуальність досліджень

Один із шляхів удосконалення пропульсивних комплексів МБД передбачає використання акустичної мімікрії [1]. Але для досягнення невразливості МБД цього недостатньо, тому, що це не перешкоджає головному – протидії зустрічі МБД і снаряду, який здатний його зруйнувати. Таким чином, пошук шляхів ухилення МБД від снаряду є актуальним.

Формулювання цілей. Метою дослідження є пошук шляхів підвищення невразливості МБД на основі підвищення їх маневреності та протидії передбачення напрямку руху.

Викладення основного матеріалу

Після того, як засобами радіолокаційного спостереження ворогом ціль МБД буде виявлено, для здійснення її ліквідації ворог буде безперервно відслідковувати 3 основні її параметри:

1) дальність до цілі (МБД); 2) його швидкість; 3) кут міста цілі. Бортовий електронно-обчислювальний центр, отримавши цю інформацію, буде розв'язувати задачу розрахунку місця зустрічі МБД і снаряда, який буде його переслідувати.

Для того, щоб МБД ухилився від зустрічі зі снарядом, необхідно стохастично, за допомогою додаткових, як правило бортових, рушіїв [2] змінювати курс його руху.

Свого часу, авторами було запропоновано використовувати ці бортові рушії в якості суднових підрулюючих пристроїв. До того ж, вони були успішно використані і в якості пневмо-імпульсних насосів, здатних перекачувати ньютонівські рідини.

Особливість цього технічного рішення полягає в тому, що робочий процес розпочинається в двигуні, а закінчується в рушії, що і зумовлює його компактність.

Порівнюючи технічні рішення стосовно принципів дії пропульсивних комплексів, запропонованих у [3] і [2], слід відмітити, що в [3] осцилюючі рухи пластини в секторальному каналі схожі з рухами риб'ячого хвоста, а в [2] реактивну тягу створюють постріли водяних снарядів і схожі з рухами іншого гідробіонта – кальмара. Таким чином, наявність двох рушіїв у МБД, а у снаряда (або ж ракети і навіть керованої) - тільки один рушії, значно ускладнює рішення задачі зустрічі МБД з переслідуючим його снарядом.

Також слід відзначити, що МБД наближається до цілі не по прямій лінії, а хаотично. Передбачити очікуване місце з'явлення рухомого об'єкту (МБД), який по заданій програмі здійснює хаотичні рухи, не під силу навіть штучному інтелекту.

Таким чином, якщо раніше [2] було запропоновано використовувати підрулюючий пристрій для дотримання заданого курсу судна, то для

МБД, за яким полює ворог, виникає протилежна задача – забезпечити таку траєкторію пересування, яка для ворога є не передбаченою, і тому вірогідність рішення задачі зустрічі снаряда і МБД є випадковим явищем.

З огляду на те, що від рухомого об'єкта МБД вимагається миттєво змінювати напрямок руху, але цьому заважають як інерційні сили, так і традиційна довга форма корпусу МБД, то доцільно її замінити на круглу. На нашу думку, це значно покращить маневрові властивості МБД.

В майбутньому привабливим може бути такий стратегічний напрямок розвитку МБД, який передбачає їх здатність невизначений час очікувати ціль (корабель) в заздалегідь визначеному місці. І потім несподівано атакувати його як у підводному, так і надводному режимі і навіть в повітрі (накшталт летючим рибам) по заздалегідь не передбаченим територіям. Таким чином, скринька Пандори є відкритою, і з неї вже сьогодні виповзають, впливають і вилітають різноманітні бойові дрони, і їхні можливості обмежені лише інтелектуальними здібностями як природного, так і штучного інтелекту.

Висновки

Для МБД запропоновано два рушія: маршовий – головний та маневровий – допоміжний для забезпечення непередбаченого для ворога курсу МБД згідно з програмою його включення в роботу.

Покращення маневрових властивостей МБД можна досягти за рахунок заміни довгастої форми його корпусу на круглу.

Література

[1]. Самохвалов В.С., Воїнов О.П., Воїнова С.О., Кобалава Г.О. Шляхи вдосконалення пропульсивних комплексів морських бойових дронів. *Сучасні інформаційні технології на транспорті* (МІНТТ-2023), 24-25 травня 2023 року. С. 131-132.

[2]. Патент України № 513572 А. МПК В63Н 11/02. Гідрореактивний судновий двигун / Самохвалов В.С., Ткаченко С.Г., Івачов В.Ф., Смагін Д.М. Заявл. 01.03.2002 №20002031722. Опубл. 15.11.2002. Бюл. №11. 2 с.

[3]. Патент України № 18438 У. МПК В63Н 11/02. Гідрореактивний судновий двигун / Самохвалов В.С., Ткаченко С.Г., Цвікліс В.С., Багенько М.Ю., Махонько О.В. Заявл. 18.04.2006 №4200604326. Опубл. 15.11.2006. Бюл. №11 4 с.

Відомості про авторів

Віктор Самохвалов, к.т.н., доцент, доцент кафедри теплотехніки, Херсонський навчально-науковий інститут НУК ім. адмірала Макарова, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0003-0264-4881](https://orcid.org/0000-0003-0264-4881).



Володимир Шостак, к.т.н., професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та теплоенергетики, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-8071-389X](https://orcid.org/0000-0002-8071-389X).



Олександр Воїнов, д.т.н., професор, професор кафедри теплотехніки, Херсонський навчально-науковий інститут НУК ім. адмірала Макарова, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-7548-4212](https://orcid.org/0000-0001-7548-4212).



Serhii Savchenko, Vladyslav Polyvoda[✉]

Kherson State Maritime Academy, Ukraine

Annotation

Keywords: Ship boiler, Automation, Control System, Modeling, Human Machine Interface.

This research deals with the automation of ship boiler systems in the maritime sector. The study introduces a precisely controlled boiler system, highlighting practical applications over technical details. Boilers, serving as the driving force behind propulsion and essential ship functions, generate steam for various purposes. The requirements for automation of boiler control systems are driven by the complex nature of marine operations and include ensuring continuous reliability, efficiency and safety. The integration of advanced control systems is a critical aspect of improving performance and minimizing operational risks associated with the use of boilers on ships.

Introduction

Boiler plays a fundamental role in marine vessels, serving as the one of the main systems for propulsion and essential auxiliary functions. They generate steam, which is essential for driving propulsion systems, facilitating heating, and powering various on-board systems [1].

Main boiler components are: furnace, boiler shell, water tubes, steam drum, burner, economizer, feed pump, safety valve. The aim of this study is to design a model of boiler automated control system without focusing on specific technical details.

Automation in boiler control is critical due to the delicate nature of maritime operations, where reliability, efficiency and safety are essential. The integration of advanced control systems is critical to improve performance and to minimize operational risks associated with the use of boilers on ships.

Relevance of the research

Nowadays in maritime world, automating ship-board boiler systems is incredibly important. With more maritime traffic and a global push for eco-friendly practices, there's a growing need for efficient automated boiler control systems. Precise control of boilers not only boosts safety but also saves fuel and helps the environment. This study with CODESYS software for boiler automation is especially relevant for addressing current challenges and adapting maritime practices to new technology and environmental awareness.

Presentation of the main material

To build an automated control system, it is necessary to develop a mathematical model of the control object - the ship boiler. Control object (ship boiler) could be represented by an inertial link block (a first-order aperiodic link), the transfer function of which is given by [2]:

$$W(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{k}{1 + T \cdot s}, \quad (1)$$

where k is the gain coefficient and T is the time constant. The differential equation in Laplace form takes the following form:

$$kx(s) = y(s)(1 + T \cdot s). \quad (2)$$

The corresponding finite difference equation for it can be expressed as:

$$kx(t) = y(t) + T \cdot \frac{y(t + \Delta t) - y(t)}{\Delta t}. \quad (3)$$

From this equation, it could be found:

$$y(t + \Delta t) = y(t) + \frac{(kx(t) - y(t)) \cdot \Delta t}{T}. \quad (4)$$

This equation allows to utilize continuous models of real control objects in digital control systems by substituting these models with their discrete

counterparts.systems by substituting these models with their discrete analogues.

Parameters of the model k and T are taken as follows:

$$k = 1,16; T = 5,36.$$

Control system model was developed in the CODESYS Automation Platform.

The project created with the following modules: *Library Manager*, *Boiler Module* - discretized model of the control object in the form of a function block (FB), *PLC_PRG* - control system diagram, *Visualization* - model visualization [3].

Standard Util library was added to enable of using a standard PID controller block in the designed control system model.

Discretized model of the control object was implemented in the form of a function block (FB), to

write the model (4) use the ST (Structured Text) - programming language (Figure 1).

The Human Machine Interface (HMI) of the control system diagram was made in the form of a Continuous Function Chart, CFC (Figure 2).

```

BoilerModule x Library Manager
1 FUNCTION_BLOCK BoilerModule
2 VAR_INPUT
3 In: REAL;
4 k: REAL;
5 T: REAL;
6 ddt: REAL;
7 END_VAR
8 VAR_OUTPUT
9 Out: REAL;
10 END_VAR
1 Out:=Out+(k*In-Out)*ddt/T;
2
    
```

Figure 1. Implementation of the control object model using the ST

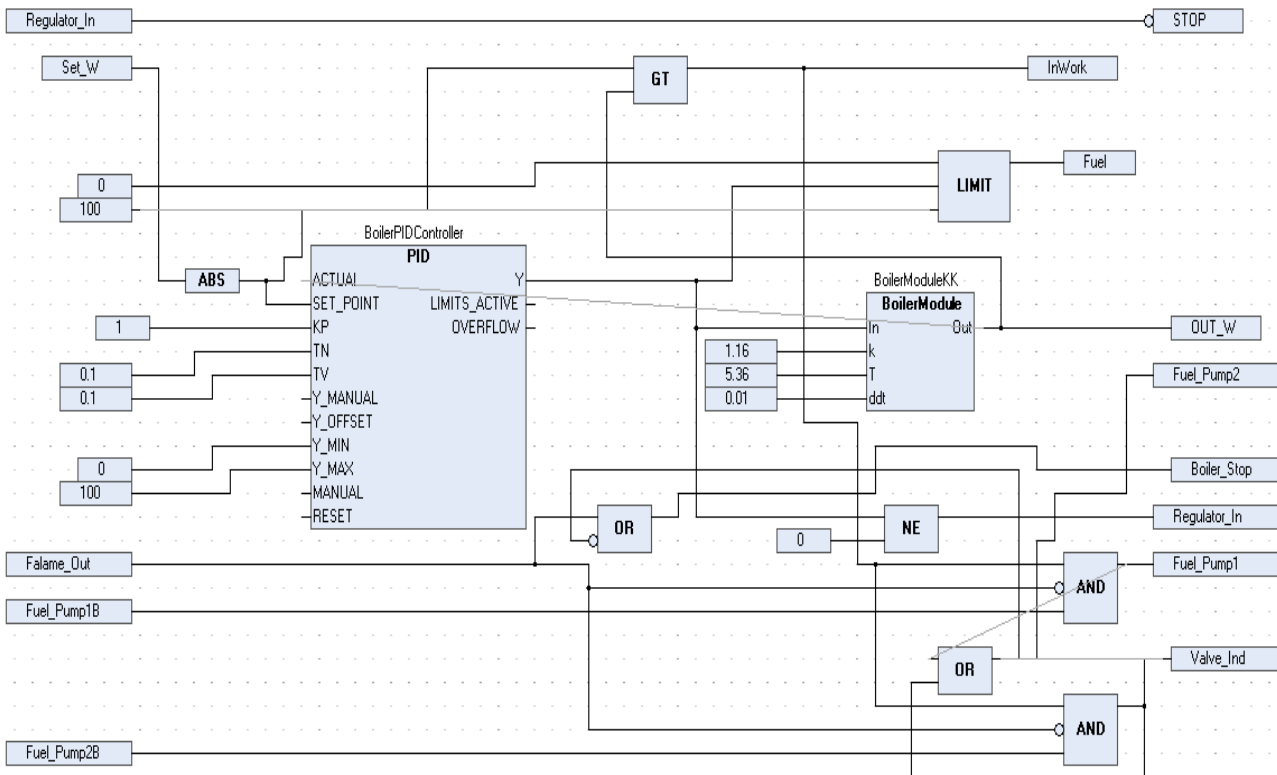


Figure 2. CFC scheme of the control system

Visual part of our control system was built using the standart visualization toolbox, the visual objects such as buttons, lamps, regulating elements will correspond to some input/output elements in the Continuous Function Chart.

During building the visual part, operation elements of the Continuous Function Chart were

connected to the corresponding visual elements of the HMI.

ImagePool was used to improve the visual part, its allowed to use any kind of figures or photos. Figures such as boiler, pumps, valves, nozzle, were added (Figure 3).

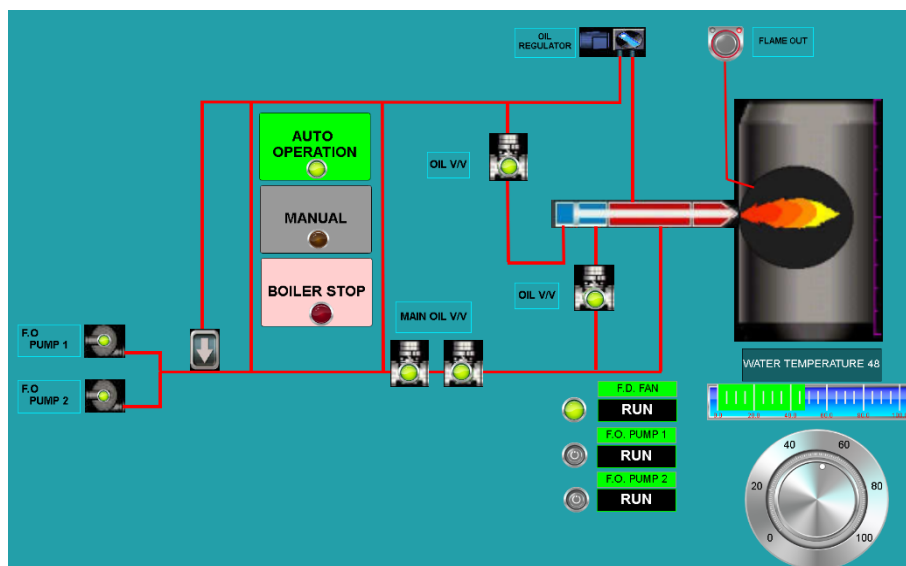


Figure 3. Designing of the HMI display

System was tested, operation of all components were checked. After making corrections, system works correctly, according to safety requirements. The temperature changes according to the set value, the system works with one or two pumps at the same time. When the pumps are turned off or a certain temperature is reached, the system closes the fuel valves, stopping the operation of the boiler, switching to the corresponding indication "BOILER STOP" under this condition, it will be impossible to start the boiler.

"Flame out" condition was also implemented, a situation in which the flame of the burner goes out, and when it occurs, the boiler automatically stops by closing all the fuel valves. After solving the problem of flame out, it is necessary to restart the boiler in manual mode.

Conclusions

Working with the design and construction of this automation system, a potential for its improvement and use was revealed. To improve the system and increase its functionality, the water level sensor, the ability to adjust amount of fuel and air, additional control system failure scenarios, delay for opening and closing valves and the ability to operate them in manual mode could be added. With possible upgrades, this system will be useful for training new personnel. This work can also be used to teach cadets of maritime universities to manage ship boilers, to practice the procedure for starting or stopping it, to get practical skills to correct emergency situations that may occur during its work.

References

[1]. Encyclopedia of Marine and Energy Technology. Marine Boiler. [Online] URL:

<https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/boiler>
Last accessed: 07.03.2024.

[2]. Polyvoda Vladyslav, Polyvoda Oksana. Engineering of Virtual Training Simulators Using CODESYS Automation Platform. International Scientific-Practical Conference «Development Of Social And Engineering Innovation In Maritime Education And Training To Ensure Shipping Safety», 23 March 2023. – Klaipeda: Lithuanian Maritime Academy. pp. 93-97.

[3]. Проектування систем автоматизації на платформі CODESYS: навч. посіб. / В.В. Поливода, О.В. Поливода. – Херсон : ХДМА, 2023. – 248 с. ISBN 978-966-2245-78-3

Authors' information

Serhii Savchenko, master's student of the Ship Electrical Equipment and Automatic Devices Operation Department, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, [ORCID ID: 0009-0004-3213-8327](https://orcid.org/0009-0004-3213-8327).



Vladyslav Polyvoda, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Ship Electrical Equipment and Automatic Devices Operation Department, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, [ORCID ID: 0000-0001-7742-255X](https://orcid.org/0000-0001-7742-255X).



МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАЗЕМНИХ ТРАНСПОРТНИХ АПАРАТІВ

Сохацький А.В.^{1,2}, Арсенюк М.С.¹

¹ Інститут транспортних систем та технологій Національної академії наук України

² Університет митної справи та фінансів, Україна

Анотація

Ключові слова: аеродинаміка транспортних апаратів, числове моделювання, рівняння Нав'є-Стокса, моделювання турбулентності.

Розглядається проблема визначення аеродинамічних характеристик транспортних апаратів. Розрахунок таких течій залишається однією з найбільш складних проблем. Це пов'язано з відсутністю в обчислювальній аеродинаміці універсальних математичних моделей турбулентності. Надійне передбачення характеристик турбулентних потоків, відноситься до винятково важливої наукової проблеми і пов'язане з складністю та недостатнім вивченням турбулентності як фізичного явища. Для опису течії навколо транспортного апарата використано осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса. Для їх замикання застосовано двопараметричну модель турбулентності SST Менгера. Модель SST. Розроблено методику, алгоритм розв'язування задачі, та програмне забезпечення. Задача розв'язувалася в багатоблочній постановці. Проведено тестування розробленої методики на стандартних задачах аеродинаміки.

Вступ

Аеродинамічні процеси навколо швидкісних транспортних апаратів є одним із основних факторів, що істотно впливають на експлуатаційні їх характеристики. Для визначення аеродинамічних характеристик використовується математична модель стисливого газу, що ґрунтуються на рівняннях Нав'є-Стокса [1,2,3]. Складності додає той факт, що реальні течії є турбулентними. Розрахунок турбулентних течій і на теперішній час залишається однією з найбільш складних проблем, а надійне передбачення характеристик турбулентних потоків, що представляють практичний інтерес, як і раніше є швидше виключенням, ніж правилом, що пояснюється винятковою складністю турбулентності як фізичного явища [1-5]. В роботі викладено особливості математичного моделювання аеродинаміки транспортних апаратів на основі моделей в'язкого газу з використанням осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса.

Актуальність досліджень

Реальні течії навколо транспортних апаратів є турбулентними. Розрахунок таких течій залишається однією з найбільш складних проблем. На сьогодні в обчислювальній аеродинаміці

відсутні точні математичні моделі турбулентності. Надійне передбачення характеристик турбулентних потоків, відноситься до винятково важливої наукової проблеми і пов'язане з складністю та недостатнім вивченням турбулентності як фізичного явища. Математичне моделювання турбулентних течій і на сьогодні залишається виключно актуальною проблемою, хоча і спостерігається швидкий розвиток теоретичної та обчислювальної аеродинаміки. Не дивлячись на величезний прогрес обчислювальної техніки та аеродинаміки, її можливості все ще далеко не достатні для розв'язування цих рівнянь. Вважається високих чисел Рейнольдса, які представляють практичний інтерес на транспорті, навіть за найоптимістичнішими прогнозами, проблеми моделювання турбулентних течій залишатимуться такими принаймні аж до кінця XXI століття [1,2].

Викладення основного матеріалу

Для розв'язування задачі з розрахунку характеристик течії навколо наземного транспортного засобу обрано модель течії в'язкого стисливого газу, що описується осередненими за Рейнольдсом рівняннями Нав'є-Стокса. Розрахункова область навколо транспортного апарата є складною, тому доцільно використовувати

багатоблоковий підхід та криволінійну систему координат. Система осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса для довільної криволінійної системи координат запишеться

$$\frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \frac{\partial(\hat{E} - \hat{E}_v)}{\partial \xi} + \frac{\partial(\hat{F} - \hat{F}_v)}{\partial \eta} + \frac{\partial(\hat{G} - \hat{G}_v)}{\partial \zeta} = \hat{H}, \quad (1)$$

де \hat{Q} – вектор невідомих змінних;

$\hat{E}, \hat{F}, \hat{G}$ – вектори нев'язких потоків;

$$\hat{E}_v = \xi_x E_v + \xi_y F_v + \xi_z G_v,$$

$$\hat{F}_v = \eta_x E_v + \eta_y F_v + \eta_z G_v,$$

$$\hat{G}_v = \zeta_x E_v + \zeta_y F_v + \zeta_z G_v \text{ – вектори в'язких потоків;}$$

$$\hat{H} = 1/j H \text{ – вектор джерельних членів.}$$

В системі рівнянь (1) n-компонентні вектори $\hat{Q}, \hat{E}_i, \hat{F}_i, \hat{G}_i, \hat{E}_v, \hat{F}_v, \hat{G}_v$ мають відповідний вигляд в залежності від моделі турбулентності.

Для замикання системи рівнянь (1) використано модель турбулентності SST (Shear Stress Transport) Ментера [4]. В загальному вигляді ця система рівнянь запишеться

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - Y_k, \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \omega)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega, \end{aligned} \quad (2)$$

де G_ω – генерація дисипації кінетичної турбулентності ω на одиницю k ;

Y_k – дисипація кінетичної енергії турбулентності;

Y_ω – дисипація кінетичної турбулентності ω ;

$\Gamma_k = \mu + \mu_t / \sigma_k$, $\Gamma_\omega = \mu + \mu_t / \sigma_\omega$, D_ω – перехресний дифузійний член.

Модель турбулентності SST є комбінацією $k - \varepsilon$ і $k - \omega$ моделей турбулентності. Для розрахунку течії у вільному потоці використовуються рівняння $k - \varepsilon$ моделі, а в області поблизу стінок – рівняння $k - \omega$ моделі. Вимоги до щільності сітки тут ті ж, що і у $k - \omega$ моделі і низькорейнольдсової $k - \varepsilon$ моделі. Ця модель турбулентності позбавлена ряду недоліків початкових $k - \varepsilon$ і $k - \omega$ моделей. Вважається, що модель SST за якістю перевершує ряд інших моделей турбулентності. Проте за обчислювальною простотою і витратам вона поступається моделям з одним рівнянням [1-5].

Для числового розв'язування системи рівнянь (3) використано метод контрольного об'єму.

Отримана система алгебраїчних рівнянь розв'язувалася методом Гаусса-Зейделя. Розроблена методика, алгоритми та програмне забезпечення тестувалося на ряді стандартних задач: обтіканні поперечно розміщеного колового циліндра та кулі. Проведене тестування показало придатність розробленої методики, алгоритмів та програмного забезпечення.

Для полегшення моделювання конкретної геометрії її доводиться спрощувати. Так, завдяки експериментальним роботам Ahmed S.R. [6] з'явилася універсальна спрощена модель погано обтічного транспортного засобу, яку використовують дослідники всього світу в числовому моделюванні та розв'язуванні прикладних задач аеродинаміки наземних транспортних засобів, в тім числі автомобілів [6].

Для проведення обчислювального експерименту була обрана модель транспортного засобу Ahmed Car [6]. Вона уявляє собою спрощену геометрією погано обтічного транспортного засобу – шестигранну призму із заокругленою передньою частиною та скосом верхньої частини корми з можливістю зміни кута нахилу (рис.1). Модель корпусу автомобіля розміщується на невеликій відстані від шляхової структури, яка імітує дорожнє полотно. В експериментальних дослідженнях, що викладені в роботах [6] швидкість потоку, що натікав на модель транспортного засобу дорівнювала 60 м/с, а число Рейнольдса становило $1.5 \cdot 10^6$, розраховане за довжиною моделі. Геометрію моделі показано на рис. 1.

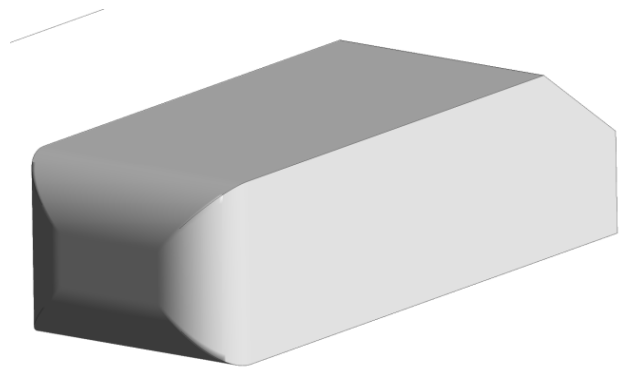


Рисунок 1. Загальний вигляд моделі транспортного засобу типу Ahmed Car

На рис. 2(а, б). показано лінії течії в площині симетрії навколо моделі корпусу транспортного засобу Ahmed Car. Результати розрахунку отримані шляхом числового моделювання для кутів нахилу кормової частини 25° та 35° . Для оцінки достовірності обчислювального експерименту на результати розрахунків порівнювалися з даними викладеними в роботах [7,8].

Спостерігається задовільне узгодження ліній течії та утворення відривного вихору. При збільшенні куту нахилу кормової частини в сліди

поблизу шляхової структури більш інтенсивно формується вторинний вихор, що спричиняє певне зростання лобового опору.



а)



б)

Рисунок 2. Лінії течії в площині симетрії моделі корпусу автомобіля Ahmed Car: а) з кутом нахилу 25° , б) з кутом нахилу 35°

За результатами числового моделювання визначено аеродинамічні характеристики моделі транспортного засобу типу Ahmed Car. Для кута заднього скоса 25° коефіцієнт лобового опору $C_d = 0.255$, а для кута заднього скоса 35° коефіцієнт $C_d = 0.268$. Для порівняння, у роботі [10] для кута заднього скосу 20° , коефіцієнт лобового опору C_d був 0.2619 та 0.2978 для кута заднього скосу 30° . За результатами експериментів Ahmed S.R. [6] отримав $C_d = 0.28$ для 25° і понад 0.38 для 30° . Gilliéron P. [11] отримав значення 0.34 і понад 0.378 для 25° і 30° відповідно. Banga S. [10] отримав значення коефіцієнта лобового опору близько 0.28 для 25° і 0.294 для 35° . Аналіз отриманих розрахункових результатів та даних робіт [6-11] показує в проведеному обчислювальному експерименті відтворюються усі відомі особливості структури потоку під час обтікання моделі корпусу типу Ahmed Car.

Висновки

Розроблено математичну модель, побудовано алгоритми, числову методику розв'язування

задачі, та програмне забезпечення моделювання течії в'язкого стисливого газу на основі розв'язування осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса. Проведено дослідження обтікання моделі транспортного засобу типу Ahmed Car та визначення його аеродинамічних характеристик. Аналіз теоретичних та практичних досліджень показує, що аеродинамічні характеристики мають основоположний вплив на експлуатаційні параметри швидкісних транспортних засобів. Таким чином для забезпечення потрібних експлуатаційних параметрів швидкісного наземного транспортного засобу необхідно урахувати його аеродинамічні характеристики. В подальших дослідженнях потрібно розв'язувати зв'язану задачу динаміки та аеродинаміки транспортного.

Література

- [1]. Garnier E., Adams N., Sagaut P. Large eddy simulation for compressible flows, Springer, 2009. 276 p. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-2819-8>
- [2] Мовчан В.Т., Шквар Е.А. Математическое моделирование пограничных слоев. *Прикладна гідромеханіка*. 2005. Том 7(79), N 3-4. С. 73 – 85

[3] Сохацький А.В. Теоретичні основи створення аеродинамічних компонувань перспективних швидкісних транспортних апаратів: дис. доктора технічних наук: 05.07.01. Дніпропетровськ. 2010. 364 с.

[4] Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 1994. v. 32, N 8. P. 1598-1605.

[5] Spalart P.R., Allmaras S.R. A one-equations turbulence model for aerodynamic flows. *AIAA paper*. 1992. Vol. 0439. 21 p.

[6] Ahmed S. R., Ramm G., Faltin G. Some Salient Features of the Time -Averaged Ground Vehicle Wake. – SAE Transactions, Vol. 93, Section 2: 840222—840402 (1984), pp. 473-503.

[7] Viswanathan H. Aerodynamic performance of several passive vortex generator configurations on an Ahmed body subjected to yaw angles. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2021. N: 131. 43:131. p. 1-2.

[8] Lienhart H., Becker, S. Flow and turbulence structure in the wake of a simplified car model. SAE Technical Paper 2003-1-0656.

[9] Lienhart H., Stoots C., Becker S. Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified Car Model (Ahmed Model). *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics III*. 2002. Volume 12. p. 323–330.

[10] Banga S., Zunaid Md., Ahmad N.A., Sharma S., Dngriyal R.S. CFD Simulation of

Flow around External Vehicle: Ahmed Body. *Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)* e-ISSN: 2015. Volume 12, Ver. III. P. 87-94.

[11] Gilliéron P., Chometon F. Modelling of stationary three-dimensional separated air flows around an Ahmed reference model. *Conference: ESAIM, Third International Workshop on Vortex*. Volume 7. 1999. P. 173-182

Відомості про авторів

Анатолій Сохацький, д.т.н., професор, провідний науковий співробітник, Інститут транспортних систем та технологій НАНУ, професор кафедри транспортних технологій та міжнародної логістики УМСФ, Дніпро, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-3593-6517](https://orcid.org/0000-0002-3593-6517).



Михайло Арсенюк, провідний інженер, Інститут транспортних систем та технологій НАНУ, Дніпро, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-7805-1372](https://orcid.org/0000-0002-7805-1372).



TRANSMISSION PARAMETERS CALCULATION OF DYNAMOMETRIC LABORATORY FOR EARTH-MOVING MACHINES TESTING

Maksym Balaka✉

Kyiv National University of Construction and Architecture, Ukraine

Annotation

Keywords: dynamometric laboratory, braking force, transmission, gear ratio.

The braking class of the dynamometric laboratory should be 15...20 % higher than the traction class of earth-moving machines whose traction properties and fuel economy are being studied. For this purpose, an engineering methodology for the transmission parameters calculation of the dynamometric laboratory has been developed, taking into account the requirements for the necessary braking force formation and machines testing.

Introduction

The traction characteristic is the main technical document of off-road technological means that overcome the resistances on the working elements when interacting with the environment (soil or ground) due to the traction force generated by their driver (earth-moving and loading machines, looseners, tractors, tillage units, etc.). Traction characteristics in graphic form determine traction properties and fuel economy of these machines [1–3].

Dynamometric laboratories with different equipment are used to provide traction tests. These include a chassis with transmission, braking device, coupling device with the dynamometer for the traction force measure of the research machine, set of other measuring and recording equipment.

The creation of the national center for construction and road engineering products testing and certification will contribute to this. In the presence of such an organization, all existing and promising earth-moving machines must undergo traction tests by current regulatory documents.

Analysis of publications

The requirements for dynamometric laboratories are defined in [4], intended for off-road technological means testing – earth-moving and loading machines, looseners, tractors, etc. But at this time there is no engineering methodology for the main transmission parameters calculation of dynamometric laboratories in open print publications.

The dynamometric laboratory for earth-moving machines testing (Fig. 1) contains one driving bridge 1 and an additional support 2 according to the schematic composite solution. The driving bridge is made of two parts, I and II. Each of the parts consists, for example in part I, of the wheel

with a pneumatic tire 3, the wheel planetary gearbox 4, an additional on-board planetary gearbox 5 and the first bevel gearbox 6. The input shaft of the latter is connected to the output shaft of the second bevel gearbox 7, the input shaft of which is rigidly connected to the rotor 8 of the inductor slip coupling. Similarly, stator 9 of the inductor slip coupling is rigidly connected to the input shaft of gearbox 10 for bridge part II. The bodies of coupling 15 and gearboxes are located on the frame 16.

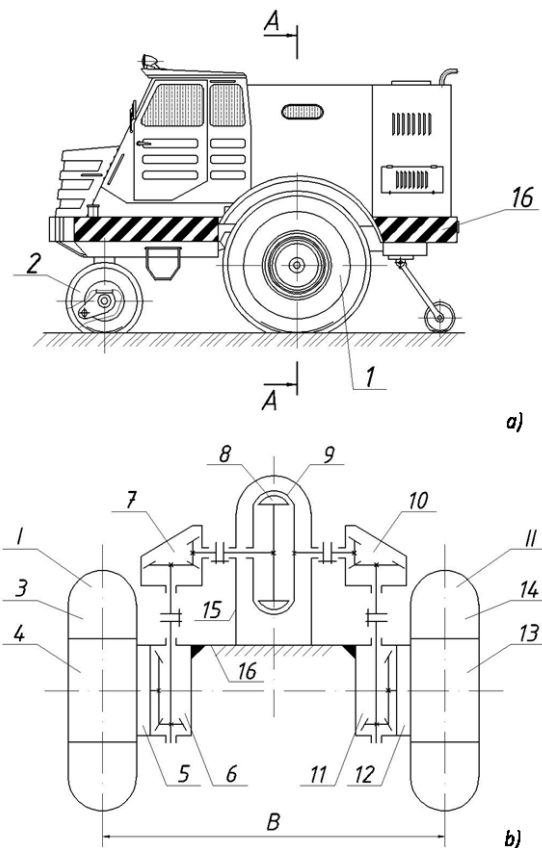


Figure 1. Schematic diagram of the dynamometric laboratory: a) side view; b) block kinematic diagram in the section A-A, B – track

The driving wheels 3 and 14 of the pulled dynamometric laboratory rotate with the same angular velocities at the time of the earth-moving machine motion (bulldozer, scraper, grader, etc.) under research, namely $\omega'_K = \omega''_K$. The rotor 8 and stator 9 of the inductor slip coupling rotate with angular velocities ω_1 and ω_2 , which are determined by:

$$\omega_1 = \omega'_K \cdot i_1;$$

$$\omega_2 = \omega''_K \cdot i_2,$$

where i_1, i_2 – total gear ratios of the kinematic chains from the driving wheel 3 to the rotor 8 and the driving wheel 14 to the stator 9 of the inductor slip coupling.

The slip S of the rotor 8 relative to the stator 9 is determined by the expression

$$S = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_2} = \frac{\omega''_K i_2 - \omega'_K i_1}{\omega''_K i_2} = 1 - \frac{i_1}{i_2}. \quad (1)$$

The analysis of expression (1) shows that the slip S does not depend on the angular velocities absolute values of the driving wheels 3 and 14. It depends only on the ratio of the total gear ratios for the kinematic chains: i_1 (driving wheel 3 – rotor 8), i_2 (driving wheel 14 – stator 9).

The gear ratio of gearbox 7 (or 10) is determined so the relative difference in the rotation frequencies of the rotor 8 and the stator 9 is equal to the nominal slip of the inductor slip coupling to ensure the working efficiency.

Research results

The main parameter of the dynamometric laboratory is the nominal braking force T_{br} . It is 100 kN at the stage of the technical task. At the same time the components of the nominal braking force are marked on the graph of the braking force formation (Fig. 2) of the dynamometric laboratory:

$$T_{br} = P_{f1} + P_{f2} + T_{brmax}, \quad (2)$$

where T_{brmax} – maximum braking force due to the brake action;

P_{f1}, P_{f2} – resistance forces to motion of the additional support and braking wheels.

Components of the nominal braking force are determined by the equations:

$$T_{brmax} = \frac{M_{brmax} \cdot i_{tr} \cdot \eta_{tr}}{r_c}; \quad (3)$$

$$P_{f1} = G_{as} \cdot f_K = \Delta G_{brK} \cdot f_K = \frac{T_{br}}{\varphi} \cdot f_K; \quad (4)$$

$$P_{f2} = G_{brK} \cdot f_K = \frac{T_{br}}{\varphi} \cdot f_K, \quad (5)$$

where M_{brmax} – maximum braking torque, kN;
 i_{tr} – transmission gear ratio of the dynamometric laboratory;
 η_{tr} – transmission efficiency;
 r_c – power radius of braking wheel, m;
 G_{as} – weight on the additional support of the dynamometric laboratory, kN;
 f_K – rolling resistance factor of the wheels;
 φ – adhesion factor of the wheel;
 G_{brK} – load on braking wheels of the dynamometric laboratory, kN.

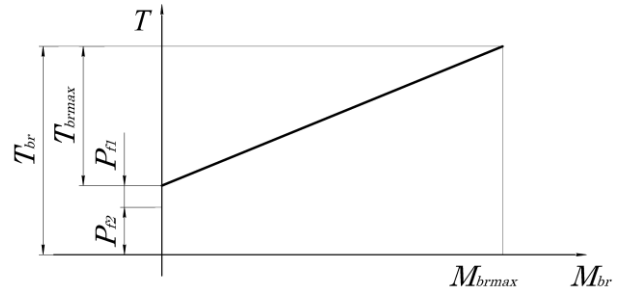


Figure 2. Graph of the braking force formation of the dynamometric laboratory

Solving equations (2)...(5) together to i_{tr} and introducing the concept of the safety factor – $k_{s.br}$ by T'_{br} , that is $T'_{br} = k_{s.br} \cdot T_{br}$, we get the expression:

$$i_{tr} = \frac{k_{s.br} \cdot T_{br} \cdot [\varphi - f_K (1 + \Delta)] r_c}{\varphi \cdot M_{brmax} \cdot \eta_{tr}}.$$

We divide the transmission gear ratio by stages, considering the diagram (Fig. 1, b):

$$i_{tr} = i_{pg1} \cdot i_{pg2} \cdot i_{bg1} \cdot i_{bg2}, \quad (6)$$

where i_{pg1} – gear ratio of the wheel planetary gearboxes for single-axle tractor bridge (positions 4, 13 in Fig. 1, b);

i_{pg2} – gear ratio of the additional planetary gearboxes (pos. 5, 12);

i_{bg1}, i_{bg2} – gear ratios of the bevel gearboxes (pos. 6, 11 and 7, 10).

$$i_{bg1} = i_{bg2} = \sqrt{\frac{i_{tr}}{i_{pg1} \cdot i_{pg2}}}$$

$$i'_{bg2} = \frac{(100 - \Delta S)}{100} \cdot i_{bg2}$$

We accept bevel gearboxes according to a single-stage gearbox scheme. To ensure the nominal slip of the stator relative to inductor slip coupling rotor in the amount $\Delta S = 5\%$, we determine the gear ratio of the bevel reducer (pos. 10 in Fig. 1, b)

We take the teeth number of the gearbox drive pinion $z_1 = 21$, then $z_2 = i'_{bg2} \cdot z_1$. We clarify the transmission gear ratio value

$$i'_{tr} = i_{pg1} \cdot i_{pg2} \cdot i_{bg1} \cdot \frac{(i_{bg2} + i'_{bg2})}{2}$$

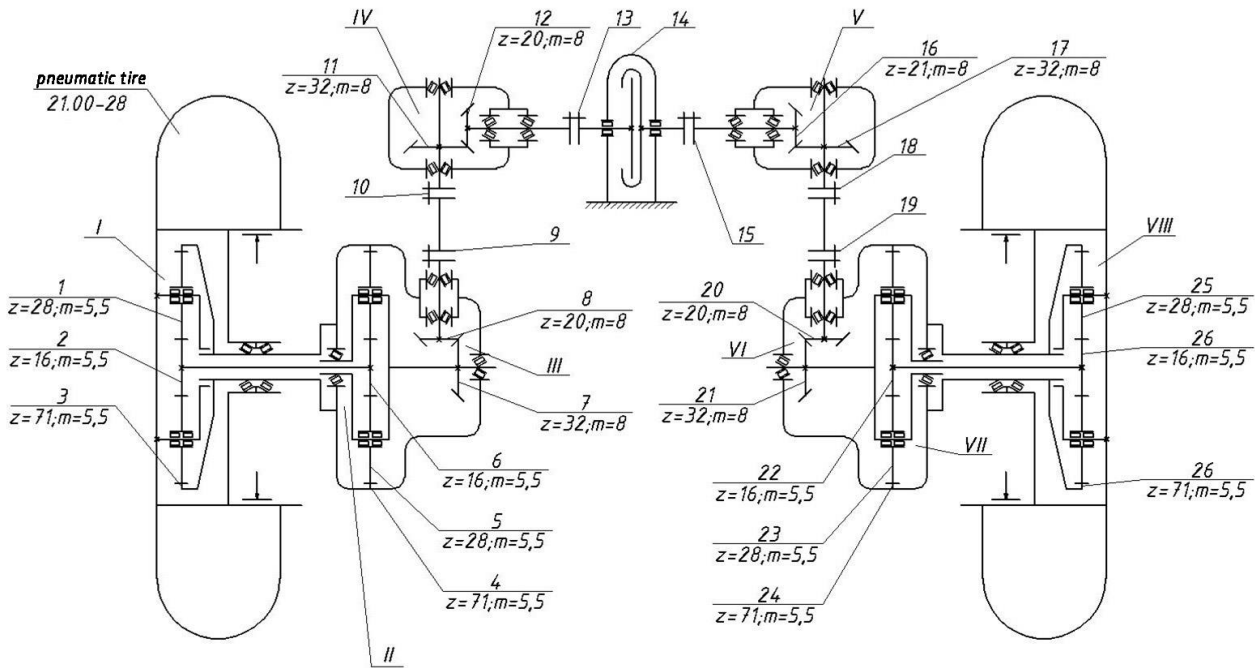


Figure 3. Transmission kinematic diagram of the dynamometric laboratory: I, VII – wheel planetary gearboxes; II, VII – additional planetary gearboxes; III, IV, VI – bevel gearboxes ($z_1 = 20$, $z_2 = 32$, $m = 8$); V – bevel gearbox ($z_1 = 21$, $z_2 = 32$, $m = 8$); 1, 5, 23, 25 – satellites of planetary gearboxes; 2, 6, 22, 26 – drive pinions of planetary gearboxes; 3, 4, 24, 26 – driven gears of planetary gearboxes; 7, 11, 17, 21 – driven gears of bevel gearboxes; 8, 12, 16, 20 – drive pinions of bevel gearboxes; 9, 10, 13, 15, 18, 19 – rigid flange couplings; 14 – inductor slip coupling

We calculate the transmission efficiency by next expression

$$\eta_{tr} = \eta_{pg1} \cdot \eta_{pg2} \cdot \eta_{bg1} \cdot \eta_{bg2}, \quad (7)$$

where η_{pg1} , η_{pg2} – efficiency of the planetary gearboxes (positions 4, 5 in Fig. 1, b);

η_{bg1} , η_{bg2} – efficiency of the bevel gearboxes (pos. 6, 7).

We clarify the safety factor value by braking force

$$k_{s.br} = \frac{i'_{tr} \cdot \varphi \cdot M_{br,max} \cdot \eta_{tr}}{T_{br} [\varphi - f_K (1 + \Delta)] r_c}$$

The transmission kinematic diagram of the dynamometric laboratory is shown in Fig. 3.

We use an ET GP125 S (Great Britain) diesel generator with the following parameters as a power source for the inductor slip coupling ISC-160 (position 14 in Fig. 3): synchronous generator with 125 kW nominal capacity, four-stroke diesel engine with direct injection 6068TF258 with 135 kW nominal capacity, 140 liters fuel tank capacity, 1,900 kg structural weight. We accept products from the MoAZ-546 single-axle tractor [5] as the main components of the dynamometric laboratory.

Lubrication of units and aggregates is carried out by the technical conditions [6, 7] for the working fluids use at the time of the self-propelled earth-moving and loading machines operation.

Concrete or asphalt pavement (reference surface) and cohesive soil (loam) are used as the support surface during these machines testing.

Conclusions

It should be noted that the braking class of the dynamometric laboratory should be 15...20 % higher than the traction class of earth-moving and loading machines whose traction properties and fuel economy are being studied.

The dynamometric laboratory at the stage of the technical task was designed for earth-moving machines testing of traction class up to 100 kN based on the presented engineering methodology.

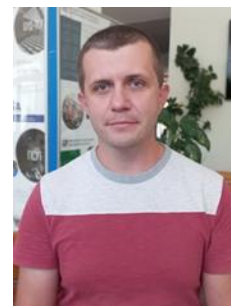
The methodology development of the brake control system calculation in the form of the inductor slip coupling is an independent task and requires separate consideration. The direction of further research also is the improvement of methods for traction mechanics of off-road technological means.

References

- [1]. Blokhin V.S., Malich M.H. (2009). Osnovni parametry tekhnolohichnykh mashyn. Mashyny dlia zemlianykh robit [Basic parameters of technological machines. Machines for earthworks]. Kyiv: Vyscha shkola. Part 2, 455 [in Ukrainian].
- [2]. Balaka M.M. (2012). Tendentsii rozvytku kolisnykh zemleryino-transportnykh mashyn [Development trends of wheeled earth-moving and transport machines]. Abstracts of the Scientific Conference of young scientists, postgraduates and students (November 6–8, 2012). Kyiv: Kyiv National University of Construction and Architecture, Part 1. 83–84 [in Ukrainian].
- [3]. Balaka M., Gorbatyuk Ie., Mishchuk D., Prystailo M. (2021). Characteristic properties of support surfaces for self-propelled scrapers motion. *Fundamental and applied research in the modern world*: Abstracts of the 6th International scientific and practical conference (January 20–22, 2021). Boston, USA. 53–58.
- [4]. Arzhaiev H.O., Pelevin L.Ye., Balaka M.M., Tsepliaiev A.S. (2008). Analiz tekhnichnykh rishen dynamometrychnykh prystroiv dlia tiahovykh vyprobuvan pozashliakhovykh tekhnolohichnykh zasobiv [Analysis of technical solutions of dynamometric devices for traction tests of off-road technological means]. *Girnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny*, (72), 80–85 [in Ukrainian].
- [5]. Balaka M.M., Pelevin L.Ye., Arzhaiev H.O., Vasylenko A.V. (2013). Eksperymentalni doslidzhennia roboty kola z pnevmatychnoiu shynoiu na opornii poverkhni, scho deformuietsia [Experimental operation studies of the wheel with a pneumatic tire on the deformable support surface]. *Scientific Bulletin Kherson State Maritime Academy*, No. 1 (8), 132–139 [in Ukrainian].
- [6]. Mischuk D.O., Balaka M.M., Khodnevych M.M. (2019). Hidravlichni ridyny dlia avtomatychnykh korobok peredach [Hydraulic fluids for automatic transmissions]. *Suchasni innovatsiini tekhnolohii pidhotovky inzhenernykh kadriv dlia girnychoi promyslovosti i transportu*: International scientific and technical conference proceedings (April 26–27, 2019). Dnipro: Dnipro University of Technology, 73–79 [in Ukrainian].
- [7]. Mischuk D.O., Boichenko A.V., Balaka M.M. (2019). Vymohy do robochykh ridyn obiemnoho hidropyvodu [Requirements for working fluids of volumetric hydraulic drive]. *Suchasni innovatsiini tekhnolohii pidhotovky inzhenernykh kadriv dlia girnychoi promyslovosti i transportu*: International scientific and technical conference proceedings (April 26–27, 2019). Dnipro: Dnipro University of Technology, 64–73 [in Ukrainian].

Authors' information

Maksym Balaka, Cand. Sc. (Engineering), Assoc. Prof., Associate Professor of Construction Machines Department, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, [ORCID ID: 0000-0003-4142-9703](https://orcid.org/0000-0003-4142-9703).



РОЗРАХУНОК ВИКИДІВ CO₂ ВИКОРИСТАННОГО ПАЛИВА У СУДОВІЙ ЕНЕРГЕТИЧНІЙ УСТАНОВЦІ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЗРІДЖЕНОГО ПРИРОДНОГО ГАЗУ В ЯКОСТІ ПАЛИВА

Верзун О.Ю.[✉], Россомаха О.І.[✉]

Одеський національний морський університет, Україна

Анотація

Ключові слова: зріджений природний газ, вуглекислий газ, екологічні норми, двопаливо, викиди.

Описано математичний доказ зменшення кількості викидів вуглекислого газу, що виробляється, при використанні зрідженого природного газу в якості палива. Результати дослідження показали, наскільки використання зрідженого природного газу є більш ефективними у зменшенні викидів вуглекислого газу порівняно з іншими типами палива. Дане дослідження зображує фактичну картину зменшення викидів вуглекислого газу.

Вступ

Зріджений природний газ – це майбутнє сучасного типу палива для використання в судових енергетичних установках.

У сучасному світі з кожним днем стає все більше і більше екологічних норм щодо викидів вуглекислого газу та наявності кількості сірки у типах палива, що використовуються в судових енергетичних установках.

Ця робота представляє дослідження та аналіз викидів старих видів палива та нових, які вже змінюють галузь, а також їх поєднання та порівняння.

Актуальність досліджень

Актуальність наукового дослідження визначена посиленням вимог до викидів в атмосферу шкідливих речовин при роботі головних судових двигунів. Зріджений природний газ не має великих домішок сірки і при використанні в камері згорання виділяється набагато менша кількість SO_x і NO_x, а також менше на 20 % кількості вуглекислого газу. Фактичні дані отримані шляхом інтервального отримання даних з використанням хроматографії. Розрахунки були отримані при виконанні типового рейсового завдання переходу північного атлантичного океану.

В статті проведено аналіз впливу використання зрідженого природного газу на кількість викидів в порівнянні з використанням дизельного палива.

Основними нормативними документами з обмеження шкідливих викидів є вимоги Міжнародної конвенції MARPOL 73/78, Додаток VI «Правила попередження забруднення повітряного

середовища з суден» морської міжурядової організації ІМО [1].

Проблеми енергозбереження (економії палива) завжди були актуальними. Останні десятиліття вони загострилися вимогами щодо захисту довкілля від шкідливих викидів із суден. Тому, судовласники вкладають великі гроші у «зелені» морські технології, що використовують альтернативні, поновлювані джерела палива, які повинні повністю або частково замінити вуглеводні [2].

Наведена вище проблема знаходиться в центрі уваги фахівців судової галузі вже багато років.

В роботі [3] проведено аналіз наявних альтернативних видів палива для двигунів внутрішнього згорання сучасних енергетичних засобів, а також оцінено їх ефективність залежно від типу двигуна. У статті зазначається, що внаслідок екологічних обмежень MARPOL спостерігається тенденція до розвитку та використання нових енергетичних джерел, таких як палива з низьким вмістом сірки, зріджений природний газ, електрична енергія та біопалива. Однак автори зауважують, що в Національній транспортній стратегії України до 2030 року не враховано нові шляхи та ефективні методи відновлення та розвитку водного транспорту. Навіть при визнанні пріоритетів, таких як використання паливоекномічних і екологічних транспортних засобів, застосування альтернативних видів палива та охорона навколишнього середовища, не враховано необхідність збереження природно охоронюваних територій у контексті розвитку транспортної інфраструктури.

Мета дослідження – математичний доказ зменшення кількості викидів вуглекислого газу, що виробляється, при використанні зрідженого природного газу в якості палива.

Викладення основного матеріалу

При отриманні рейсового завдання було складено необхідний та ефективний маршрут у напрямку пункту призначення. Попередньо було отримано вантаж, який далі використовуватиметься у ролі палива. Даний вантаж відповідає певній суміші газу, в якій переважає співвідношення великої кількості метану. На вантаж було видано сертифікат якості, в якому детально було задекларовано кожну складову газової суміші. Надалі це необхідно визначення початкової референтної енергетичної цінності використовуваного палива. Під час проведення дослідження було взято період еквівалентний 8 годин. Кожні 8 годин протягом доби вироблялося звірення даних з хроматографічних пристроїв щодо композиції газової суміші, що використовується в ролі палива, її енергетичної цінності та кількість використаного палива. Суднові генератори використовувалися в нашому випадку лише з використанням зрідженого природного газу як основне паливо.

Спалювання в дизель-генераторах відбувається однаково для обох видів палива, а саме: газової пари або LSHFO, для обох з них ми споживатимемо LSMGO щодня як пілотне паливо, залежно від кількості генераторів, які використовуються, це може варіюватися від 0,6 до 1,5 тон на 24 години. Отже, завдяки цьому факту ми можемо виключити для порівняння викиди CO₂ під час спалювання LNG та LSHFO.

Для подальших розрахунків будуть використані наступні коефіцієнти викидів CO₂ для спалювання кожної тони палива.

Спалювання 1 т VLSFO виділяє близько 3,15 т CO₂;

$$CO_{2VLSFO} = 3,15.$$

При спалюванні еквівалента 1 тони СПГ виділяється близько 2,75 т CO₂;

$$CO_{2LNG} = 2,75 \text{ т.}$$

За час рейсу з 10.12 по 28.10 було витрачено 3168,9 м³ СПГ в комплекті для дизель-генераторів.

Кількість витраченого за рейс СПГ = 3168,9 м³.

Коефіцієнт FOE = 0,5184. FOE – це коефіцієнт, який описує співвідношення між загальною енергією в одному кубічному кубометрі СПГ та одній тонні мазуту. Щільність СПГ = 429,530 кг/м³ = 0,429530 MT/м³.

Перетворення необхідної кількості мазуту VLSFO за допомогою коефіцієнта FOE за формулою:

$$VLSFO = LNG \cdot FOE = 3168,9 \cdot 0,5184 = 1642,6 \text{ MT.}$$

Для розрахунку кількості викидів CO₂ можна використовувати наступну формулу:

$$CO_2 = CO_{2emission\ factor} \cdot \text{кількість палива.}$$

Висновки

Необхідні аналітичні розрахунки надають наочну картину актуальності цієї теми для сучасної міжнародної індустрії.

Дослідження, представлене в даній статті, є цінним для сучасної судноплавної галузі, і воно може показати будь-кому простим способом, як сучасні рішення роблять судноплавну галузь більш екологічною для нашої планети. Практично маємо введення в енергетичні характеристики газового складу.

Література

- [1]. МАРПОЛ 73/78. Додаток VI (переглянутий) до Конвенції «Правила запобігання забрудненню повітряного середовища з суден». http://rise.odessa.ua/texts/MARPOL_VI_19.php3
- [2]. Пізінцалі Л.В., Россомаха О.І., Шумило О.М., Александровська Н.І., Россомаха О.А., Рабоча Т.В., Малишкін О.В. Аналіз впливу альтернативних видів палива на вартість життєвого циклу судна. *Збірника наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*, № 1(490), 2023. С. 11-19.
- [3]. Мітков Б.В., Мітков В.Б., Шульга О.В. (2020). Альтернативні види палива для транспортних засобів. *Науковий вісник ТДАТУ*. Випуск 1, Том 3. С. 144 – 152.
- [4]. SIGTTO, Liquefied Gas Handling Principles on Ships and in Terminals, (LGHP4) 4th Edition, Witherby Seamanship. 2016. P. 49 –57
- [5]. IMO – MEPC 80/17/Add 1. Annex 14 <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/annex/MEPC%2080/Annex%2014.pdf>

Відомості про авторів

Олександр Верзун, аспірант, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна, [ORCID ID: 0009-0002-1087-5508](https://orcid.org/0009-0002-1087-5508).



Олена Россомаха, к.т.н, доцент, доцент кафедри навігації і керування судном, доцент кафедри суднобудування і судноремонту ім. проф. Ю.Л. Воробйова, ОНМУ, Одеса, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-4425-2192](https://orcid.org/0000-0002-4425-2192).



МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ВПУСКУ ДВИГУНА МЕМЗ-307 ДЛЯ РОБОТИ НА ЗРІДЖЕНОМУ ГАЗІ БЕЗ ПОПЕРЕДНЬОГО ВИПАРОВУВАННЯ

Кузьменко А.П. 

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Анотація

Ключові слова: зріджений газ, система впуску, випаровування, проточна частина, коефіцієнт наповнення

В роботі проведено дослідження впускної системи двигуна MeMЗ-307, яку адаптовано для подачі зрідженого газового палива у рідкому стані. Запропоновано конструкцію впускного патрубка, яка дозволяє встановити газову паливну систему без втрати коефіцієнту наповнення. Підготовлено та проведено моторні лабораторні дослідження.

Вступ

Сьогодні в якості автомобільного палива часто використовують зріджений газ (LPG). В основному це пов'язано з економічною доцільністю під час експлуатації транспортного засобу [1]. Однак, в більшості випадків, такі транспортні засоби отримують можливість працювати на газовому паливі в результаті інсталяції додаткової паливної системи без адаптації самих механізмів і систем двигуна. Це призводить до того, що енергетичний потенціал газового палива не використовується в повному обсязі і тягне за собою підвищену витрату палива, зменшення потужності, зниження ресурсу, збільшення випадків відмов в експлуатації.

Актуальність досліджень

Свіжий заряд (у газоподібному стані) під час руху по впускній системі та всередині циліндру контактує з гарячими стінками і підігрівається. Все це призводить до зниження коефіцієнту наповнення. Особливо цей процес суттєво помітний в двигунах які працюють на газових паливах. До недавнього часу до складу газової паливної системи обов'язково був включений редуктор-випарник, який дозволяв знизити тиск, а також перетворити агрегатний стан LPG. З одного боку це призводило до хорошого сумішоутворення а з іншого до зниження наповнення, а відповідно і потужності двигуна [2,3]. Сьогодні все частіше можна зустріти газобалонні системи які дозволяють не переводити LPG з рідкого стану в газоподібний перед його подачею в двигун. Однак, як показує практика, позитивні аспекти застосування таких систем не завжди приводять до очікуваного ефекту. Це пояснюється недосконалою конструкцією самого двигуна, і найчастіше неоптимальним розташуванням форсунок у впускній системі.

Метою даної роботи є покращення процесу впуску двигуна MeMЗ-307 який обладнано газобалонною паливною системою 5-го покоління.

Використання газобалонного обладнання 5-го покоління дозволяє істотно знизити втрати потужності, навіть в деяких випадках збільшити її за рахунок подачі газу в рідкій фазі. Після впорскування рідкого газу через форсунки, він починає випаровуватися, при цьому істотно знижуючи температуру у впускній системі, що, в свою чергу, підвищує коефіцієнт наповнення, а, отже, і потужність двигуна. Схематично реалізація такої паливної апаратури наведена на рис.1.

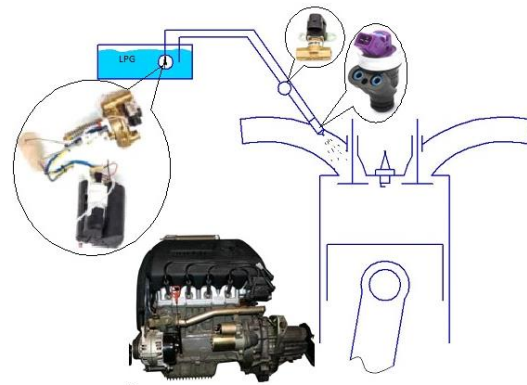


Рисунок 1. Схема двигуна який працює на зрідженому газовому паливі без попереднього випаровування

Формулювання цілей

В цьому дослідженні увага була приділена процесу впуску двигуна який працює на рідкому газі без попереднього випаровування. А саме вибору місця і способу установки форсунки на двигуні MeMЗ-307, так як це робить істотний вплив на наповнення циліндра свіжим зарядом горючою сумішшю.

Викладення основного матеріалу

Для вибору місця розташування форсунок проаналізована проточна частина впускного трубопроводу, на предмет розподілу швидкостей руху повітря в середовищі SOLIDWORKS (рис.2).

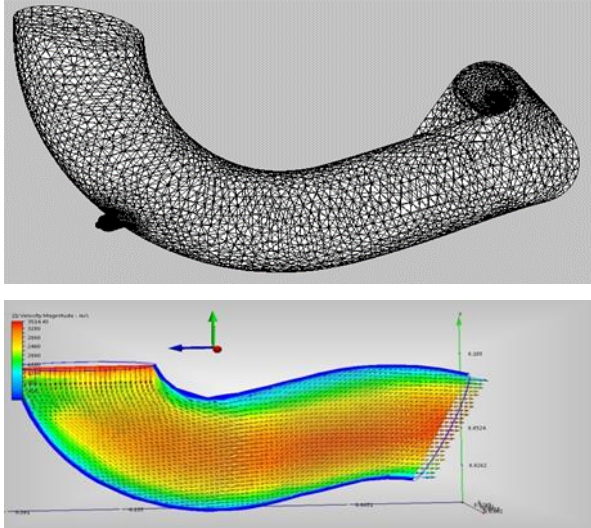


Рисунок 2. Аналіз проточної частини впускного тракту двигуна MeM3-307 в середовищі SOLIDWORKS

На основі проаналізованих результатів було прийнято рішення, що струмінь від форсунки повинен впорскуватися в зону колектора з максимальною швидкістю потоку повітря в проточній частині. Це дозволило розробити 3D модель впускного колектора двигуна MeM3-307 з адаптерами під установку газових форсунок (рис. 3.)



Рисунок 3. 3D модель модернізованого впускного тракту двигуна MeM3-307

Така конструкція модернізованого впускного тракту дозволила забезпечити наступні вимоги:

1. В повній мірі використовується енергія струменя рідкого палива;
2. Гідралічний опір потоку повітря не змінюється, тому що немає виступаючих деталей кріплення;
3. Дане кріплення форсунок забезпечує високу надійність.

Результати теоретичних досліджень були підтверджені експериментом, який проводився в лабораторії газових двигунів каф. ДВЗ ХНАДУ на двигуні 4Ч7,5/7,35. Дана лабораторна установка була обладнана системою подачі пропан-бутанової суміші у впускний колектор в рідкому стані (рис. 4)



Рисунок 4. Лабораторна установка обладнана модернізованою впускною системою та системою подачі газового палива в рідкому стані

Результати випробувань показали, що потужність двигуна при роботі на газовій суміші не втрачається, в порівнянні з бензиновим варіантом (рис. 5)

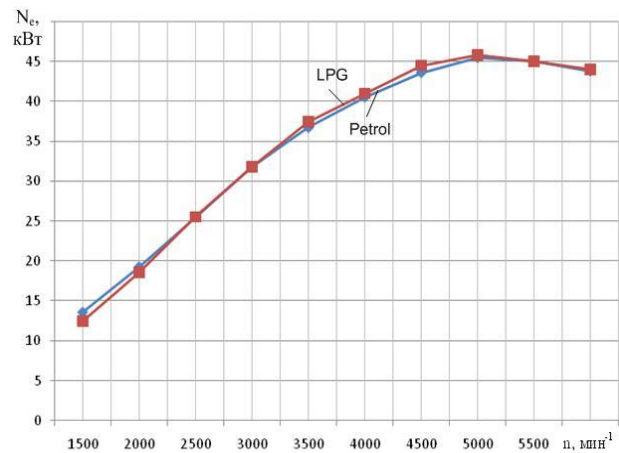


Рисунок 5. Зовнішня швидкісна характеристика отримана в результаті випробувань

Висновки

В процесі роботи було модернізовано впускну систему двигуна MeM3-307 для роботи на зрідженому газовому паливі яке подається без попереднього випаровування. Проведено розрахунок швидкості руху повітря у впускному тракту даного двигуна на характерних режимах роботи. Запропоновано конструкцію модернізації

впускної системи яка дозволяє підвищити коефіцієнт наповнення при встановленні газобалонного обладнання 5-го покоління. Проведені моторні експериментальні дослідження які підтвердили результати теоретичних досліджень.

Література

[1]. Jaworski, A., Kuszewski, H., Lejda, K., & Ustrzycki, A. (2012). The Effect of Injection Timing on the Environmental Performances of the Engine Fueled by LPG in the Liquid Phase. InTech. ICE Chapter 5 2012, p. 111-130 [doi:10.5772/54604](https://doi.org/10.5772/54604)

[2]. Li, X. Q., Yang, L. K., Pang, M., & Liang, X. J. (2010). Effect of LPG Injection Methods on Engine Performance. In Advanced Materials Research (Vols. 97–101, pp. 2279–2282). Trans Tech Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.97-101.2279>

[3]. Mares, J.W., Blazek, J., & Holubec, R. (2007). Automotive SI engine with injection of the liquid LPG into the inlet manifold. *Journal of KONES*, 385-394.

Відомості про авторів

Анатолій Кузьменко, к.т.н., доцент кафедри двигунів внутрішнього згоряння, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-4029-4010](https://orcid.org/0000-0002-4029-4010).



ВИКОРИСТАННЯ МАСШТАБНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ВСТАНОВЛЕННЯ ВИМОГ ДО ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ ВИПРОБУВАННЯХ АВТОТРАКТОРНИХ ДВИГУНІВ

Подригало М.А.[✉], Шеїн В.С.[✉]

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна

Анотація

Ключові слова: випробування автомобільної техніки, форсовані випробування, часткові швидкісні характеристики, масштабне моделювання, масштабний коефіцієнт, оцінка точності вимірювань, похибка вимірювань

Виробництво мобільної техніки, зокрема автотракторних двигунів неможливе без проведення випробувань дослідних зразків. Проте, значні витрати ресурсів, зокрема – часу, на виробництво одного натурального дослідного зразка та проведення його випробувань впливає як на собівартість майбутньої серії так і на швидкість постановки серії у виробництво. З огляду на сказане, актуальним було та лишається випробування масштабних натурних моделей.

Метою даної розвідки є визначення вимог до точності вимірювання фізичних величин при нестандартних випробуваннях автотракторних двигунів за рахунок побудови масштабних коефіцієнтів.

Прийняті в роботі підходи для досягнення поставленої мети базуються на методах теорії подоби, методах та принципах вимірювань і теорії похибок вимірювань.

Вступ

Натурне (масштабне) моделювання широко використовується в різних галузях науки й техніки. Це дозволяє скоротити час проектування та доводки машин. Науковою основою натурального масштабного моделювання є теорія подоби, методи якої дозволяють побудувати систему масштабних коефіцієнтів (масштабів), що дозволяють переводити результати з натурних масштабних випробувань до реальної машини.

Проведені раніше дослідження виявили, що для отримання адекватності натурних і масштабних результатів потрібно скорегувати вимоги до точності вимірювання параметрів різних величин під час масштабних випробувань.

Слід відзначити, що проведення випробувань автомобілів і двигунів в умовах, що різняться від стандартних, потребує корегування вимог до точності вимірювання параметрів, які досліджуються.

У статті, що розглядається, проведено дослідження необхідної точності вимірювання фізичних величин для випадків випробувань двигунів внутрішнього згоряння на часткових швидкісних характеристиках, при форсованих випробуваннях автомобілів на надійність та при

випробуваннях швидкісних автомобілів на динамічність.

Актуальність досліджень

Використання масштабного моделювання знайшло широке застосування в багатьох галузях науки і техніки. Це стало можливим зокрема, за допомогою використання теорії подоби чи теорії узагальнених змінних. Це стало теоретичною базою для проведення випробувань з використанням натурних моделей та детально було висвітлено в роботі [1].

Масштабне моделювання при проведенні експериментальних досліджень автомобіля розглянуто в роботі [2]. У роботі [2] також наведено формули для розрахунку основних фізичних величин, що використовуються при випробуванні автомобілів, двигунів й інших мобільних машин (таблиця 1). У зазначеній роботі [2], також визначено вимоги до точності вимірювання фізичних величин при проведенні натурних масштабних випробувань.

Разом із цим, у роботі не розглянуто випробування автомобілів і двигунів у нестандартних умовах та не розроблено для цих випадків вимог до точності вимірювання параметрів фізичних величин.

Таблиця 1. Масштаби подоби механічних величин

№ з/п	Найменування механічної величини	Розмірність	Масштаб подоби	Формула для розрахунку масштабу подоби
1	Лінійний розмір (характерний)	$[L], м$	m_L	L_H / L_M
2	Час	$[t], с$	m_t	$\sqrt{m_L}$
3	Маса	$[m], кг$	m_M	m_L^3
4	Швидкість	$[L \cdot t^{-1}], м/с$	m_V	$\sqrt{m_L}$
5	Сила	$[m \cdot L \cdot t^{-2}], Н$	m_F	m_L^3
6	Потужність	$[F \cdot V], Вт$	m_N	$m_L^{7/2}$
7	Робота (енергія)	$[N \cdot t], Дж$	m_W	m_L^4
8	Момент інерції	$[m \cdot L^2], кг \cdot м^2$	m_Y	m_L^5
9	Коефіцієнт жорсткості	$[F / L], Н/м$	m_c	m_L^2
10	Коефіцієнт загасання	$[F \cdot t \cdot L^{-1}], Н \cdot с/м$	m_b	$m_L^{5/2}$
11	Коефіцієнт відводу шин	$[F], Н/рад$	$m_Y = m_\delta$	m_L^3
12	Коефіцієнт демпфування шини	$[F \cdot t], Н \cdot с$	m_λ	$m_L^{5/2}$

Викладення основного матеріалу

Випробування автотракторних двигунів на стендах є відповідальним етапом процесу постановки на виробництво. Вірогідність отриманих характеристик двигунів залежить від точності вимірювання параметрів фізичних величин. Точність вимірювання описує якість вимірювань у цілому, поєднуючи поняття вірності вимірювань і прецизійності вимірювань. Поняття точності також використовується як якісна характеристика засобу вимірювання, що відображає близькість його похибки до нуля. Точність вимірювання кількісно оцінюють зворотною величиною модуля відносної похибки.

При проведенні випробувань двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) на стенді визначають: максимальну ефективну потужність двигунів $N_{e\max}$; максимальний ефективний крутний момент $M_{e\max}$; ефективний коефіцієнт корисної дії (ККД) η_e ; частоту обертів (кутову швидкість ω_e) не колінчастого валу; витрати палива; тощо. Найчастіше метою випробувань на стенді є визначення характеристик ДВЗ при реалізації максимальної ефективної потужності $N_{e\max}$.

У роботі [1] розглядалося питання визначення вимог до вимірювань фізичних величин при натурному масштабному моделюванні. Визначено, що зі зростанням лінійного масштабного коефіцієнту при фізичному моделюванні зростають вимоги до точності вимірювань. У відповідності до лінійного масштабного коефіцієнту необхідно обирати й масштабний коефіцієнти інших фізичних величин.

При випробуванні ДВЗ на часткових швидкісних характеристиках ефективна потужність, яка реалізується, менше ніж максимальна ефективна потужність $N_{e\max}$. Тому випробування, що проводяться на режимах, які вказано, можна розглядати як масштабне моделювання потужності.

Масштабний коефіцієнт потужності в цьому випадку можна визначити як [1]

$$m_N = \frac{N_{e\max}}{N'_{e\max}}, \tag{1}$$

де $N'_{e\max}$ – максимальна ефективна потужність двигуна на частковій швидкісній характеристиці.

Співвідношення максимально припустимих похибок при визначенні параметрів $N_{e\max}$ та $N'_{e\max}$ [1] визначаємо наступним чином:

$$\frac{\Delta N_{e\max}}{[\Delta N'_{e\max}]_{\max}} = m_N, \tag{2}$$

де $\Delta N_{e\max}$ – регламентована похибка вимірювання потужності ДВЗ на зовнішній швидкісній характеристиці;

$[\Delta N'_{e\max}]_{\max}$ – припустима похибка при вимірюванні потужності на частковій швидкісній характеристиці.

Визначивши припустиму похибку $[\Delta N'_{e\max}]_{\max}$ робимо висновок про те, що припустимі відносні похибки вимірювань потужності на зовнішніх часткових характеристиках ДВЗ повинні дорівнювати одна одній, а саме $N'_{e\max}$.

У відомій роботі [1] вихідним параметром для розрахунку масштабних коефіцієнтів фізичних величин є лінійний масштабний коефіцієнт m_L . У випадку, що розглядається, лінійний масштабний коефіцієнт m_L є умовною величиною, пов'язаною з масштабними коефіцієнтами інших фізичних величин залежностями.

Визначимо масштабний коефіцієнт ефективного крутильного моменту

$$m_{Me} = \frac{m_N}{m_{\omega e}}, \quad (3)$$

де m_N – масштабний коефіцієнт потужності ДВЗ; $m_{\omega e}$ – масштабний коефіцієнт кутової швидкості колінчастого валу;

Масштабний коефіцієнт кутової швидкості, з урахуванням того, масштабний коефіцієнт лінійної швидкості дорівнює кореню квадратному лінійного масштабного коефіцієнта

$$m_{\omega e} = \frac{\sqrt{m_L}}{m_L} = m_L^{-1/2}. \quad (4)$$

З урахуванням (4), та визначивши взаємозв'язок між показниками m_{Me} і m_N

$$m_{Me} = m_N^{8/7} = \left(\frac{N'_{e\max}}{N'_{e\max}} \right)^{8/7}. \quad (5)$$

За аналогією, з визначенням похибки вимірювання потужності, визначимо похибку вимірювання ефективного крутильного моменту ДВЗ на часткових швидкісних характеристиках, як відношення максимально допустимої похибки вимірювання до масштабного коефіцієнту відповідного параметру

$$[\Delta M'_{e\max}]_{\max} = \frac{\Delta M'_{e\max}}{m_{Me}} = \frac{\Delta M'_{e\max}}{\left(N'_{e\max} / N'_{e\max} \right)^{8/7}}. \quad (6)$$

Припустима похибка вимірювання кутової швидкості колінчастого валу, в такому випадку, буде мати вигляд

$$[\Delta \omega'_e]_{\max} = \frac{\Delta \omega'_e}{m_{\omega e}} = \frac{\Delta \omega'_e}{\left(m_N \right)^{-1/7}} = \Delta \omega'_e \cdot m_N^{-1/7}. \quad (7)$$

Таким чином, аналізуючи отримані залежності, можна зробити висновок про те, що перехід із зовнішньої та часткової швидкісної характеристики ДВЗ потрібно підвищувати точність вимірювання ефективних потужностей і крутного моменту. При цьому похибка вимірювання кутової швидкості колінчастого валу може бути збільшена.

Висновки

Перехід від зовнішньої на часткову швидкісну характеристику при проведенні випробувань ДВЗ повинен супроводжуватись підвищенням точності вимірювання ефективної потужності і крутильного моменту. При цьому похибка вимірювання кутової швидкості колінчастого валу може бути збільшена.

Література

- [1]. Gukhman A.A. Introduction to the Theory of Similarity. London: Academic Press, 1965. 256 p.
- [2]. Подригало М.А., Шеїн В.С. Масштабне моделювання при проведенні експериментальних досліджень автомобіля. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. Науковий журнал. Луцьк: ЛНТУ, 2023. №1 (20). С. 187-197.

Відомості про авторів

Михайло Подригало, д.т.н., професор, завідувач кафедри технології машинобудування та ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-1624-5219](https://orcid.org/0000-0002-1624-5219).



Віталій Шеїн, к.т.н., доцент, доцент кафедри технології машинобудування та ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-9282-0190](https://orcid.org/0000-0002-9282-0190).



ПЕРЕВАГИ І НЕДОЛІКИ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ПРОГНОЗУВАННЯ ПОПИТУ НА ПАСАЖИРСЬКІ АВІАЦІЙНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ

Вінюков-Проценко А.С. ✉

Національний авіаційний університет, Україна

Анотація

Ключові слова: попит на пасажирські авіаційні перевезення, моделі і методи прогнозування попиту, точність прогнозів

Дослідження проведене щодо релевантності сучасних моделей та методів прогнозування попиту на авіаційні пасажирські перевезення та точності прогнозів яку вони здатні забезпечити у короткостроковій та довгостроковій перспективах та зроблені висновки, щодо найбільш релевантних з точки зору точності та складності застосування методів та моделей для різних періодів прогнозування.

Вступ

Точність прогнозів попиту на пасажирські авіаційні перевезення є ключовим елементом для планування розвитку як авіаперевізників і аеропортової інфраструктури так і інфраструктури технічного обслуговування ПС та обсягів виробництва ПС та запчастин до них. Існує багато сучасних методів і моделей прогнозування пасажиропотоків у короткостроковій та довгостроковій перспективах та далеко не усі із них здатні забезпечити необхідну точність прогнозу.

Актуальність досліджень

Одним з основних підходів до прогнозування на авіаційному транспорті є методика, що запропонована ІКАО [1]. Розробці та аналізу методичних підходів довгострокового прогнозування авіаційних перевезень присвячено значну кількість наукових праць. У вітчизняній та зарубіжній дослідницькій практиці прогнозування попиту на авіаційні послуги, слід відзначити активне використання методів економіко-математичного моделювання на основі кореляційно-регресійного аналізу, прогнозування на основі часових рядів, а також експертних оцінок. Крім цього, все частіше застосовуються методи машинного навчання (Machine Learning) та глибокого машинного навчання (Deep Learning). Мета дослідження полягає у детальному аналізі існуючих підходів у аспекті застосування методів та моделей для визначення точності прогнозів за умови їх використання.

Викладення основного матеріалу

Серед найбільш застосованих на даний час моделей та методів прогнозування попиту на

авіаційні пасажирські перевезення виділяють наступні:

- Економетричні моделі (лінійні, логарифмічні та багатофакторні регресії)
- Статистичні моделі (ARIMA, SARIMA, SARIMAX, VAR)
- Моделі на основі марківських та напівмарківських процесів (Hidden Markov Model, Kalman Filter)
- Моделі машинного навчання (Decision tree, Random forest, Clustering, XGBoost)
- Моделі глибокого навчання (Feed Forward Network, CNN, RNN, LSTM, LSTNET)

Економетричні моделі прогнозування базуються на виявленні зв'язків між економічними змінними та аналізі їх впливу на попит на авіаперевезення і використовуються для визначення того, які економічні фактори вплинули на попит на авіаперевезення серед них: ВВП, облікова ставка, дохід на душу населення, чисельність населення та обмінний курс є загальними економічними детермінантами, які використовуються в прогнозуванні. Довгострокове прогнозування зазвичай проводять за допомогою економетричних моделей. Із застосуванням економетричних моделей були зроблені досить якісні прогнози авіаперевезень у Індонезії [2] та Непалі [3]. До переваг економетричних моделей слід віднести зручність використання та доступність довгострокових прогнозів основних економічних даних. Основним недоліком є невисока точність у довгостроковій перспективі.

До статистичних моделей відносяться моделі засновані на прогнозування часових рядів. Є дані, які спостерігаються через рівні проміжки часу, наприклад щомісяця, щороку, щокварталу,

щогодини тощо називається даними часових рядів. Прогнозування часових рядів має на меті передбачити, як зміняться дані — прості методи прогнозування часових рядів, щоб передбачити майбутнє на основі однієї історичної події. Якщо лише одна змінна змінюється з часом, використовується однофакторне прогнозування. Багато варіантність прогнозування часових рядів використовується, коли кілька змінних та їх значення змінюються з часом. Стаціонарність даних повинна бути перевірена перед статистичним моделюванням, оскільки статистичні змінні, такі як середнє значення, дисперсія і автокореляція не повинна змінюватися з часом. Техніка прогнозування Холта-Вінтерса [4, 5] це статистична модель, яка може мати справу з одновимірним часовим рядом коли присутні сезонність і тренд та спрощує обчислення точкових прогнозів. Це допомагає передбачити інтервали шляхом отримання оцінок максимальної правдоподібності параметрів згладжування та початкових умов. Бувають адитивні, некорельовані, гомоскедастичні та середні помилки і це використовується для введення стохастичної складової моделі. До переваг статистичних моделей прогнозування слід віднести високу точність короткострокового прогнозування та легкість моделювання у Python. До недоліків відносять необхідність зведення ряду даних до стаціонарності.

Методи машинного навчання є основним конкурентом статистичних моделей прогнозування попиту на авіаційні перевезення і їх зазвичай застосовують для підвищення точності прогнозування даних часових рядів. У дослідженні [7] добре ілюстроване застосування таких технік машинного навчання як Artificial Neural Networks, Linear Regression Gradient Boosting and Random Forest. У дослідженні використовувався набір даних Світового банку у якому були визначені фактори, що впливають на попит на міжнародні авіаперевезення у різних регіонах світу. Методи кластеризації часових рядів [8] теж добре використовувати для класифікації та прогнозування. Релевантні ознаки можуть бути визначені різними способами та допомагати у визначенні загальних груп під час навчання дерева рішень (Decision tree) для ідентифікації фактори, що впливають на регіональний пасажирський попит. Після визначення критичних характеристик кластеризація може допомогти згрупувати аеропорти та райони на основі характеристик. Оскільки моделі машинного навчання моделі стають дедалі складнішими, дуже велика розмірність моделей стає серйозною проблемою. Тому хоч точність прогнозування у короткостроковій перспективі зростає, розмірність моделей суттєво ускладнює їх застосування.

Моделі глибокого навчання (Deep Learning) для прогнозування часових рядів є відносно

новим підходом. Це перспективний інструмент який завдяки своїй гнучкості допомагає моделювати дуже складний і нелінійний часові ряди без попереднього знання функціональних аспектів бізнесу. ANN моделі поки що не здатні переважити SARIMAX на невеликих масивах даних [9] але згідно дослідження [10] LSTM моделі показують вищу точність прогнозу у короткостроковій перспективі ніж SARIMAX. З подальшим розвитком обчислювальних можливостей моделі глибокого навчання зможуть набагато переважити статистичні моделі та досягати набагато більшої точності прогнозування. Основним недоліком їх на даний час є необхідність використання набагато більших масивів даних ніж для статистичних моделей з однаковим рівнем точності прогнозу на виході.

Висновки

Отже згідно проведених досліджень для прогнозування попиту на авіаперевезення у короткостроковій перспективі найвищу точність прогнозу забезпечують статистичні методи та моделі такі як SARIMAX та VAR, високу ефективність також демонструють нейромережі LSTM У довгостроковій перспективі все ще переважають економетричні моделі, які на жаль не здатні забезпечити високу точність прогнозу. Тому вочевидь майбутнє прогнозування у довгостроковій перспективі за комплексним застосуванням різних моделей на базі глибокого навчання (Deep Learning). Перспективи подальших досліджень у даному напрямку полягають у розробці моделей для забезпечення необхідного рівня точності прогнозів авіаперевезень у довгостроковій перспективі.

Література

- [1]. ICAO. Manual on Air Traffic Forecasting (Doc 8991 AT/722/3). https://www.icao.int/MID/Documents/2014/Aviation%20Data%20Analyses%20Semi-nar/8991_Forecasting_en.pdf
- [2]. Suryan V (2017) Econometric Forecasting Models for Air Traffic Passenger of Indonesia. J Civ Eng Forum 3(1):303. <https://doi.org/10.22146/jcef.26594>
- [3]. Bastola DP (2017) “Air passenger demand model (APDM): econometric model for forecasting demand in passenger air transports in Nepal,” Int J Adv Res Publ, vol. 1, no. 4, pp. 76–80.
- [4]. Djakaria I, Saleh SE (1882) Covid-19 forecast using Holt-winters exponential smoothing. J Phys Conf Ser 1:2021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1882/1/012033>

[5]. Sun S, Sun S, Lu H, Tsui K, Wang S (2019) Nonlinear vector auto-regression neural network for forecasting air passenger flow. *J Air Transp Manag* 78:54–62. <https://doi.org/10.1016/J.JAIRTRAMAN.2019.04.005>

[6]. Bontempi G, Ben Taieb S, Le Borgne YA (2013) “Machine learning strategies for time series forecasting,” in *Lecture Notes in Business Information Processing*, vol. 138 LNBIP, pp. 62–77, https://doi.org/10.1007/978-3-642-36318-4_3

[7]. Samli R, Firat M, Yiltas-Kaplan D (2021) Forecasting air travel demand for selected destinations using machine learning methods. *J Univ Comput Sci* 27(6):564–581. <https://doi.org/10.3897/JUCS.68185>

[8]. Chen JH, Wei HYH, Chen CL, Wei HYH, Chen YP, Ye Z (2020) A practical approach to determining critical macroeconomic factors in air-traffic volume based on K-means clustering and decision-tree classification. *J Air Transp Manag* 82(February 2019):101743. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2019.101743>

[9]. Brause LM, Popa A, Koch T, Deutschmann A, Hellmann M (2020) Optimization of resource demand for passenger services at airports during system failures such as blackouts. *Eur Transp Res Rev* 12(1). <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00446-2>

[10]. Gelhausen MC, Berster P, Wilken D (2018) A new direct demand model of long-term forecasting air passengers and air transport movements at German airports. *J Air Transp Manag* 71(April):140–152. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2018.04.001>

Відомості про авторів

Артур Вінюков-Проценко, к.е.н., доцент кафедри організації авіаційних перевезень, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.



РЕЖИМ РОБОТИ СУДНОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ

Лебедь О.М. 

Херсонська державна морська академія, Україна

Анотація

Ключові слова: перетворювач частоти, електротехнічний комплекс, оцінка якості функціонування, нечітка логіка, діагностика.

В даній роботі розглянута оцінка якості функціонування суднового перетворювача частоти використовуючи апарат нечіткої логіки. На основі математичного моделювання в середовищі Matlab Simulink, приведені поверхні відклику вихідних характеристик сили струму, напруги та температури ключів. Дані поверхні дають можливість більш якісно проводити діагностику технічного стану суднового перетворювач частоти.

Вступ

Системи електроруку судів мають переваги щодо пропульсивних комплексів. Це, як підвищення надійності суднового електротехнічного комплексу, так і самого пропульсивного комплексу. Поліпшення маневреності судна, підвищення енергетичних та експлуатаційних характеристик, екологічність та раціональне розташування корисного вантажу, що у свою чергу веде до збільшення рентабельності вантажоперевезень. Перетворювачі частоти дозволяють вирішити проблеми електромагнітної сумісності потужних електричних установок та інших суднових споживачів електроенергії, що у свою чергу дало змогу об'єднати суднову електростанцію та всі споживачі електроенергії в єдину енергетичну систему [1].

Актуальність досліджень

Одним з основних критеріїв роботи суднового електротехнічного комплексу є кількість обслуговуючого персоналу та витрати на планові технічні обстеження. Для оптимального виконання цих вимог створюються різноманітні системи відділеного моніторингу технічного стану електротехнічного комплексу, одним з основних елементів якого є перетворювачі частоти. Але на даний момент, існуючі системи діагностики не володіють достатнім функціоналом і є необхідність в розробці методів віддаленої діагностики стану функціонування суднового електротехнічного комплексу.

Метою даної роботи є розробка моделі функціонування суднового перетворювача частоти на базі нечіткої логіки в середовищі Matlab Simulink для діагностики його технічного обслуговування.

Викладення основного матеріалу

В даній роботі, використовуючи апарат нечіткої логіки в середовищі Matlab Simulink, створена математична модель діагностики технічного стану суднового перетворювач частоти [2].

Головна задача – створення математичної моделі для прийняття рішення оператора, щодо стану функціонування суднового перетворювача частоти, основане на технічних параметрах вихідних характеристик. Вхідними характеристиками (вхідні лінгвістичні змінні) є вихідні струм та напруга суднового перетворювача частоти, а також температура силового транзистора, який виступає в якості ключа для створення змінної напруги певної частоти. Вихідна лінгвістична змінні – оцінка якості функціонування перетворювача частоти.

В таблиці 1, 2 показані значення функцій належності лінгвістичних змінних вихідного струму, вихідної напруги та температури ключів в умовних одиницях.

Таблиця 1. Правила нечітких продукцій оцінки якості функціонування суднового перетворювача частоти, для нормальної температури ключів

<i>U, I</i>	<i>Низький</i>	<i>Нормальний</i>	<i>Високий</i>
<i>Нормальний</i>	<i>Аварійний рівень</i>	<i>Нормальний рівень</i>	<i>Аварійний рівень</i>
<i>Високий</i>	<i>Аварійний рівень</i>	<i>Попереджувальний рівень</i>	<i>Аварійний рівень</i>

Таблиця 2. Правила нечітких продукцій оцінки якості функціонування суднового перетворювача частоти, для високої температури ключів

<i>U, I</i>	<i>Низький</i>	<i>Нормальний</i>	<i>Високий</i>
<i>Нормальний</i>	<i>Аварійний рівень</i>	<i>Попереджувальний рівень</i>	<i>Аварійний рівень</i>
<i>Високий</i>	<i>Аварійний рівень</i>	<i>Аварійний рівень</i>	<i>Аварійний рівень</i>

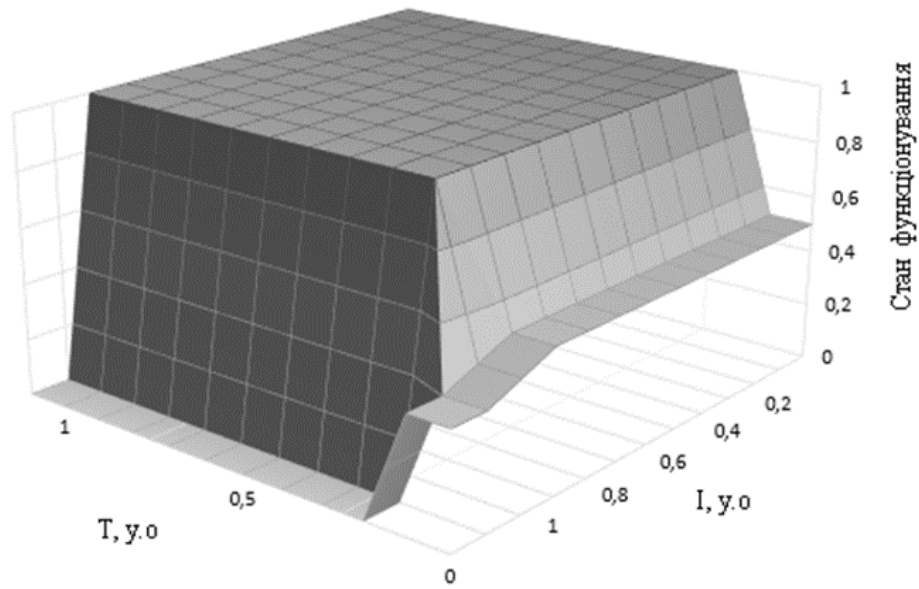


Рисунок 1. Поверхня відклику стану функціонування перетворювача частоти від температури ключа та вихідного струму

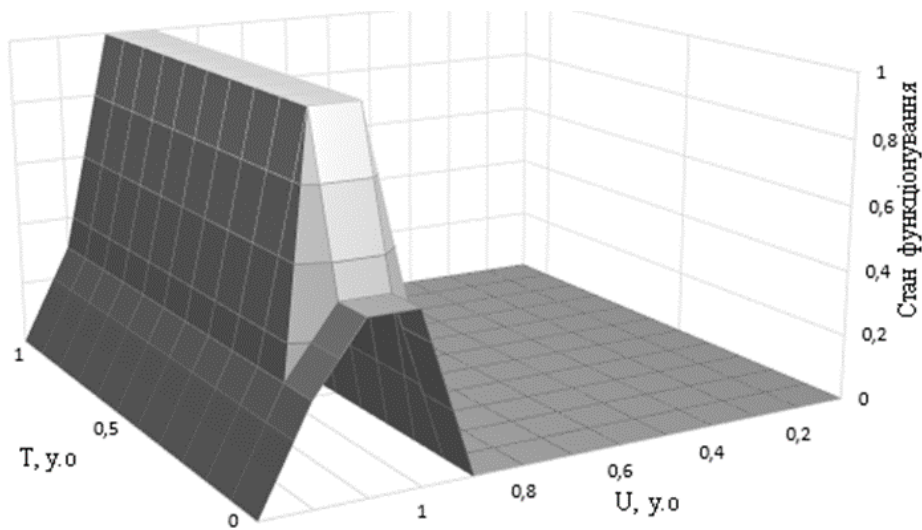


Рисунок 2. Поверхня відклику стану функціонування перетворювача частоти від температури ключа та вихідної напруги

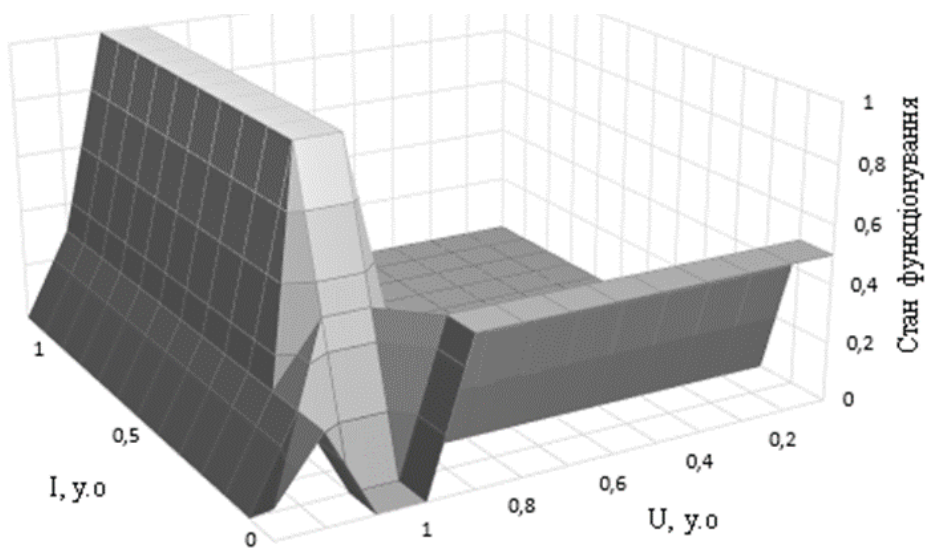


Рисунок 3. Поверхня відклику стану функціонування перетворювача частоти від вихідної напруги та вихідного струму

Рисунки 1-3 дозволяють перевірити взаємозв'язки вхідних і вихідних змінних на основі правил нечітких продукцій, що наведені в таблиці, 1,2.

Висновки

Оцінка якості функціонування суднового перетворювача частоти на базі нечіткої логіки, дозволяє надати підтримку прийняття рішення оператору, щодо технічного стану та діагностиці електротехнічного комплексу. Застосування бази правил продукцій нечіткої логіки дає можливість зменшити час діагностики та підвищити якість роботи експертів по оцінці якості функціонування електротехнічного комплексу. Також треба зазначити, що збільшення лінгвістичних змінних та кількості їх термів також призведе до покращення якості діагностики.

Література

[1]. Лебедь О.М. (2021). Керування параметрами перетворювача частоти на судових електричних установках. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування: міжнародна наук. практ. конф.* Херсон: ХДМА, С. 145-146.

[2]. Акіменко, В.В. (2018). *Прикладні задачі інтелектуального аналізу даних.* КНУ ім. Тараса Шевченка.

Відомості про авторів

Олег Лебедь, к.т.н., доцент, доцент кафедри природничо-наукової підготовки, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-5603-9244](https://orcid.org/0000-0001-5603-9244).



СЕКЦІЯ 5
ПРОБЛЕМИ ПІДГОТОВКИ СПЕЦІАЛІСТІВ ДЛЯ
ТРАНСПОРТНОЇ ГАЛУЗІ

MAIN MEASURES TO REDUCE THE NEGATIVE ENVIRONMENTAL IMPACT OF THE AVIATION TRANSPORT COMPLEX IN THE CONDITIONS OF EUROPEAN INTEGRATION OF UKRAINE

Ganna Kalashnyk[✉], Myroslava Kalashnyk-Rybalko

Flight Academy of the National Aviation University, Ukraine

Abstract

Keywords: *environmental safety, negative environmental impact, infrastructure, air transport complex, European integration of Ukraine.*

The main measures to reduce the negative environmental impact of the air transport complex in the conditions of the European integration of Ukraine are substantiated. The existing regulatory and legal mechanism regulating the environmental aspects of civil aviation safety in Ukraine is analyzed, and the ways of its improvement for practical application are outlined; following international requirements and standards. Ways to solve problems arising from the impact of air transport on the environment are proposed.

Introduction

The development of transport infrastructure and an increase in the intensity of traffic leads to significant environmental pollution. In the context of European integration, Ukraine has undertaken international legal obligations to create a national effective legal mechanism that would reliably guarantee the priority of environmental safety; an ecologically safe environment; implementation of preventive measures for the protection of the natural environment; safety of wide implementation of the latest technologies, etc. [1-2].

At the current stage in Ukraine, a certain regulatory and legal mechanism has been created that regulates environmental aspects of civil aviation safety [1]. But, as it turns out, it needs further improvement for practical application, particularly by developing preventive measures in this area in light of international requirements and standards [2].

In such conditions, an urgent problem is the development and implementation in Ukraine of resource-saving environmentally friendly technologies for the operation of aviation transport and the improvement of methods for assessing its environmental safety, which meets the requirements of ICAO [3] and regulatory documents of Ukraine [1]. In this regard, it is necessary to determine the main measures to reduce the negative environmental impact of the air transport complex in the conditions of the European integration of Ukraine.

Research relevance

The implementation of environmental security is based on a systematic approach to the analysis and forecasting of changes and consequences that may

occur in natural ecosystems and the biosphere as a whole under the influence of industrial and transport infrastructure [3].

The environmental safety policy is implemented by carrying out a set of environmental protection measures aimed at improving the environmental characteristics of rolling stock and air transport infrastructure. These activities are divided into four groups according to the areas of activity: organizational and legal, architectural and planning, design and technical, and operational.

Organizational and legal measures include the formation of a new environmental and legal worldview, the effective implementation of state environmental policy, the creation of modern environmental legislation and the normative and legal framework of environmental safety, as well as measures of state, administrative and public control over the performance of nature protection functions. They are aimed at the development and implementation of environmental policy mechanisms, environmental legislation on transport, environmental standards, norms, standards and requirements for transport equipment, fuel and lubricants, equipment, the state of transport communications, etc.

Architectural and planning measures ensure the improvement of the planning of all functional zones of the city (industrial, residential, transport, sanitary protection, recreation areas, etc.) taking into account the infrastructure of transport and road traffic, the development of solutions for rational land use and development of territories, preservation of natural landscapes, landscaping and beautification.

Design and technical measures make it possible to introduce modern engineering, sanitary-

technical and technological means of environmental protection from harmful effects at enterprises and transport facilities, and technical innovations in the design of rolling stock.

Operational measures are carried out during the operation of vehicles, aimed at maintaining their condition at the level of the given environmental standards due to technical control of the vehicle and high-quality maintenance. The listed groups of measures are implemented independently of each other and contribute to the achievement of certain results. But their complex application will provide the maximum effect.

It is possible to solve the problems of improving environmental safety in transport by applying several technical measures. Among them, measures at the stage of operation of transport complexes and measures at the stage of design and construction of transport facilities are distinguished. In turn, the use of alternative fuels, measures for the protection of surface and groundwater, specific measures for the application of anti-icing salts and herbicides, etc., can be named among the important measures at the operational stage.

As you know, the supply of fuel resources is a key task that determines the development of the economy and energy security of any state. In developed countries, even today, the share of aviation is about 30% of the annual fuel consumption for all other types of transport. For this reason, in these countries, work on improving the properties of alternative types of fuel, which refer to renewable resources, have lower costs and better ecology, does not stop.

On June 18, 2019, at the Paris Air Show, leading companies in the aircraft manufacturing sector created a sensation. Boeing, Airbus, Rolls Royce, General Electric and Safran signed the declaration, pledging to focus on environmentally friendly technologies. The document clarifies three main areas of joint action - to increase energy efficiency and reduce carbon dioxide emissions, create favourable conditions for the commercialization of alternative types of aviation fuel and the development of fundamentally new aviation technologies and engines [2].

Ways to solve problems arising from the impact of aviation transport on the environment can be also as follows: the use of special attachments for engines; reduction of engine operating time on the ground; reducing the number of operating engines during taxiing; engine modernization; development of alternative fuels, etc. [3]. It is necessary to substantiate the main measures to reduce the negative impact of the air transport complex on the environment in the conditions of the European integration of Ukraine.

Presentation of the main material

Many factors influence the environmental condition of the areas adjacent to the airport [1].

Aviation noise. *Aviation noise* is the most significant cause of public reaction to changes in airspace, operational innovations and airport expansion, and is expected to continue to be so in most regions of the world for the foreseeable future. Noise exposure from aviation activities at airports and surrounding areas depends on many factors, including:

- Types of aircraft using this airport;
- The number of daily takeoffs and landings, including the total number and for specific periods;
- Time of day of aircraft operations;
- Runways used;
- Flight paths used (including noise preferred routes (NPR));
- Prevailing weather conditions;
- Topography of the airport and surrounding areas;
- Location and extent of adjacent urban areas;
- Operational procedures used;
- General operating conditions.

When considering the problem of environmental noise pollution during air transport processes, it is necessary to take into account the specifics of civil aviation.

Thus, this problem is especially relevant for large airports with intense air traffic [1].

In general, to reduce aircraft noise, it is necessary to take measures to modernize and develop aviation technology, the introduction of less noisy air intakes and exhaust nozzles; improvement of aerodynamic shapes and layout of aircraft engines; use of soundproofing materials and devices; transition from noisy old-style turbojet engines to less noisy turbofan and bypass engines. The volume level of aircraft noise in the vicinity of airports depends on the direction of runways and aircraft flight routes, the intensity of flights during the day, seasons of the year, types of aircraft accepted by the airport and other factors [2].

To protect against noise at airports, special stationary and mobile noise suppressors are used, and noise-reflecting screens near runways are created, as well as forest plantations in the airfield area. Of course, in the work to minimize noise in the area of the airfield, the participation of air traffic controllers is important. They must consciously divert aircraft from densely populated areas of the city, and prohibit crews from flying over populated areas at

low altitudes. That is, tighten the minimum altitudes already included on the corresponding airfield maps, select optimal routes for aircraft, apply restrictions on flights and aircraft of less noisy types at night, and also use a shifted aircraft descent threshold - the minimum permissible percentage of descent/climb along the glide path [3].

At the state level, it should be mandatory to introduce a system of a balanced approach to reduce noise and improve the system of supervision over compliance with established requirements determined by global aviation regulations.

A very important role in solving the problem of aircraft noise and its impact on public health belongs to the construction policy in the area of airports. Limiting residential development near airports is an effective way to solve this problem. Public publication of noise maps of the airport area, airfield and adjacent areas and strict adherence to noise standards is a positive basis for communication with the population.

However, the aviation authorities, for their part, are also introducing more efficient flight routes to reduce noise during takeoff or approach, and also using acceptable and updated SID/STAR maps; moreover, the use of PBN (Performance base Navigation) navigation has become possible which allows you to significantly reduce fuel consumption and associated emissions, as well as ensure minimal deviation and accurate navigation along the highway. Noise impacts can be localized using the PBN procedure; according to it, pilots plan and keep the aircraft in a certain air corridor much more accurately and easily [3].

Some airlines, in partnership with the aircraft manufacturer and ATC (Air Traffic Control) organization, have used performance-based navigation procedures, an INM (Integrated Noise Model) tool, and an RNP (Required Navigation Performance) tool to determine efficient and quieter arrival methods. Precision arrival procedures were assessed taking into account both fuel savings and noise impacts on the public to find the right balance for all stakeholders. INM showed fuel savings ranging from 300 to 530 pounds for a typical Boeing 737 aircraft and a reduction in noise exposure of up to 55 dB on an approach standard of 110 to 130 dB. The use of PBNs is growing for several reasons. PBN uses modern and advanced aircraft technology to ensure precise adherence to a defined flight path and provides predictable flight paths and more economical routes that can be routed to reduce noise. RNAV (Area Navigation) can also be used during the arrival procedure.

Effective ways to reduce aircraft noise by optimizing flight processes, and departure and arrival patterns at the airfield are as follows [1-4].

1. Introduction of the PBN concept.
2. Takeoff technologies and procedures:
 - 1) flight operations in Continuous Climb Operations (CCO);
 - 2) collaborative decision making (CDM) when managing the flow of departing aircraft;
 - 3) traction control;
 - 4) alternative trajectories (noise distribution);
 - 5) noise abatement departure procedure (NADP).
3. Technologies and procedures during landing approach:
 - 1) flight operations in Continuous Descent Operations (CDO);
 - 2) reduction along an optimized profile;
 - 3) exclusive (optimized) procedures (tailored approach);
 - 4) collaborative decision making (CDM) when managing the flow of landing aircraft;
 - 5) alternative trajectories (noise distribution);
 - 6) increasing the glide path angle;
 - 7) shift of the runway threshold;
 - 9) use of a two-segment glide path;
 - 8) use of curved trajectories;
 - 9) change in the technology of extending the landing gear and flaps.

Thus, the approach to the problem of reducing noise pollution in the airfield area must be comprehensive; all stakeholders, and in particular air navigation service providers, must fully implement all procedures for minimizing noise impact on the environment. Concerted government action is needed to the problem of aircraft noise with the determination of priorities for air transport.

Air quality. The combustion of aviation fuel creates a variety of air pollutants in the form of gases and particulate matter that can affect air quality and human health. As a rule, when assessing air quality, the following general varieties are distinguished [3 -4]:

- NO₃ – nitrogen oxides, a mixture of nitrogen dioxide (NO₂) and nitrogen oxide (NO);
- VOC – volatile organic compounds (including non-methane hydrocarbons (NMHC));
- CO – carbon monoxide;
- SP – Solid Particles and the most problematic are particles whose aerodynamic diameter is less than 10 microns (SP10) and 2.5 microns (SP2.5)
- SO₃ – sulfur oxides.

Fuel consumption and greenhouse gases. Aviation emissions are the result of the combustion of aviation kerosene or gasoline, the product of which is emissions containing approximately 70% carbon dioxide (CO₂), slightly less than 30% water vapor (H₂O), with less than 1% coming from a number of other emissions, including nitrogen oxides (NO_x), carbon monoxide (CO), sulfur oxides (SO₃), hydrocarbons, volatile and non-volatile particles and other microcomponents. Some such components are classified as greenhouse gases (GHGs), with carbon dioxide being the most important.

The duration of exposure to greenhouse gas emissions varies significantly, from carbon dioxide, which persists in the atmosphere for a long time, to water vapors, which has a relatively short lifespan. Modern gas turbine engines emit virtually no nitrogen oxides (N₂O), and although moderate methane (CH₄) emissions are possible when the engines are operating at their least fuel-efficient modes, no methane emissions are observed during other phases of flight [4].

In terms of the chemical impact on the atmospheric and ecological situation, aviation has its distinctive features compared to other types of transport: the use of gas turbine engines mainly contributes to a different nature of the fuel combustion processes occurring in them, which determines the specific structure of exhaust gas emissions; the use of kerosene as fuel contributes to a special set of components of pollutants; flights of aircraft at high altitudes and very high speeds ensure uniform dispersion of fuel combustion products over vast areas in the upper layers of the atmosphere. On the one hand, it reduces the level of direct impact of emissions on living organisms. However, on the other hand, it ensures the global nature of pollution, especially the impact of fuel combustion products on the upper layers of the atmosphere and, in particular, on the ozone screen.

Due to its technological specificity, harmful emissions produced by aircraft settle much faster in the atmospheric space and spread in it; therefore, the protection of the environment from the negative impact of air transport activities is relevant all over the world. Although the total emission of pollutants by aircraft engines is relatively small (for the city, and the country), these emissions pollute the environment in the area of the airport. A significant part of the total fuel consumption is spent on taxiing the aircraft to the runway before take-off and taxiing from the runway after landing.

Over the past few decades, significant progress has been made in reducing emissions due to the improvement of the environmental friendliness of aviation fuels (partial replacement of kerosene with liquefied natural gas or biofuels) and technical improvements in aircraft engines (increasing their

traction efficiency, which implies a reduction). However, this progress may be levelled in the future by the growth of air transportation activity. Aviation emissions of carbon dioxide make up, according to estimates, from 2 to 2.5% of the total amount of anthropogenic emissions of CO₂ into the atmosphere. When burning 1 kg of aviation kerosene, 3.16 kg of CO₂ is released. It is assumed that by 2040, with an optimistic forecast associated with the improvement of fuel efficiency technologies, the amount of aviation CO₂ emissions may reach almost one and a half thousand megatons per year [4]. In 2016, the CAEP (Committee on Aviation Environmental Protect) recommended two new standards: for emissions of carbon dioxide and non-volatile suspended particles [5]. The standards apply to models of new types of subsonic and turboprop aircraft entering service from 2020 and to those already in service from 2023. If models in service that do not yet meet the requirements of CO₂ standards cannot be properly modified by 2028, then after this period they will not be able to be used. Emissions will be regulated using the proposed Global System of Market Measures [5].

Today, alternative fuels include ethanol obtained from grain, corn, and sugar cane, biodiesel from rapeseed and soybeans, and biomass from all types of waste. Ethanol is still leading among them. In the USA, Brazil and Europe, national programs have been adopted, the purpose of which is to replace traditional motor fuels with ethanol. In France, tests of mixtures of kerosene with second-generation biofuels (alcohols based on biobutanol), which are produced from biomass, are also being conducted [6].

A big problem with biofuels is that most of them freeze at high altitudes. Another difficulty is related to ecology: the production of many types of biofuels harms agriculture. In some studies, in particular, it is said that the processing of primary raw materials into biofuels results in much greater emissions of harmful substances into the atmosphere than when using conventional fuel.

Thus, civil aviation enterprises affect the ecology in a complex manner and at the same time on various components of the environment: air, land and water resources. Therefore, it is necessary to carry out measures aimed at reducing the harmful impact of air transport on the surrounding natural environment. The following modern measures are distinguished: creation of ecologically clean fuel, modernization of engines, disposal of industrial waste, etc. Analysis of the current state of the problem of creating and introducing alternative types of fuel for aviation vehicles showed that Ukraine needs to study global trends in the use of alternative fuels in aviation and change the regulatory framework of the fuel industry. For aircraft flights in Ukraine on alternative types of fuel to become a

reality, it is also necessary to combine scientific efforts in the direction of creating such aircraft and building extensive ground infrastructure at airports.

In addition, airport-related environmental impact analysis also takes into account the negative impacts of operational changes on water quality, ecology, etc.

When designing airports, the tasks of environmental design organizations should include (in particular) [7]:

- checking the activities and projects for the future development of airlines for compliance with environmental and sanitary-epidemiological legislation;
- minimizing the risks of economic losses of enterprises arising from violations of environmental legislation;
- development of principles and structures for environmental risk management: environmental policy, dynamic and analytical environmental monitoring systems.

Conclusions

It is possible to solve the problems of improving environmental safety in air transport by applying many technical measures. Among them, measures at the stage of operation of transport complexes and measures at the stage of design and construction of transport facilities are distinguished. In turn, the use of alternative fuels, measures for the protection of surface and groundwater, specific measures for the application of anti-icing salts and herbicides, etc., can be named among the important measures at the operational stage.

Environmental problems of territories exposed to excess harmful effects of the airport should be solved based on both domestic and international experience in protecting the environment and improving the quality of life of the population, which is determined not only by the quality of the environment but, among other things, by the provision of this environment with modern means of accessible communications. It is necessary to quickly find compromise solutions to these problems. This is especially important in the context of Ukraine's European integration.

References

[1] Закон України "Про охорону навколишнього природного середовища" N 1264-XII від 25 червня 1991 року. Відомості Верховної Ради України від 08.10.1991 — 1991 р., № 41, стаття 546.

[Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text>

[2] ICAO. Developments in Civil Aviation and the Environment: Working Paper of the 38th Session of the ICAO Assembly. July 2013. 21 p. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.icao.int>.

[3] ICAO. Environmental protection. Volume 1. Aircraft noise: Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation. ICAO, Edition 3, July 2008, 258 pp. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.icao.int>

[4] ICAO. Environmental protection. Volume 2. Aircraft Engine Emissions: Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation. ICAO, Edition 5, Document updated as of 01/01/2021. 93 p. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.icao.int>

[5] ICAO. On Board. A sustainable future. Environmental Report. ICAO, 2016. 250 p. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.icao.int>

[6] ICAO. Doc. 9911. Recommended Method for Computing Noise Contours Around Airports. 2008. [Електронний ресурс]. Режим доступу: www.afeonline.com/shop/icao-doc-9911.html

[7] European Civil Aviation Conference (ECAC) Doc 29 Report on Standard Method of Computing Noise Contours Around Civil Airports, 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://prod.ecac-ceac.org/ecac-docs>

Authors' Information

Ganna Kalashnyk, Doctor of Geological Science, Professor, Department of Aeronavigation, Meteorology and Air Traffic Management, Flight Academy of the National Aviation University, Kropyvnytskyi, Ukraine, [ORCID ID: 0000-0002-9581-9865](https://orcid.org/0000-0002-9581-9865).



Myroslava Kalashnyk-Rybalko, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Aeronavigation, Meteorology and Air Traffic Management, Flight Academy of the National Aviation University, Kropyvnytskyi, Ukraine, [ORCID ID: 0000-0003-0997-9609](https://orcid.org/0000-0003-0997-9609).



АВТОМАТИЗОВАНА ХОЛОДИЛЬНА УСТАНОВКА НА КОМП'ЮТЕРНОМУ СИМУЛЯТОРНОМУ КОМПЛЕКСІ

Матвєєв В.В. ✉

Херсонська державна морська академія, Україна

Анотація

Ключові слова: Автоматизована холодильна установка, комп'ютерний симуляторний комплекс, тренажер, холодильні провізійні камери, кондиціонер.

Наведено огляд комп'ютерного симуляторного комплексу для навчання та підвищення кваліфікації фахівців у сфері суднової холодильної техніки. Тренажери цього комплексу дозволяють моделювати різні умови та режими роботи холодильних установок, навчати стандартним процедурам та діям, а також підготовлювати до позаштатних та аварійних ситуацій. Експерти відзначають переваги даного тренажера, такі як глибина моделювання, реалістичність відтворення функцій та можливість роботи з ручним і автоматичним управлінням. Робота описує функціонал тренажера та робочого місця інструктора, а також його застосування в навчальних та промислових цілях.

Вступ

Комп'ютерний симулятор дає можливість отримувати навички не тільки запускати і зупиняти холодильну установку, а і моделювати роботу установки на різноманітних умовах та режимах. Ця стаття ознайомлює з перевагою комп'ютерного симуляторного комплексу.

Тренажери, що входять до складу комплексу, складаються з імітованих холодильних машин, що працюють для різних груп споживачів холодильних установок (холодильні приміщення, бункери попереднього охолодження, морозильні камери, льодогенератори, система кондиціонування) з різними холодоагентами та системами їх подачі. Кожен тренажер може працювати як автономно, так і в комплексі, що становить єдиний холодильний агрегат.

Актуальність досліджень

Холодильні тренажери дозволяють навчити фахівців виконувати стандартні процедури і дії в позаштатних і аварійних ситуаціях, а також підготувати вже добре підготовлених фахівців і оцінити їх компетентність.

Тренажери перебували в дослідній експлуатації протягом кількох років і на них було навчено понад 1000 студентів та спеціалістів. Відгуки викладачів, студентів та працівників виробництва позитивні.

На думку експертів Міжнародної академії холодильної техніки, запропоновані тренажери

мають такі основні переваги та відмінності від інших аналогічних виробів:

1. Можливість їх використання як для навчання, так і для підвищення кваліфікації, підготовки та перевірки компетентності та атестації фахівців;
2. Глибина і правильність моделювання;
3. Чіткість і реалістичність відтворення всіх функцій і вимірювань контрольованих параметрів;
4. Можливість роботи з ручним і автоматичним управлінням;
5. Моделювання типової несправності та аварійної роботи;
6. Гнучкі налаштування конфігурації (їх можна використовувати як для групових, так і для індивідуальних занять).

Викладення основного матеріалу

Імітація інсталяції

Комп'ютерний тренажерний комплекс автоматизованої холодильної установки включає в себе наступні моделі, що дозволяють відпрацьовувати дії в різних змодельованих процесах:

1. RPS-1 – модель «Провізійні камери»;
2. RPS-2 – модель «Системи кондиціонування»;
3. RPS-3 – модель «Морозильні камери»;

4. RPS-4 – модель аміачної холодильної установки для розсолу;

Сфера застосування

За допомогою тренажера проводиться успішна підготовка студентів, а також підготовка і перепідготовка фахівців, задіяних в експлуатації холодильних установок, з метою підвищення їх кваліфікації та контролю рівня професійної підготовки. За бажанням замовника тренажери можуть бути адаптовані до умов використання холодильних установок на судах рибальського, морського, річкового флотів, в харчовій та інших галузях промисловості, а також на автомобільному і залізничному транспорті.

Функціонал тренажера

1. контроль параметрів і показників, представлених більш ніж в 50 точках;

2. активація звукової та світлової сигналізації при досягненні небезпечних значень найважливіших контрольованих параметрів, прийнятих в реальних умовах;

3. навчання експлуатації: заправка холодоагентом; заправка компресора маслом; вихід повітря; заміна фільтра-осушувача і т.п.;

4. моделювання найбільш поширеної несправності;

5. зупинка агрегатів при досягненні гранично допустимих значень одного з контрольованих параметрів, прийнятих в нормальній практиці експлуатації;

6. можливість контролю і управління агрегатом і його елементами в наступних режимах: ручному і автоматичному (для Автоматизованого холодильного агрегату комори); літній, перехідний і зимовий (для автоматизованої холодильної установки системи кондиціонування);

7. замикання дверей для закриття в холодильних приміщеннях при включеному світлі та захист мийок високого тиску (для автоматизованої холодильної установки приміщень зберігання).

Функціонал робочого місця інструктора

1. створення, редагування, корекція, збереження та перегляд вихідних ситуацій та сценаріїв вправ;

2. введення несправності з призначенням часу їх виникнення і корекцією параметрів роботи моделі в процесі навчання;

3. можливість призначати, ставити на паузу, продовжувати, вмикати, вимикати запис вправи для обраного учня або всього класу;

4. також можливі додаткові опції за домовленістю із замовником.

Склад тренажера

1. програмне забезпечення складається з робочого місця інструктора та робочих місць слухачів; За бажанням замовника кількість робочих місць стажистів може варіюватися від 1 до 12 і більше;

2. робоча документація;

3. Описи та інструкція із застосування.

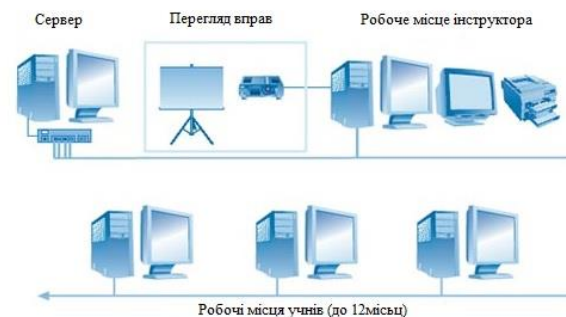


Рисунок 1. Робочі місця

Відповідності

Тренажер розроблений відповідно до вимог Державних освітніх стандартів:

1. Вища професійна освіта за спеціальностями: 271 – «Морський та внутрішній водний транспорт»

2. Вища професійна освіта за спеціалізацією: 271.02 – «Управління судновими технічними системами і комплексами»

Призначення тренажера

Тренажер призначений для вивчення складу, принципу роботи і набуття навичок управління холодильним агрегатом, як при нормальних умовах експлуатації, так і при виникненні несправності і аварійних ситуацій в його роботі.

Моделльні установки

Симулятор Автоматизованої Холодильної Установки включає в себе наступні модулі, які дозволяють відпрацьовувати дії в різних змодельованих процесах:

Установка (рис. 2) змодельована для створення та підтримання температурного режиму у двох групах провізійних комор з різними температурними умовами зберігання: три провізійні комори для зберігання заморожених продуктів та три запасні комори для зберігання охолоджених продуктів. В якості основного холодоагенту був обраний фреон R134a, і є можливість переходу на R401b.

Призначення

Автоматизована холодильна установка призначена для створення і підтримки заданих

температурних режимів для зберігання продуктів харчування в двох групах провізійної комори.

Склад системи

Система включає і моделюється в симуляторі:

- забезпечення комор термодинамічним об'єктом;
- чиллери 1 і 2;
- газові та рідинні трубопроводи з клапанами, такими як гідравлічні і газодинамічні об'єкти;
- водяний насос для охолодження морської води.

Продовольчі комори поділяються на дві групи за рівнем температури, що підтримується в них.

Першу групу складають три провізійні комори для зберігання заморожених продуктів:

- Butter – Зберігання масла, температура -2 °С;
- Meat – Зберігання м'яса, температура -15 °С;
- Fish – Зберігання риби, температура -15 °С.

Друга група складається з трьох провізійних комор для зберігання охолоджених продуктів:

- Fruit – Зберігання плодів, температура +2 °С;
- Vegetables – Зберігання овочів, температура +2 °С;
- Dry prov. – Зберігання сухих продуктів, температурний режим +8 °С.

Кожна з холодильних машин працює на свою групу споживачів, але холодопродуктивності кожної з них достатньо для роботи обох груп комор при необхідності. Така можливість забезпечується з'єднанням труб запірною арматурою. В якості основного холодоагенту був обраний фреон R134a, і є можливість переходу на R401b.

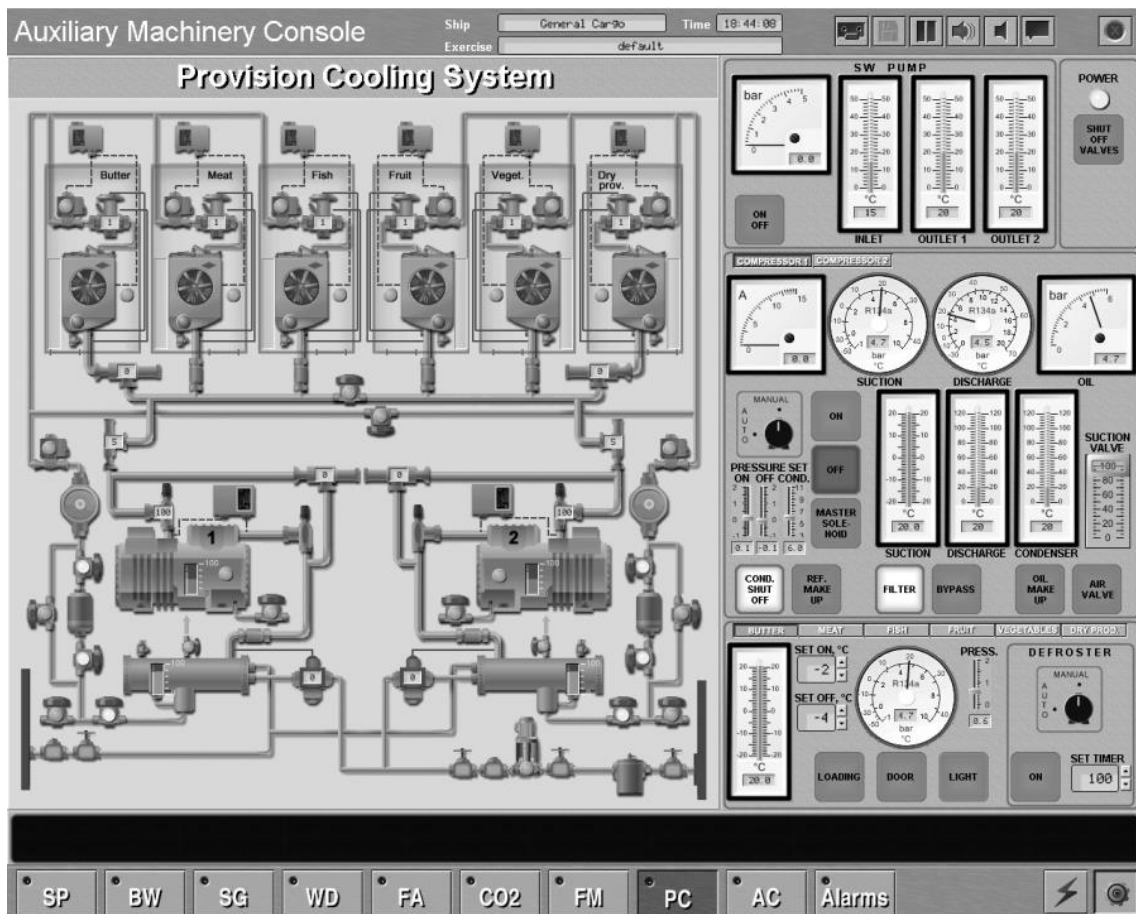


Рисунок 2. Автоматизована холодильна установка для провізійних комор

Система кондиціонування повітря (ас)

Моделюється установка (рис. 3), призначена для забезпечення комфортних умов проживання. В якості холодоагенту був обраний газ R22.

Призначення системи (ас)

Центральна прямоточна двоканальна система кондиціонування високого тиску призначена для цілорічної обробки тепла і вологості повітря в житлових приміщеннях, їдальні, кают-компанії та інших приміщеннях судна.

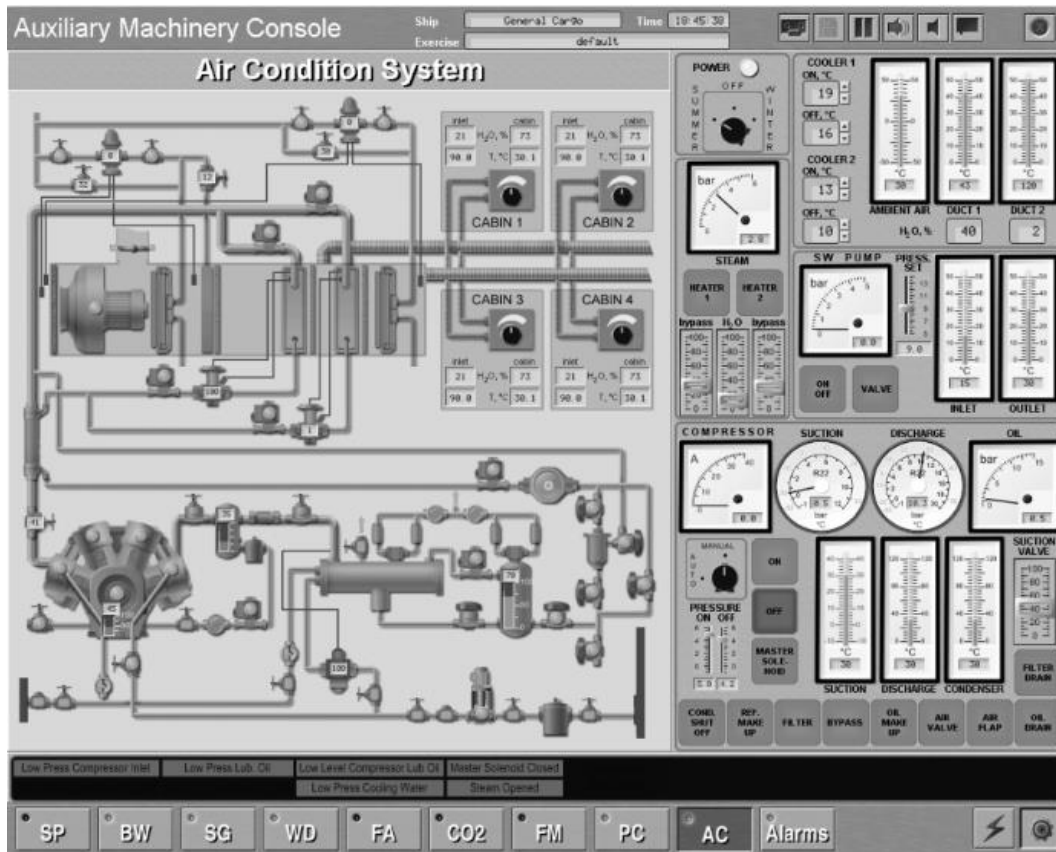


Рисунок 3. Автоматизована холодильна установка для кондиціонування повітря

Склад системи

Система включає і моделюється в симуляторі:

- трубопровідна система як гідро- і газодинамічний об'єкт;
- холодильна машина;
- водяний насос морської води для охолодження;
- парові нагрівачі повітря;
- повітроохолоджувачі;
- відцентровий прохідний вентилятор з повітряним фільтром;
- регулятор вологості.

Робота кондиціонера здійснюється цілий рік в одному з трьох режимів: літній - температура зовнішнього повітря ($t_{нар}$) $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ і вище, перехідний – $t_{нар}$ від $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ і зимовий - температура $t_{нар}$ нижче $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Висновки

З вищесказаного можна дійти до висновку, що навчання на комп'ютерному тренажері це дуже важлива складова у підготовки спеціаліста, суднового механіка. Спеціаліст, судновий механік, отримує не тільки теоретичні знання по

предмету холодильна техніка, та ще знання на рівні близької до практики, на судні. Наскільки добре буде відпрацьовані різноманітні ситуації на тренажері, настільки легко можна визначити усі режими роботи холодильної установки на практиці, на судні.

Література

[1]. Engine Room Simulator ERS5-M-053C, Vessel Model "RO-RO", Trainee Manual. Transas LTD. 2009.

[2]. Engine Room Simulator, ERS 5000 TechSim, Dual Fuel Diesel-Electric LNG Carrier, Trainee Manual, 2015, Transas MIP LTD 1991-2015.

Відомості про авторів

Віктор Матвеев, механік I-го розряду, старший викладач кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-3826-7996](https://orcid.org/0000-0002-3826-7996)



CHOICE OF SHIP MANAGEMENT STRATEGY BASED ON DATA ANALYSIS

Tatyana Zaytseva[✉], Nataliia Kaminska[✉]

Kherson State Maritime Academy, Ukraine

Abstract

Keywords: Forecasting, Natural phenomena, Wind wave, Mathematical model, Regression equation.

These theses focus on such an important question as a choice of ship management strategy based on the natural phenomena forecasting conducted on the results of statistical observations on environment behavior, which surrounds a ship. Since solving problems of analysis and forecasting involves the use of mathematics, the study of this topic within the discipline "Information Technology in Professional Activities" takes place using the capabilities of spreadsheets, supported by mathematical methods for constructing regression equations and solving systems of algebraic equations. The use of mathematical modeling apparatus allows students to solve such problems. The using of mathematical modelling apparatus allows students to be able to solve such tasks.

The general problem statement and its actuality

Forecasting of natural phenomena that have different, both positive and negative influence on the strategy of ships using is an integral part of the scientific approach to management decision. Decision making by the chosen criterion is particularly relevant in the extreme working conditions at the sea. Sometimes ship's fate, health and lives of the crew depend on that decision. The foundation of forecasting is the base of the main features of studied phenomenon formed accordingly the analytical support of the future mathematical model.

The current stage of development of marine forecasts is characterized by using traditional and new methods of forecasting. Besides, modern computer technologies are widely used in the development of forecasting methods and in making operational marine forecasts.

In Kherson State Marine Academy (KSMA) the first-year students study the discipline "Information Technologies in Professional Activities". The purpose of studying of the course material is form skills, abilities and competences which will provide the ability to analyze information and predict the behavior of the system for the next period, and to find the necessary ways to solve problems related to the performance of social and professional functions. The applied orientation of the discipline allows qualitatively forming subject competences connected with the using of data processing methods, calculation methods, mathematic and information modelling, business graphics.

This article focuses on the one of discipline chapter "Data analysis and forecasting" on the example of mathematical modelling of the phenomena forecasting connected with professional marine

activity based on results of statistical observations of the water environment behavior.

Actuality of the research

Foreign researchers have made a great contribution to analysis and forecasting of processes that affect to safe navigation (J. A. Ewing [1], K. D. Pfeiffer [2] and others).

Fundamentals of numerical methods for solving problems are published in scientific and educational publications by famous authors: J. Hoffman. [3], S. Chapra [4], S. Semerikov [5]. Modern applications of numerical methods are associated with the use of information technology, so many scientists consider the MS Excel spreadsheet as a computer environment for modeling, such as El-Gebeily [6] and the authors of this theses.

Problems of introduction of computer modelling in the study of informatics disciplines paid attention to foreign and Ukrainian specialists V. Kukharenko, O. Rybalko, O. Markovich [7].

Modern operative oceanography develops by way of uniting many countries efforts. International projects involving Germany, Italy, Portugal, and the Netherlands are being successfully implemented. Understanding of this way's importance in study world ocean allows developing scientific research work that result is an improvement ship coordination and disaster prevention systems to ensure safe.

Solving basic problems

Hydrometeorological conditions forecasting provides for a scientific evidence system, development of different hypotheses and using methods that

characterized by mathematical formalization [9]. The variability of oceanological processes depends on a most range of factors so marine forecasts tend to have a probabilistic nature. The long-term prediction of any characteristics of the seas and oceans regime can only be made approximately so as all process factors that are unknown. Further, as a rule, the forecasting methods are based on the use of discrete values characteristics, also brings a certain error in the study results of this process.

Statistical methods of forecast provide an opportunity to evaluate the development of hydrometeorological processes in the future based on the results of past observations, using knowledge of probability characteristics of these processes. An observation series of the predicted characteristic and factors that it depends on is composed for establish a link between investigated quantities. Methodology development suitable for making operational forecasts is a complex scientific study that can be broken into several stages.

At the first stage of study a general pattern between phenomena is identified and main factors are determined. As forecasting experience has shown, many predictors that are used in the methods do not improve forecast quality. The optimal number of predictors is three or four as a rule.

The right decision when choosing the number of predictors is greatly facilitated develop of forecast method and ensures increased the reliability of operational forecasts.

At the second stage of development forecast methodology general physical regularity that was previously identified applies to specific physical and geographical sea conditions. For this purpose, observational data that needed for develop of method are carefully analyzed for representativeness and comparability of observations in different years.

At the third stage are beginning to quantitative prognostic relationships. Graphical comparison of predicted element with predictors should be considerate as a visual way to find connections. This technique gives possible not only to establish the existence of a statistical relationship, but also to determine type of its dependency. A detailed cases' analysis that deviates should be made and ascertain reasons that led to a disturbance in the general regularity. The wider points variation on the link's graph, the more influence degree of random factors.

Next stage is the choice of the most adequate mathematical apparatus, which would allow the best approach to the problem, i.e. creation of a reliable forecast method.

Hydrodynamics forecast method is based on solving of hydro- and thermodynamics equations. As of

today, with some simplifications, numerical analysis for short-term forecasts of storm surges, water temperatures of the upper quasi-homogeneous ocean layer and its thickness, ice formation period, ice thickness increasing and melting of snow and ice cover have developed. Example, for Southern Hemisphere when describe physical process in the ocean such turbulent liquid thermodynamics equations can be accepted:

for moving

$$\frac{du}{d\tau} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f v + \frac{\partial}{\partial z} k' \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (1)$$

$$\frac{dv}{d\tau} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + f u + \frac{\partial}{\partial z} k' \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = g \rho; \quad (3)$$

for continuity

$$\text{div}_h u + \frac{\partial \omega}{\partial z} = 0; \quad (4)$$

for heat distribution

$$\frac{\partial t_\omega}{\partial \tau} + u \cdot \text{grad}_h t_\omega + \omega \frac{\partial t_\omega}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} k_\omega \frac{\partial t_\omega}{\partial z} + \sum Q; \quad (5)$$

for salt distribution

$$\frac{\partial S}{\partial \tau} + u \cdot \text{grad}_h S + \omega \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} k_s \frac{\partial S}{\partial z} \quad (6)$$

for state of sea water

$$\rho = \rho(t_\omega, S, P_\omega), \quad (7)$$

where all parameters of relation represent some characteristics of sea water condition.

Most simple way to objectively realization information that based on statistical observations for forecast of ocean phenomena is a constructing regression equation. Application of the mathematical statistics apparatus provides availability of long enough series of observations for predicant and predictors. These temporary series can be considered as system of random correlated variables. The normalized correlation matrix is a well characteristic of links in such systems.

Functional depending is a most studied kind of link between quantities, in term of implementation, when each value of one quantity (factor sign) X corresponds to quiet defined value (result sign)

Y . However, in practice, as rule, have not dealt with functional dependencies, but of statistical ones. In this case, to each value of one quantity corresponds many possible values of other quantity. Dispersing of possible values explains by influence of many additional factors, which usually neglected when link between quantities is studied. A dimensionless correlation coefficient characterizes of dependency measure between quantities in a linear regression, that in absolute value no more than one: $abs(r) \leq 1$.

Correlation coefficient equals zero for independence quantities X and Y . Equality of correlation coefficient to zero means that linear dependence is absent (but does not eliminate nonlinear dependence). Other correlation methods are used in nonlinear link. The closer is absolute value of the correlation coefficient to one, the closely is the linear dependence between the quantity. Equality of correlation coefficient to one means that functional dependence is present between X and Y . Correlation coefficients don't change when starting point and measurement scale of quantities of X and Y are

changed. It makes possible to significant simplify the calculation by selecting a convenient starting point (X_0, Y_0) and corresponding units of scale. Correlation coefficient and regression equation for both variables can be found approximately from the correlation chart, and more accurately – by method of least squares.

Consider a typical task of wave height forecasting depending on wind speed and the duration of its effects (forecasts of wind waves). The main elements of wind waves are height h , period T , length X , phase speed c , steepness e , ridge length L . If sea depth is more than half the wavelength, wave elements are independent of the depth. If sea depth is less than half the wavelength, then wave elements are change influenced by seabed. The concept of "deep water" has a relative meaning and is defined by the ratio of depth H and wavelength X .

The task is to determine the type and dependency parameters of the wave height on the wind duration. Based on the experimental data the charts are drawn (fig. 1).

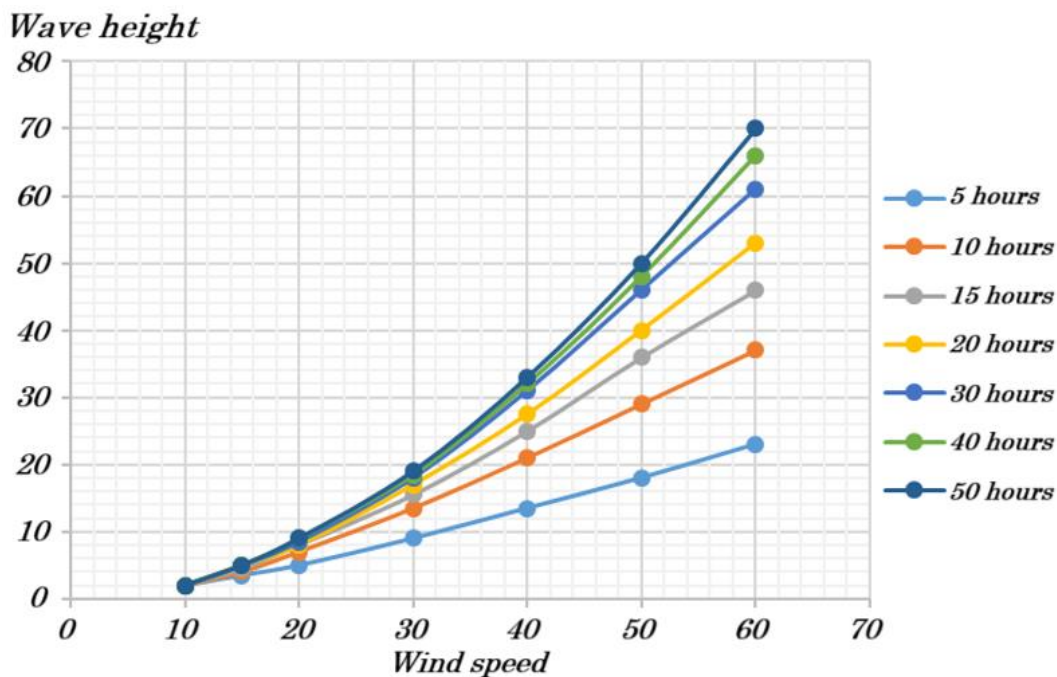


Figure 1. Dependence of wave height on wind speed and duration

Created scatter chart allows making conclusion that in the wind duration from 5 to 15 hours the dependence can be approximated by linear function; in the wind duration from 20 to 50 hours the dependence will be probably quadratic.

Next, you can find the parameters of the corresponding dependencies and estimate the standard deviation for each of the obtained analytical relationships.

Performing the calculations show that the results obtained confirm the hypothesis about linearity

dependences, because the corresponding regression coefficients R^2 (approximation reliability) are close to 1 (the type of dependence is chosen correctly):

first row (wind duration 5 hours):

$$y = 0,423x - 3,004; R^2 = 0,995; \tag{8}$$

second row (wind duration 10 hours):

$$y = 0,71x - 6,62; R^2 = 0,9946; \tag{9}$$

third row (wind duration 15 hours):

$$y = 0,893x - 9,132; R^2 = 0,9909. \quad (10)$$

Parameters of quadratic dependence $\bar{y} = a_0x^2 + a_1x + a_2$ are determined by system decisions.

$$\begin{cases} a_0 \sum_{i=1}^n x_i^4 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^3 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i, \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i^3 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i, \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i + a_2 \cdot n = \sum_{i=1}^n y_i, \end{cases} \quad (11)$$

are found in the matrix method using built-in Excel mathematical functions.

Using the obtained equations (analytical dependencies), it is possible to make a wave height forecast for any wind duration and any wind speed.

Conclusions

The aim of the discipline “Information Technologies in Professional Activities” is studying of the mathematical (computer) modelling method, its application in various subject areas, as well as ability to predict and analyze the results of obtained decisions.

The learning material of discipline provides that students solve problems formulated in their subject area and related to formalization and further use of computer technologies. Such tasks require considerable time for solving, system approach to development.

In the using of information technologies, students practice skills of development of information models, solution algorithms, evaluating of obtained results. They feel a qualitatively new socially significant level of competence and develop professional qualities of a person.

Significant number of navigational, engineering tasks is reduced to the solving of the equations (in equations), the system of equations (system in equations), differential equations or systems, calculating the integrals described objects or phenomena. Using of mathematical (information) modeling methods, forecasting of decision-making results in various activities demand specialists to mastery of the appropriate mathematical apparatus.

References

[1]. Ewing, J.A.: A numerical wave prediction model for the North Atlantic Ocean. Ocean

Dynamics 24, 241–261, <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02225707>.

[2]. Pfeiffer, K.D.: Ein dreidimensionales Wattmodell. GKSS Forschungszentrum Geesthacht GMBH. Geesthacht (1995).

[3]. Hoffman, J.: Numerical Methods for Scientists and Engineers. 2nd edn. New York, <https://epiportal.com/Ebooks/Numerical%20Methods%20for%20Engineers%20and%20Scientists.pdf>.

[4]. Chapra, S., Canale, R.: Numerical Methods for Engineers. McGraw Hill Education. New York, <https://www.academia.edu/31722261/Numerical-Methods-for-Engineers-7th-Edition-steven-chapra>.

[5]. Semerikov, S.O., Teplytskyi, I.O., Yechkalo, Yu.V., Kiv, A.E.: Computer Simulation of Neural Networks Using Spreadsheets: The Dawn of the Age of Camelot. In: Kiv, A.E., Soloviev, V.N. (eds.) Proceedings of the 1st International Workshop on Augmented Reality in Education (AREdu 2018), Kryvyi Rih, Ukraine, CEUR Workshop Proceedings, vol. 2257, pp. 122–147.

[6]. El-Gebeily, M., Yushau, B.: Numerical Methods with MS Excel. The Montana Mathematics Enthusiast, vol. 4(1), pp. 84-92, <http://scholarworks.umt.edu/cgi/>.

[7]. Markovich, O.S.: Computer modeling in educational research: the development of new teaching methods using information technology. Modern problems of science and education. <https://science-education.ru/ru/article/view?id=21724> (2015).

Authors' Information

Tatyana Zaytseva, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Department of Innovative Technologies and Technical Devices of Navigation, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, [ORCID ID: 0000-0001-6780-719X](https://orcid.org/0000-0001-6780-719X).



Nataliia Kaminska, Teacher, Department of Innovative Technologies and Technical Devices of Navigation, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, [ORCID ID: 0000-0002-9975-7403](https://orcid.org/0000-0002-9975-7403).



ТЕОРЕТИЧНА ПІДГОТОВКА СУДНОВОГО МОТОРИСТА З ВИКОРИСТАННЯМ ДРУКОВАНОГО РОБОЧОГО ЗОШИТА

Личко Б.М. ✉, Шостак В.П.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

Анотація

Ключові слова: суднова енергетична установка, моторист (машиніст), робочий зошит, наочний навчальний посібник.

При здобутті кваліфікації суднового моториста ключовою дисципліною є "Суднові енергетичні установки та їх експлуатація". Для її вивчення пропонується аналогічний за назвою друкований робочий зошит, у якому ~ 85 % наочного матеріалу. Наводяться приклади двох сторінок із цього зошита. Надається його QR-code. Вказуються основні переваги наочного методичного посібника для вивчення питань суднової енергетики.

Вступ

Природне ускладнення суднової енергетичної установки з плином часу обумовлює все зростаючий обсяг інформації, яку повинен засвоїти курсант (майбутній моторист) та ще й таким чином, щоб, несучи вахту у машинному відділенні забезпечити безаварійне технічне обслуговування машин і механізмів. Тож теоретичне навчання охоплює все більше коло питань з суднової енергетики, що потребує нових методичних підходів до навчальної літератури.

Нижче пропонується використання у навчанні друкованого робочого зошита, який являє собою наочний навчальний посібник як засіб вирішення, в певній мірі, проблеми освоєння зростаючого потоку інформації.

Актуальність досліджень

Робота моториста на судні достатньо відповідальна, адже судно в рейсі знаходиться під впливом водної, і головне, морської стихії. Крім того, нерідкі форс-мажорні обставини. Поряд з цим судовим розкладом, як правило, не передбачається дублювання будь-якого члена екіпажу. Отже, теоретична підготовка моториста повинна бути такою, щоб випускник не мав явних прогалин стосовно обраної спеціальності – професії «Моторист (машиніст)» відповідно до Державного стандарту професійно-технічної освіти ДСПТО 8340-01.61.00-2014. Цьому, як ми вважаємо, сприятиме використання у навчанні робочого зошита, тобто друкованого посібника для безпосередньої роботи в ньому [2, 3].

Викладення основного матеріалу

Професійно-теоретична підготовка моториста (машиніста) складається із одинадцяти

навчальних дисциплін (предметів) загальним обсягом понад 400 академічних годин, найбільша з яких – «Суднові енергетичні установки та їх експлуатація». Відносний обсяг вказаної дисципліни становить 35 %. Обсяг інших окремих дисциплін лежить в межах 4...12 %.

Викладання та вивчення судових енергетичних установок (СЕУ) в аспекті їх будови та експлуатації без ілюстративного матеріалу практично не можливо. А тому робочий зошит для вказаної дисципліни являється наочним навчальним посібником, основною складовою якого є рисунки та схеми (див. наприклад [3] та однойменний посібник). QR-code останнього наведено на рисунку 1 – для швидкого доступу в Інтернеті.



Рисунок 1. QR-code для наочного навчального посібника «СЕУ та їх експлуатація. Робочий зошит»

Як ми вважаємо на підставі багаторічного використання в навчальному процесі робочих друкованих зошитів для вивчення суднової енергетики та чисельних публікацій, такий зошит покращує якість навчання, підвищує його ефективність, йому притаманні наступні переваги:

- наявність систематизованих відомостей у стислому вигляді;
- розміщення поряд з ілюстративним матеріалом відповідних завдань, що підлягають обов'язковому виконанню (при необхідності із допомогою викладача), та контрольних питань;
- завдання та питання різного рівня складності забезпечують практичне оволодіння теоретичним матеріалом;

- друкована основа робочого матеріалу, запозиченого з різних джерел (наприклад з [1]) та власних авторських розробок викладача, надає можливість економити час і підвищити продуктивність занять, а, отже, вивчити більше за один і той же період;
- полегшує самостійне вивчення дисципліни, наприклад, при дистанційному навчанні.

Завдяки високому ККД дизелі зайняли пануюче положення на морському транспорті.

Застосування мало- і середньооборотних двигунів на транспортних судах

Завдання. Доповнити назви рисунків.

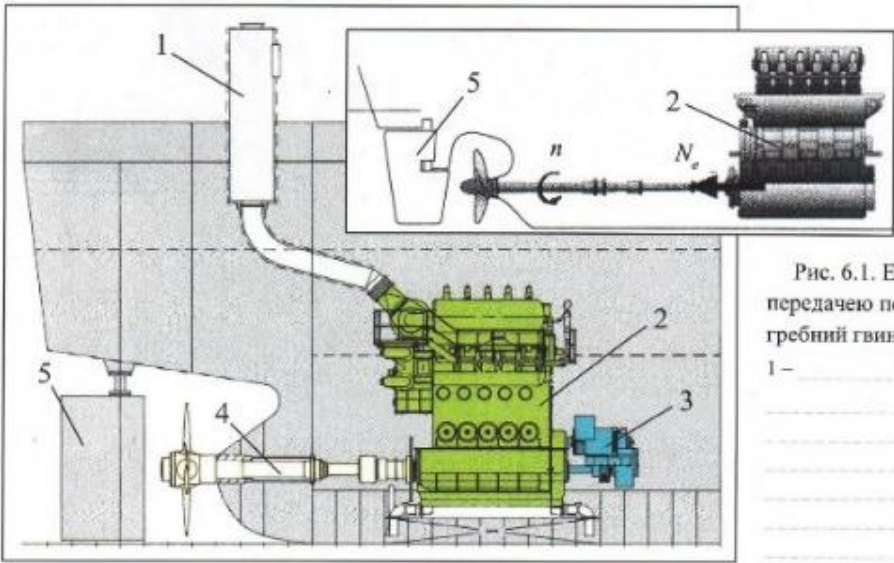


Рис. 6.1. ЕУ з прямою передачею потужності на гребний гвинт:
1 – _____
2 – _____
3 – _____
4 – _____
5 – _____

[20] Ключові слова

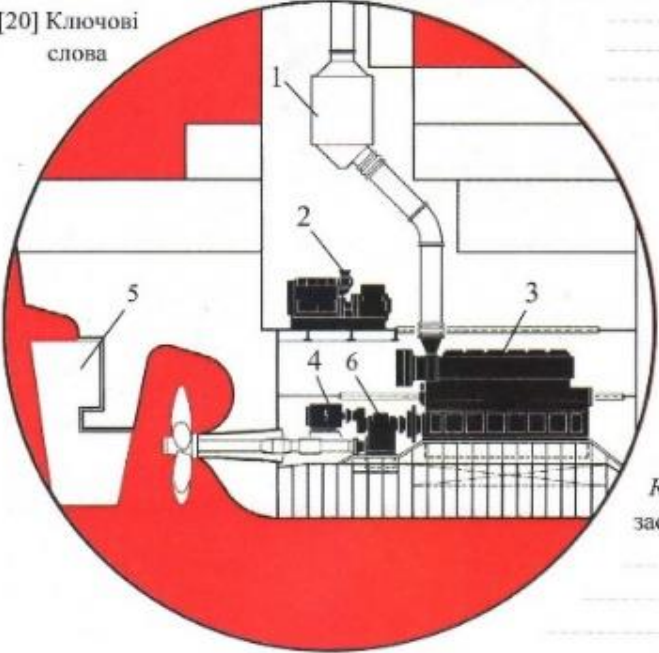


Рис. 6.2. Суднова дизельредукторна установка: 1 – _____
2 – _____
3 – _____
4 – _____
5 – _____
6 – _____

Контрольне питання. Який сенс у застосуванні валогенераторів?

Рисунок 2. Сторінка з робочого зошита за темою «Суднові енергетичні установки з мало- і середньооборотними двигунами»

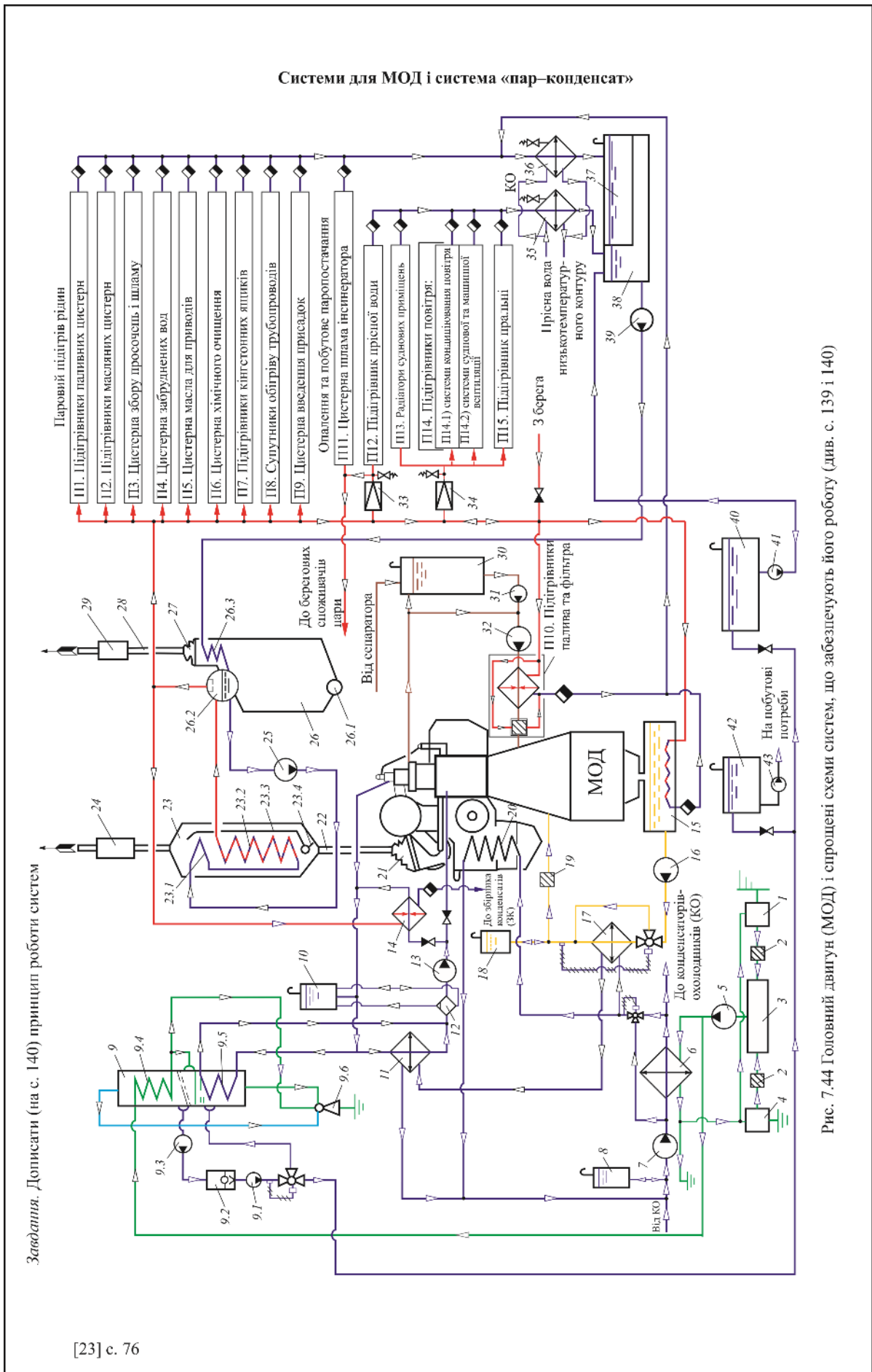


Рисунок 3. Сторінка з робочого зошита за темою «Системи для головного малооборотного двигуна»

Робочий зошит (QR-code, рисунок 1) з дисципліни «СЕУ та їх експлуатація» розроблений згідно з робочою програмою навчальної дисципліни та відповідно до типової навчальної програми.

На рисунку 2 показана, як приклад, одна із 202 сторінок (формат А4) робочого зошита, на якій зображені вигляди пропульсивних установок на лівий борт судна з прямою передачею потужності на гребний гвинт та з редукторною передачею. На сторінці вказано завдання, контрольне питання та передбачено місце для письмового виконання завдання і надання відповіді. Також вказано і літературне джерело, де можна знайти інформацію відповідно до зображених рисунків. Передбачається, що викладач пояснюватиме курсантам (майбутнім мотористам) позиції на рисунках і застосування мало- і середньообертових двигунів на морських транспортних суднах тощо, також допомагатиме виконати завдання, відповісти на контрольне питання та зробити лаконічні записи в обсязі щонайменше «одне речення». На наш погляд, ця сторінка формує у курсанта правильну уяву про основні типи пропульсивних установок сучасних транспортних суден.

Інша сторінка (рис. 3) несе більш абстрактну інформацію про СЕУ, привчає курсанта до схематичного зображення систем енергетичних установок і містить лаконічні відомості (у вигляді стислих написів) про споживачів водяної пари. Цей рисунок потребує обширних пояснень викладачем. Тут також вказано літературне джерело та номер сторінки для швидкого пошуку.

Висновки

Маємо надію, що надана довідка про робочий зошит спонукатиме викладачів і курсантів до використання цього, або подібного методичного матеріалу при вивченні певної дисципліни. Адже у цьому випадку:

- більше інформації (переважно наочної) за короткий час;
- виконані усі завдання та надані відповіді на контрольні питання запобігають суттєвим прогалинам у вивченні дисципліни;

– уникнення зайвих зусиль щодо пошуку та відображенню первинної інформації по судовій енергетиці.

Література

[1]. Допатка, Р. Книга о судах [Текст]: пер. с нем. / Р. Допатка, А. Перепечко. – Л.: Судостроение, 1981. – 208 с.

[2]. Запровадження нового Державного стандарту базової та повної середньої освіти. Освітня галузь «Мови та літератури» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://osvita.ua/schoole/lessons_summary/edu_technology/31215/

[3]. Системи судових дизельних установок. Робочий зошит: навчальний наочний посібник / Миколаїв НУК – ФОП Ємельянова Т.В., 2021. – 128 с. (11,5 друк. арк., електр. видання 57,0 МБ) (співавтор Кісарова А.І.)

Відомості про авторів

Богдан Личко, к.т.н., доцент, в.о. завідувача кафедри експлуатації судових енергетичних установок та теплоенергетики, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна, [ORCID ID: 0000-0003-3943-9689](https://orcid.org/0000-0003-3943-9689).



Володимир Шостак, к.т.н., професор кафедри експлуатації судових енергетичних установок та теплоенергетики, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-8071-389X](https://orcid.org/0000-0002-8071-389X).



SOME FEATURES OF THE TRAINING OF SHIP MECHANICS IN THE CONDITIONS OF DECARBONIZATION OF THE FLEET

Jurii Kisietov✉

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolayiv, Ukraine

Abstract

Keywords:

IMO regulations, decarbonization, ship mechanic training, alternative fuels, educational process, skills and competencies.

The impact of decarbonization trends in the shipping industry due to the introduction of new alternative fuels and their consequences for the training needs of ship mechanics are considered. Normative documents of the IMO, which regulate the reduction of emissions into the environment, also raise the issue of additional training of ship crews regarding the features of management, operation, repair and maintenance of equipment and equipment involved in ship decarbonization processes.

Introduction

The International Maritime Organization (IMO), which regulates and monitors the impact of world shipping on the environment, regulates the reduction of emissions during fleet operation over time [1, 2].

Relevance of research

The implementation of the forecasts that we are considering is accompanied by the expectation of a significant increase in the number of sailors who need training in technologies for the use of alternative fuels for the ship's power plant [3, 4].

Presentation of the main material

In the 2018 IMO scenario, it is expected that by 2050, 310,000 seafarers will sail on ships with alternative propulsion and will require additional training. In the "Decarbonization by 2050" scenario

750,000 seafarers will need additional training to work with alternative fuels and technologies. In a scenario with zero carbon dioxide emissions by 2050, which involves a sharp increase in the use of alternative fuels. in the 2020s, 450,000 seafarers will need additional training by 2030 and 800,000 by the mid-2030s. There are also a number of specific issues related to safety issues for traditional and new fuel technologies (рис. 1).

Let's consider some features of the influence of the processes of introduction of new alternative types of fuel on the training process of ship mechanics.

The given information shows that the above requirements must be taken into account in the relevant education systems in order to be able to provide the shipping fleet with competent personnel. Fig. 2 shows the basic skills and competencies of ship mechanics, which influence the in-depth attention in curricula and programs of their training.

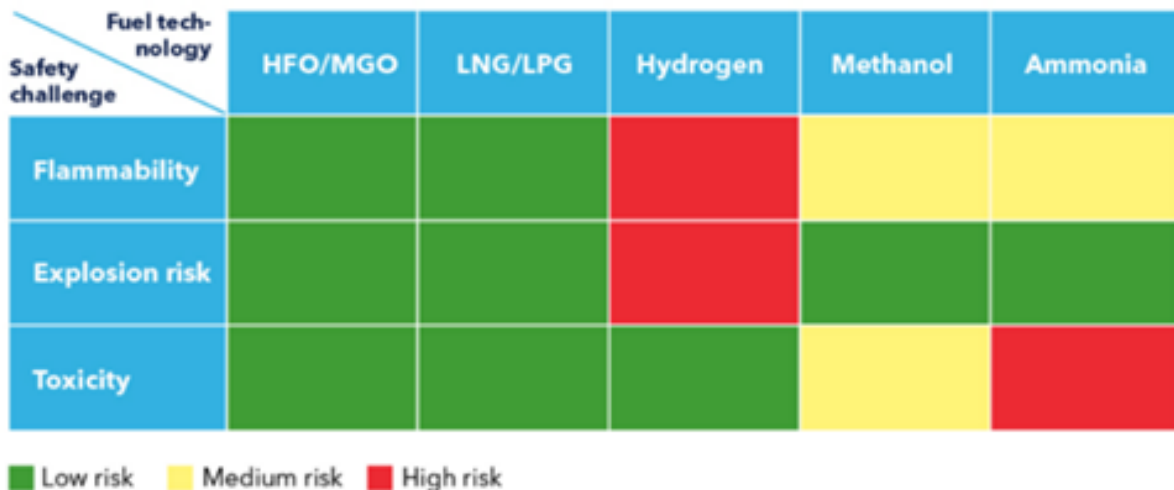


Figure 1. Overview of safety issues for traditional and new fuel technologies used on board

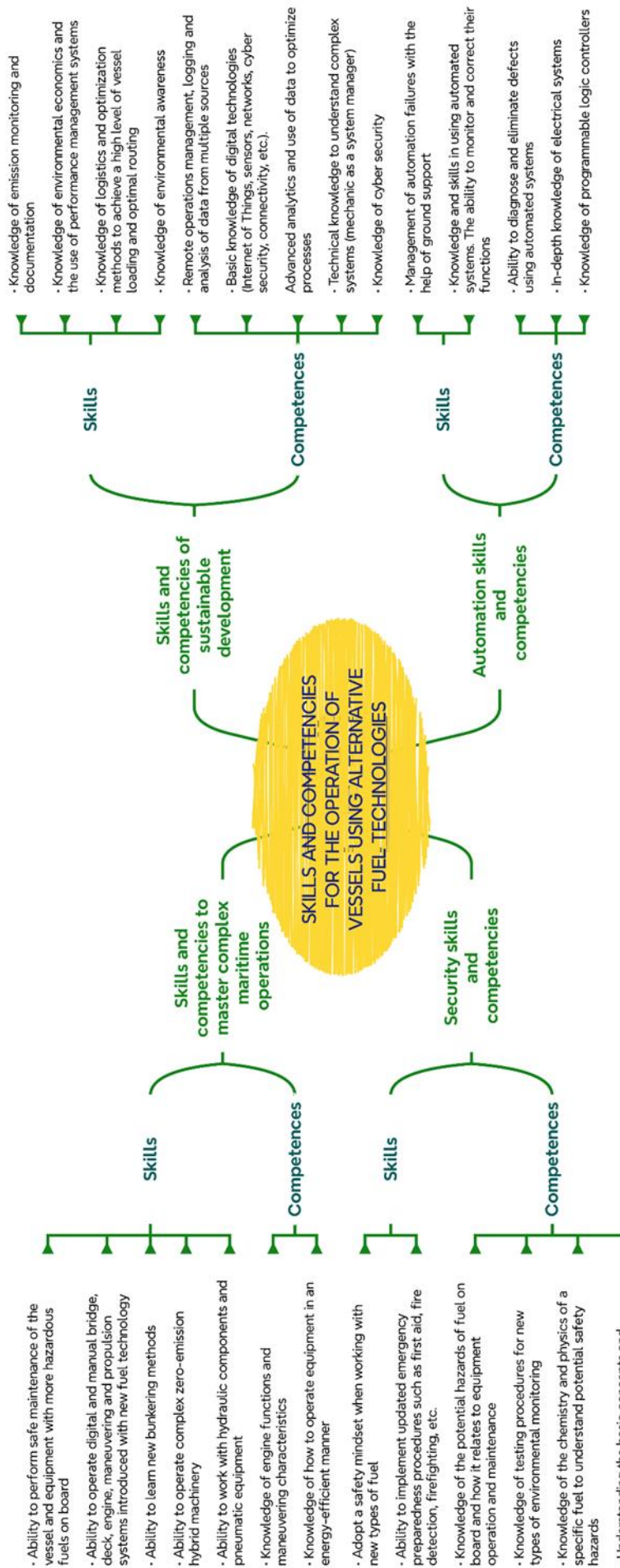


Figure 2. Skills and competencies for the operation of vessels using alternative fuel technologies

Conclusions

In the interests of ensuring the safety of the ship, crew and cargo, as well as for the reasons of reducing costs and periods of decommissioning of the ship, it is important to focus attention on the quality of training of mechanics for work in the conditions of using new alternative types of fuel. It is important that shift mechanics are fully familiarized with the equipment and facilities involved in preparation and processing fuel on the ship, maintenance measures and other issues of the processes of operating the equipment of the ship's power plant.

References

[1]. International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers as amended, including the 1995 and 2010 Manila Amendments. STCW Convention and STCW Code. 2011 edition. Language (s): ENG, FRE, SPA, RUS, CHI, ARA (IMO-IC938): http://SEARCH.LIGA-ZAKON.UA/L_DOC2.NSF/LINK1/MU10242.html

[2]. Sulphur Cap 2020: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>.

[3]. Raymond Antoni Kaspersen (PM), Henning Ødeby Karlsen, Henrik Helgesen, Georg Giskegjerde, Christine Lagerstedt Krugerud & Peter Nyegaard Hoffmann INSIGHTS INTO SEAFARER TRAINING AND SKILLS NEEDED TO SUPPORT A DECARBONIZED SHIPPING INDUSTRY. Report no.: 2022-0814, rev. 0, Date: 2022-11-04, 25 p.

[4]. <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/New-study-of-seafarer-training-and-skills-needed-to-support-decarbonization.html>.

Authors' Information

Jurii Kisietov, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolayiv, Ukraine, [ORCID ID: 0000-0002-5360-9376](https://orcid.org/0000-0002-5360-9376).



ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ: КЛЮЧ ДО КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНОСТІ В СУЧАСНОМУ СВІТІ

Віштак І.В. [✉], Майданевич Л.О.

Вінницький національний технічний університет, Україна

Анотація

Ключові слова: цифрова трансформація, конкурентоспроможність, людські ресурси, новітні технології.

Провідні підприємства впроваджують комплексні проекти цифрової трансформації, що призводять до культурних та організаційних змін, переосмислення бізнес-моделей та процесів. Ініціативи з прискорення цифрової трансформації, підтримані вищим керівництвом, спрямовані на створення екосистеми цифрової економіки через інтеграцію технологій та компетенційний розвиток. Кваліфіковані фахівці, готові і, головне, здатні впроваджувати зміни, є ключовим елементом, без якого реалізація цілей Індустрії 4.0 неможлива. Розвиток нових компетенцій спрямований на підготовку фахівців більш гнучкими, інноваційними, конкурентоспроможними, ефективними, здатними впроваджувати та використовувати новітні технології. Професійність персоналу, як у частині зміни професії або посади, так і у частині зміни сфери зайнятості, є необхідною умовою повномасштабної цифрової трансформації.

Вступ

Впровадження принципів і технологій Індустрії 4.0 стало світовим трендом [1]. Провідні підприємства та організації розробляють і реалізують комплексні проекти (програми, плани дій) цифрової трансформації, які призводять до значних культурних та організаційних змін, до переосмислення бізнес-моделей, бізнес-процесів, продуктів, послуг, каналів дистрибуції, взаємодії з клієнтами та партнерами. Суть процесу цифрової трансформації, який ініціюється або має потужну підтримку зі сторони вищого керівництва, полягає в етапному створенні, згідно з детальними планами, екосистеми цифрової економіки на основі інтеграції цифрових промислових технологій, інформаційних технологій, бізнес- та технологічних процесів, а також фахівців з новими, "цифровими" компетенціями на всіх рівнях. Важливо забезпечити міцний зв'язок між виробництвом та технологіями.

У процесі цифрової трансформації передові технології використовуються для створення нових продуктів та послуг, впровадження інновацій та забезпечення здатності швидко адаптуватися до змін. Важливо, що процеси цифрової трансформації торкнулися не лише комерційних організацій, але й державні інституції, які займаються вирішенням промислових проблем, з використанням новітніх технологій.

Актуальність досліджень

Цифрова трансформація призводить до значних змін у сучасному житті, організації праці, процесах, вимогах до компетенцій, щоб повністю використовувати синергетичний ефект від застосування промислових цифрових інформаційних технологій та їх впливу на суспільство. Кваліфіковані фахівці, готові і, головне, здатні впроваджувати зміни, є ключовим елементом, без якого реалізація цілей Індустрії 4.0 неможлива. Розвиток нових компетенцій спрямований на підготовку фахівців більш гнучкими, інноваційними, конкурентоспроможними, ефективними, здатними впроваджувати та використовувати новітні технології (Big Data, Internet of Things та інші). В результаті підприємства підвищують оперативну ефективність та гнучкість, генерують нові джерела прибутку та створюють принципово нові бізнес-моделі. В результаті впровадження передових технологій багатьом людям доведеться змінити професію, підвищити кваліфікацію, пройти перепідготовку, освоїти принципово нові, в тому числі не лише професійні, навички. Мобільність персоналу, як у частині зміни професії або посади, так і у частині зміни регіону зайнятості, є необхідною умовою повномасштабної цифрової трансформації української економіки, як частини світової.

Викладення основного матеріалу

Цифрова трансформація як важливий фактор забезпечення конкурентоспроможності організації в сучасних умовах. Сьогодні весь світ прагне перейти до нового технологічного ладу - Індустрії 4.0 [2]. Для цього організації впроваджують у свою діяльність технології Big Data, Internet of Things, адитивного виробництва, штучного інтелекту, когнітивного виробництва, хмарних технологій та інші.

Одним із ключових інструментів є цифрова трансформація, необхідність якої визнана на державному рівні більшістю країн. Узагальнюючи багато існуючих думок науковців, можна сказати, що цифрова трансформація - це процес впровадження цифрових промислових і інформаційних технологій в усі основні аспекти діяльності людини [3-6]. Для успішної реалізації проекту цифрової трансформації необхідно внести фундаментальні зміни в технології, корпоративну культуру, підходи до виконання виробничих операцій, до розробки, виробництва і поширення нових продуктів і послуг. Ефективність використання нових технологій у багатьох відношеннях визначається здатністю відмовитися від застарілих традицій, вмінням трансформувати процеси і бізнес-моделі. Цифрова трансформація - надзвичайно популярна тема, яка обговорюється експертами уже кілька десятиліть.

Спочатку під цифровою трансформацією розумівся перехід від паперового обігу документів до зберігання, обробки та передачі інформації у цифровому вигляді (оцифрування - важливий елемент цифрової трансформації, але в сучасних умовах не єдиний необхідний). У сучасних умовах поняття цифрової трансформації стало набагато ширше (наприклад, сканування, тобто перетворення паперового архіву конструкторської документації у форму електронного документа, не можна назвати цифровою трансформацією). Поява великих масивів цифрової інформації відкрила нові можливості для її використання, і почали з'являтися нові процеси, пов'язані з цим [5].

У сучасних умовах вміння швидко і ефективно впроваджувати і використовувати цифрові технології є одним із ключових напрямів підвищення конкурентоспроможності, а іноді і об'єктивною необхідністю для забезпечення виживання підприємства. Цифрова трансформація повинна бути спрямована на вдосконалення процесів, пошук нових ринків і джерел доходу, персоналізацію продуктів і послуг. Проект цифрової трансформації унікальний для кожного підприємства, але можна виділити наступні загальні етапи:

- формування плану (стратегії, плану дій) цифрової трансформації. Необхідно визначити

основні напрямки розвитку організації (виходячи з мети підприємства, завдань, клієнтів, контексту, в якому ведеться діяльність), на основі яких можна сформувати список ("пул") технологій, які будуть підтримувати цей розвиток. Необхідно провести обстеження організації, сформувати список наявних ресурсів, виділити серед них ті, які потребують модернізації. Нові технології реалізують нові бізнес-процеси, які необхідно чітко описати (формалізувати існуючу, цільову і проміжну (перехідну) моделі бізнес-процесів, наприклад, за допомогою TOGAF);

- навчання співробітників. Цифрова трансформація неможлива без кваліфікованого персоналу, як і будь-яке застосування нових технологій. Реалізувати це дуже складно, оскільки при традиційній організації виробництва і технологічних процесів співробітники повинні володіти певним обмеженим набором інструментів, які мало змінюються. Для успішної реалізації проекту цифрової трансформації персонал повинен бути готовий до радикальних змін в процесах, тобто необхідно розвивати не лише знання у галузі інструментів і технологій, методів їх використання, але й творче мислення та так звані гнучкі навички;

- впровадження новітніх технологій. Багато організацій вкладають значні ресурси в підтримку застарілих рішень, які не підтримують нові, ефективні цифрові процеси. Збереження застарілих технологій гальмує розвиток підприємства, відволікаючи значні ресурси, які могли б бути повернуті для впровадження передових рішень, більш ефективних і простих у використанні. Під новими технологіями слід розуміти елементи інформаційно-технологічної інфраструктури (апаратне забезпечення, телекомунікаційне обладнання та ін.), програмне забезпечення, виробниче обладнання тощо. Тільки комплексне розуміння цілей, завдань і інструментів цифрової трансформації може забезпечити конкурентоспроможність організації у майбутньому;

- якість людських ресурсів є ключовим фактором успіху цифрової трансформації. Співробітники завжди були і будуть одним з ключових ресурсів для будь-якого підприємства, компанії або організації, і підвищення якості цього важливого ресурсу є важливим завданням. Персонал повинен мати не лише теоретичні знання, необхідні практичні навички й уміння, але й особисті якості, необхідні для ефективної роботи в сучасних умовах (soft skills) [6].

У зв'язку з інтенсивним розвитком цифрових, інформаційних і управлінських технологій, змінами у підходах до організації праці, що вимагають реалізації комплексних заходів щодо цифрової трансформації, необхідно розробляти плани на середньострокову і довгострокову

перспективи, формувати нові, більш оптимальні та гнучкі структури управління, підготовку, перепідготовку і підвищення кваліфікації персоналу, спрямовані на підвищення відповідальності співробітників та забезпечення прийняття ними ефективних рішень.

Висновки

При формуванні кадрового резерву необхідно враховувати наявність необхідних знань, навичок та особистісних якостей. Ці аспекти можуть бути розвинуті в рамках освітнього процесу. При цьому високий рівень професійних компетенцій повинен підтримуватись та розвиватись в процесі неперервної освіти через перепідготовку та підвищення кваліфікації. Постійна конкуренція підвищує вимоги до знань та навичок співробітників. Підготовлені працівники, здатні максимально швидко впроваджувати та використовувати передові цифрові технології, є ключем до успіху проектів цифрової трансформації та ефективності бізнес-стратегії організації в цілому.

Література

- [1]. Mohamed M. Challenges and Benefits of Industry 4.0: an overview. *International Journal of Supply and Operations Management*. 2018. № 5(3). P. 256-265. DOI: 10.22034/2018.3.7.
- [2]. Kraus S., et al. Digital Transformation: An Overview of the Current State of the Art of Research. *SAGE Open*. 2021. № 11(3). <https://doi.org/10.1177/21582440211047576>.
- [3]. Saarikko T., Westergren U.H., Blomquist T. Digital transformation: Five recommendations for the digitally conscious firm. *Business Horizons*. 2020. № 63(6), P. 825-839. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2020.07.005>.
- [4]. Armstrong M.B., Landers R.N. Gamification of employee training and development: Gamification of employee training. *International Journal of Training and Development*. 2018. № 22(4). <https://doi.org/10.1111/ijtd.12124>.
- [5]. Barisic A.F., Barišić J.R., Miloloža I. Digital Transformation: Challenges for Human Resources Management. *ENTRENOVA - ENTERPRISE RESEARCH INNOVATION*. 2021. № 7(1). DOI: <https://doi.org/10.54820/GTFN9743>.
- [6]. Varadaraj A., Al Wadi B.M. A Study on Contribution of Digital Human Resource Management towards Organizational Performance. *International Journal of Management Science and Business Administration*. 2021. №7(5), P. 43-51. <https://doi.org/10.18775/ijmsba.1849-5664-5419.2014.75.1004>.

Відомості про авторів

Інна Віштак, к.т.н., доцент, доцент кафедри безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-5646-4996](https://orcid.org/0000-0001-5646-4996).



Леонід Майданевич, к.філос.н., асистент кафедри захисту інформації ступінь Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-7364-8874](https://orcid.org/0000-0002-7364-8874).



MODELING THE IMPACT OF IRRATIONAL SHIP MANAGEMENT ON THE CONDITION OF SHIP TECHNICAL SYSTEMS

Pavlo Nosov✉

Kherson State Maritime Academy, Ukraine

Abstract

Keywords: management of ship technical systems, destabilizing influences, irrational management, wear and tear, human factor.

This thesis investigates the critical issue of human error in the context of ship management and its consequences on the technical systems and the safety of navigation. The focus is on analyzing and modeling the destabilizing impact of the navigator's actions, such as improper speed control, navigation errors, and deviations from the planned route, which can lead to wear or failure of the ship's technical systems.

Introduction

Human errors, specifically irrational ship management, can significantly affect the operating modes of the main engine, causing destabilization and wear of ship technical systems and complexes [1]. Considering this, the development of rational risk management strategies and monitoring of the crew's actions [2] becomes important. Given the problem mentioned, there arises the task of formal analysis and modeling of the impact of the operator-sailor factor on the energy processes of the ship's engine room.

The multifaceted nature of the human factor, starting from its psychophysiology and health status [3,4], undoubtedly affects its level of operation and is almost unpredictable. Thus, incorrect use or insufficient understanding of the functionality of navigational systems, such as GPS, radars, echo sounders, and Automatic Identification Systems (AIS), as well as engine and course control means, can lead to critical errors in determining the ship's position and avoiding obstacles [5].

Such errors increase the risk of maritime accidents, including collisions, grounding, or even receiving serious damage due to navigational errors. All this outlines a problem that requires a systematic and effective solution to ensure the safety of navigation as a whole.

Relevance of research

The relevance of researching the facts of irrational ship management, its impact on energy systems and equipment has significant theoretical and practical value, as it affects the safety of navigation, fuel efficiency, the lifespan of ship technical systems, as well as the environmental aspects of maritime transport. Directly irrational ship management, especially during maneuvers,

significantly affects the efficiency of energy systems, in particular:

1. Prolonged use at minimal or maximal rotations can cause engine technical problems: wear of the cylinder group, accumulation of carbon deposit, and an overall decrease in efficiency. This not only increases fuel expenses but can also lead to costly repairs [6].

2. Choosing incorrect engine operating modes or ignoring the need for cooling system adjustments depending on operating conditions can lead to overheating. For instance, intensive engine operation without adequate cooling, especially in warm climates or under heavy load, can cause overheating of cylinders and pistons. This, in turn, can lead to a decrease in oil viscosity, an increase in internal friction in the engine, and, consequently, damage to these components [7].

3. Constant engine overload or operation at low rotations can lead to instability in the pressure and temperature of the exhaust gases feeding the turbocharger. These instabilities increase the risk of mechanical wear and thermal damage to the turbocharger, reducing its efficiency and reliability [8].

4. Incorrect choice of engine operating modes can lead to uneven fuel consumption, which, in turn, causes clogging of filters and fuel injectors. This can affect the optimal operation of the engine, reducing its performance and efficiency. Also, improper fuel consumption can lead to incomplete combustion, increasing emissions of harmful substances and fuel expenses [9].

5. Frequent overloading or incorrect distribution of load among generators can lead to their overheating and accelerated wear. Overheating can cause thermal damage to internal components, including insulation of windings, increasing the risk

of short circuits or generator failure. Irrational management of the ship's energy system can also lead to unnecessary wear of equipment, reducing its lifespan and reliability [10].

All mentioned directly holds significant importance for aspects such as:

Maritime Safety: The development and implementation of rational risk management strategies and monitoring of crew actions can significantly enhance maritime safety.

Fuel Efficiency: Optimizing engine management and increasing crew awareness of the importance of efficient fuel use are key to reducing operational expenses.

Lifespan of Ship Technical Systems: Understanding the impact of management decisions on equipment wear and developing measures for their optimization are important for extending the service life of ship systems.

Environmental Aspects: Effective management and optimization of operational procedures are crucial for reducing the environmental impact of maritime transport.

Therefore, the relevance of the research lies in the development and implementation of comprehensive models and approaches for optimizing ship management, which will help reduce risks to maritime safety.

Presentation of the main material

Let's describe the model taking into account the destabilizing influences of the navigator on the ship's movement:

1. Navigation error: incorrect course setting can lead to a change in the ship's direction.

2. Speed management error: incorrect speed estimation can result in the ship moving too fast or too slow.

3. Deviation from the planned route: unexpected deviations from the set route can cause destabilization.

We will define the navigator's main actions during maneuvers that can lead to a deterioration in the technical and operational condition of the ship's functional devices:

1. Excessive or improper use of the rudder: frequent or excessive maneuvering can lead to wear or breakage of the steering mechanism.

2. Incorrect speed management: constant changes in speed or abrupt transitions from full speed to sudden braking can increase the wear of the engine and other components of the power plant.

3. Ignoring or misinterpreting navigational data: negligent attitude towards information from navigation systems can lead to dangerous maneuvers that jeopardize the integrity of the ship and its systems.

Considering that the most complex and organized systems are the main engine and steering management systems, let's take a closer look at the processes of improper speed management on the ship (situation 2):

2.1. Sudden changes in speed: the navigator abruptly increases or decreases the ship's speed unnecessarily, for example, transitioning from full speed to sudden braking. This can happen due to an underestimation of the distance to other objects or due to an incorrect response to changes in navigation conditions.

2.2. Unstable speed: the lack of a constant speed, constant changes in speed without significant reasons. Such actions can be the result of uncertainty or insecurity in navigational decisions.

2.3. Speed mismatch to navigational conditions: the navigator maintains too high or too low a speed in conditions that require a different level of speed, for example, in dense traffic or in poor weather conditions.

The dependence of wear on the frequency of speed change:

$$V_{freq}(t) = \eta \cdot \sum_{i=1}^n |\Delta F_{thrust,i}|,$$

where: η – coefficient reflecting the influence of the frequency of speed changes on wear,

$\Delta F_{thrust,i}$ – change in engine thrust in the i -th time interval.

The effect of unstable speed on thermal wear:

$$W_{thermal}(t) = \theta \cdot \int_0^t |\Delta \dot{F}_{thrust}(t')|^2 dt,$$

where: θ – coefficient reflecting the impact of thermal load on wear.

Cumulative effect of wear:

$$V(t) = V_0 + V_{freq}(t) + W_{thermal}(t).$$

In such a representation, the model allows for a more accurate assessment of the impact of uncertainty in navigational decisions on the overall condition of the ship's power installations during maneuvers.

Considering the above, we will describe the dependence of wear of the ship's functional devices in general form in cases of improper speed management.

1. Sudden changes in speed:

$$W(t) = A_0 + \int_0^t (\xi \cdot \rho + \delta \cdot \Delta F_{thrust}(t') + \gamma \cdot V_{vib}(t') + \beta \cdot T_{heat}(t')) dt,$$

where: A_0 - initial wear of the ship's technical system,
 ξ, ρ - coefficients reflecting the impact of abrupt changes in thrust and their absolute magnitude on wear,
 δ - coefficient accounting for additional wear due to vibration change,
 $V_{vib}(t')$ - vibration parameter at time t' ,
 γ - coefficient of vibration impact on wear,
 β - coefficient of heat dissipation impact on wear,
 $T_{heat}(t')$ - heat dissipation parameter at time t' .

2. Unstable speed:

$$W_{unstable} = V_0 + \int_0^t (\lambda \cdot \sigma + \mu \cdot Var[F_{thrust}(t')]^2 + \nu \cdot R_{res}(t')) dt,$$

where V_0 - initial wear of the ship's technical system,
 λ, σ - coefficients reflecting the impact of frequency and variation of speed changes on wear,
 μ - efficient reflecting the impact of speed variation on wear,
 ν - coefficient accounting for the impact of resonance on wear,
 $R_{res}(t)$ - resonance parameter at time t' .

3. Speed mismatch to navigational conditions:

$$W_{mismatch} = W_0 + \int_0^t \kappa \cdot \Psi(F_{thrust}(t'), C(t')) dt',$$

where W_0 - initial degree of impact on the ship's technical system,
 κ - coefficient of impact of speed mismatch,
 Ψ - function of mismatch between actual and optimal speed.

Given the general analytical form of the equations presented, this section outlines approaches for determining the coefficients mentioned above.

To determine the coefficients ξ and ρ , reflecting the impact of abrupt changes in thrust and their absolute magnitude on wear, empirical data and engineering analysis should be used. These coefficients depend on the specific characteristics of the ship and its equipment but are generally determined as follows:

Coefficient ξ (impact of abrupt changes in thrust):

- Measured based on chronological data about equipment wear in situations with abrupt changes in thrust.

- May include analysis of the impact of acceleration/deceleration of the engine on its components.

Coefficient ρ (impact of the absolute magnitude of thrust change):

- Assessed based on changes in engine operating modes and their impact on the overall technical condition.

- Considers how large changes in thrust (e.g., transitioning from minimum to stop and to maximum) affect the engine and its systems.

These coefficients can be determined through technical trials, analysis of operational and maintenance data, and mathematical modeling of equipment wear over discrete time.

The proposed analysis aims to better understand how different ship management modes affect its durability and reliability.

For determining the coefficients λ and σ , reflecting the impact of frequency and variation of speed changes on wear, the following approaches are suggested:

Coefficient λ (impact of thrust change frequency):

- Can be determined based on analysis of equipment wear in response to frequent engine thrust changes.

- Measured through wear studies of mechanical and electrical components at various speeds change frequencies.

Coefficient σ (impact of speed modes):

- Determined based on the impact of various speed modes on component wear.

- May include analysis of discrete speed variation, such as standard deviations from the average speed, and their impact on the overall technical condition of the equipment.

Both coefficients are determined through technical analysis, empirical data on operation and maintenance, and through mathematical modeling and statistical analysis. This helps assess how frequent and varied speed changes affect the durability and reliability of the ship's power installations.

Coefficient κ (impact of speed mismatch):

- Determined based on analysis of the impact of deviations from the optimal speed on wear and safety.

- Can be determined through empirical studies measuring the impact of various speeds under different conditions on the overall condition of the ship.

The optimal speed can be determined based on navigational recommendations, safety standards, and specific sailing conditions. These parameters

allow for a quantitative assessment of the impact of speed mismatch on the efficiency and safety of ship operations.

Additionally, stages for refining the generalized model and recommendations for its use should be specified.

Verification and calibration: Before use, the model requires empirical verification and calibration using real data to accurately adjust matrices and coefficients in wear functions.

Sensitivity analysis: Conducting a sensitivity analysis to determine the impact of each variable on the model's output parameters is recommended.

Scenario (situational) modeling: Applying the model for scenario modeling to assess potential wear and identify critical scenarios that could lead to ship destabilization.

Conclusions

Therefore, the study emphasizes the importance of developing and applying rational risk management strategies and crew action monitoring to enhance maritime safety, improve fuel efficiency, extend the service life of ship technical systems, and minimize the environmental impact of maritime transport.

A comprehensive approach is proposed, which includes formalizing the navigator's influence on energy processes in the ship's engine room, assessing the cumulative effect of wear, and developing analytical models that reflect the dependency of wear on various actions of the navigator.

References

[1]. Tang, Y., Li, H., Jiang, Y., Liang, W., & Zhang, J. (2023). The Control-Oriented Heat Release Rate Model for a Marine Dual-Fuel Engine under All the Operating Modes and Loads. *Journal of Marine Science and Engineering*. <https://doi.org/11.64.10.3390/jmse11010064>

[2]. Ponomaryova, V., Nosov, P., Ben, A., Popovych, I., Prokopchuk, Y., Mamenko, P., Dudchenko, S., Appazov, E., & Sokol, I. (2024). Devising an approach for the automated restoration of shipmaster's navigational qualification parameters under risk conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(3 (127)), 6–26. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.296955>

[3]. Popovych, I., Halian, I., Halian, O., Nosov, P., Zinchenko, S., & Panok, V. (2021). Research on personality determinants of athletes' mental exhaustion during the on-going COVID-19 pandemic. *Journal of Physical Education and Sport*, 21(4), 1769–1780.

[4]. Nosov, P., Koretsky, O., Zinchenko, S., Prokopchuk, Y., Gritsuk, I., Sokol, I., & Kyrychenko, K. (2023). Devising an approach to safety management of vessel control through the identification of navigator's state. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(3 (124)), 19–32. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286156>

[5]. Engler, E., Baldauf, M., Banyś, P., Heymann, F., Gućma, M., & Sill Torres, F. (2019). Situation Assessment—An Essential Functionality for Resilient Navigation Systems. *Journal of Marine Science and Engineering*. <https://doi.org/8.17.10.3390/jmse8010017>

[6]. Kuwashima, S., Hagiwara, H., & Iwasaka, N. (1997). The Actual State of Ship Encounter Waves and Ship's Motion-III: Fluctuation of Engine Output and Propeller Revolution. *The Journal of Japan Institute of Navigation*, 96, 157-165. <https://doi.org/10.9749/jin.96.157>

[7]. Jeon, T.-Y., & Jung, B.-G. (2023). A Study of PI Controller Tuning Methods Using the Internal Model Control Guide for a Ship Central Cooling System as a Multi-Input, Single-Output System. *Journal of Marine Science and Engineering*. <https://doi.org/11.2025.10.3390/jmse11102025>

[8]. Chybowski, L., & Kazienko, D. (2020). Quantitative Indicators of the Instantaneous Speed of a Ship's Main Engine and its Usability in Assessing the Quality of the Combustion Process. <https://doi.org/10.2478/mape-2020-0008>

[9]. Nguyen, V., Rajamohan, S., Rudzki, K., Kozak, J., Sharma, P., Pham, N., Nguyen, P., & Nguyen, X. P. (2023). Using Artificial Neural Networks for Predicting Ship Fuel Consumption. *Polish Maritime Research*, 30, 39-60. <https://doi.org/10.2478/pomr-2023-0020>

[10]. Wibisono, A., Yanuardi, D., & Riyadi, S. (2023). The effect of power factor on the performance of hydro power three-phase synchronous generator under inductive load. *International Journal of Science and Research Archive*, 10, 433-445. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2023.10.2.0968>

Authors information

Pavlo Nosov, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Head of Department of Innovative Technologies and Technical Devices of Navigation, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, [ORCID ID: 0000-0002-5067-9766](https://orcid.org/0000-0002-5067-9766).



A BRIEF REVIEW OF USING ENGINE ROOM SIMULATORS WITHIN STCW AND CONTINUING PROFESSIONAL DEVELOPMENT OF MARINE ENGINEERS

Yurii Bohdan^{1✉}, Artem Ivanov², Anatoliy Satulov¹

¹ Kherson state maritime academy, Ukraine

² Solent university, United Kingdom

Abstract

Key words: engine room simulator, STCW convention, continuing professional development, marine engineers.

This paper presents a brief review of using marine simulators, as well as engine room simulators during marine engineers' professional development. That is very important for marine engineers either trainees or trainers to keep up with the technological developments in the marine industry and enable themselves to update their knowledge, skills, and competencies to adopt challenges. The effectiveness and valuability of engine room simulators as the educational, training and competency assessment tool in maritime education and training are showed. The review consider evolution, innovation technologies influence, STCW requirements and main issues of engine room simulator usage.

Introduction

In a rapidly changing world, continuous learning and practice is an important part of the professional development of any professional, including maritime industry. Technological progress, changes in international maritime regulations, as well as constantly evolving safety and environmental protection practices require seafarers and other members of maritime community to continuously update, upgrade and expand their knowledge, skills, competencies and operation methods.

Significant part of conducted researches in an international maritime education and training dedicated to different marine simulators-including engine-room simulators (ERS). That is a strong confirmation of widely usage ERS around the globe as very effective and valuable teaching, training and competencies assessment tools during long-life maritime engineers' professional development.

In this review engine room simulators present and future scope carried out within the International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping (STCW) framework. As STCW Convention and Code with amendments play a role of fundamental international standard and has listed down multiple competencies in details for all seafarers and in parallel the minimum qualification requirement to demonstrate the same through working on training ship or simulator.

Continuing professional development (CPD) for marine engineers

The issues of CPD of maritime community members at a high scientific level are raised in works [1-3].

In article [1] a detailed literature has been conducted to understand CPD concept and applications for maritime community. Author evaluates what kind of initiatives should be started to achieve a reliable and sustainable CPD system. Defines possible CPD providers and suitable delivery methods for mariners, in addition to encouraging them to benefit from CPD program. Moreover, author discussed how to develop an effective and reliable CPD system considering existing limitations, alongside how to assist the mariners providing them a practical CPD system and meeting the new requirements that the industry needs under the pressure of rapidly changing technologies and their effects on the professions.

Scientific work [2] conducted a multidisciplinary assessment of the role of ship-bridge simulation in the professional development and licensing of mariners responsible for vessel navigation and piloting. Also, worth noting that the principles and results of the conducted research can be effectively used for a multidisciplinary assessment of the role of engine-room simulation in the professional development and licensing of marine engineers.

Sharma in his dissertation [3] examined the macro and micro contexts related to the

competence development, technology integration as well as the professional development of the maritime instructors.

To sum up the mentioned above, of course, that is very important for marine engineers either trainees or trainers to keep up with the technological developments in the marine industry and enable themselves to update their knowledge, skills, and competencies to adopt challenging requirements. In our opinion, the most effective assistant tool on this path will be the engine room simulator.

ERS positive usage in maritime education and training (MET)

From the early 80th of XX century [4] until present time ERS functional, educational and training opportunities significantly changes. At the beginning of XXI century researchers have investigated the application of ERS in the teaching, learning and examination process of marine engineers [5-7]. In article [8] authors mentioned that the application of ERS in MET leads to a better understanding of marine engines, engine room (ER) machinery, systems and procedures through an interactive learning process and results also increased safety and reduces the risk of human error in the operation and maintenance of ER machinery. Later researches [9-12] dedicated to possibility of using ERS as an educational tool for marine engineer officers' education relating to environment protection and diesel engine machinery safe operation. In recent years, innovative methods and technologies have been intensively implemented in addition to ERS, such as gamification, augmented, virtual, mixed or extended reality, cloud-based technologies and so on [13-18].

To summarize ERS application is highly beneficial and involving trainees in an interactive, deep-learning, competency-based education environment. Moreover, the use of ERS in MET also includes a process of reflection, which makes it necessary for trainees to understand how and why they behaved in a certain way while working on simulators and the opportunity to learn to transfer the acquired knowledge to new professional issues and situations.

STCW within ERS simulators

The International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping (STCW) 1978, was established by the International Maritime Organization (IMO) and adopted by the International Conference on Training and Certification of Seafarers on 7 July 1978. Since then, several major and minor amendments have been adopted including the STCW Code, where the Convention

basic requirements are enlarged upon and explained [19, 20].

STCW Convention addresses the usage of simulators for training of the seafarers under three important headings in [21]: training and assessment (Regulation-I/6, Section A-I/6, Section B-I/6), use of simulator (Regulation-I/12, Section A-I/12, Section B-I/12) [22] and minimum standards of competencies (Chapter III of Code A list down the competencies in the forms of tables required of engine room personnel at management and operational levels) where mentions ERS as non-mandatory simulation system [19-21].

STCW desires instructors and assessors on marine simulators to be appropriately qualified and experienced as well [20, 21].

In addition to the STCW, IMO Model Courses are also the major sources which discuss the training and education of the seafarers. With regards to simulator-based training, there are a number of recommended IMO model courses, especially for ERS that are 2.07 and 6.10 [23, 24].

Issues of ERS usage that require further discussion:

- effective use of ERS in a CPD program
- educational and specialized courses syllabuses and methods of training
- consensus among specialists on the list of competencies that must be developed using various types of ERS and their correspondence to certain learning objectives
- teaching and training methods for trainees with different degrees of initial training
- training and assessment scenarios
- methodology for instructors training
- challenges and innovation in MET caused by the rapid development of technologies [14-18, 20, 25]

Conclusions

The review of using engine room simulators during marine engineers' professional development carried out.

High priority for marine engineers either trainees or trainers to keep up with the technological developments in the marine industry and enable themselves to update their knowledge, skills, and competencies to adopt challenging requirements.

Engine room simulators application in maritime education and training is highly beneficial and involving trainees in an interactive, deep-learning, competency-based education environment.

The presented review consider evolution, innovation technologies influence, STCW requirements and allows to make conclusions about the main issues connected to engine room simulator usage that require further discussion.

Engine room simulators can be effective in the continuing professional development program and renewal of marine engineers and electro-technical officers' knowledge, skills and competencies in a number of significant areas including education, training, certification, evaluation and assessment, engine room resource management, high-voltage, marine fuel handling and other specialized training.

References

- [1] Demirel, E., Continuing Professional Development for Mariners. *Scientific Bulletin of Naval Academy*. 2022. Vol. XXIV (2). pp. 177-195. [DOI:10.21279/1454-864X-21-I2-018](https://doi.org/10.21279/1454-864X-21-I2-018)
- [2] National Research Council. Simulated Voyages. Using Simulation Technology to Train and License Mariners. Washington, DC. The National Academies Press. 1996. 304 p. [DOI:10.17226/5065](https://doi.org/10.17226/5065)
- [3] Sharma, A., Potential of technology supported competence development for Maritime Education and Training: A dissertation for the degree of Philosophy Doctor, Norway, Horten, 2023. 138 p.
- [4] Muirhead, P., Technology and maritime education and training: a future perspective. *Technology-Rich Learning Environments*. 2003. pp. 235-254. [DOI:10.1142/9789812564412_0011](https://doi.org/10.1142/9789812564412_0011)
- [5] Deniz, C., Paksoy, A., Sarisakal, M.N., 2002. Computer – Based Training for Sea-Going Engineers. *Journal of Electrical & Electronics*. 2002. Vol.2. No.2. pp. 563-574
- [6] Kluj, S. Usability criteria for simulators applied in the maritime engineering education. *World Transactions on Engineering and Technology Education*. 2003. Vol.2. No.3. pp. 445-448.
- [7] Tsoukalas, V.D., et al. Marine engineers' training: Educational assessment for an engine room simulator. *WMU J Marit Affairs*. 2008. Vol.7. pp. 429-448. [DOI:10.1007/BF03195143](https://doi.org/10.1007/BF03195143)
- [8] Unlugencoglu, K., Yildiz, B., Turan, E. Engine room simulator and importance of applied maritime education. *TOJSAT*. 2011. Vol. 1. No.4. pp. 10-16.
- [9] Laskowski, R., Chybowski, L., Gawdzińska, K. (2015). An Engine Room Simulator as a Tool for Environmental Education of Marine Engineers. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, pp. 311-322. [DOI:10.1007/978-3-319-16528-8_29](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16528-8_29)
- [10] Chybowski, L., Gawdzińska, H., Ślesicki, O., Patejuk, K., Nowosad, G. An engine room simulator as an educational tool for marine engineers relating to explosion and fire prevention of marine diesel engines. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*. 2015. [DOI:10.17402/034](https://doi.org/10.17402/034)
- [11] Seddiek, I.S. Viability of using engine room simulators for evaluation machinery performance and energy management onboard ships. *Trans RINA, Vol 161, Part A3, Intl J Maritime Eng*. 2019. pp. 283-291. [DOI:10.3940/rina.ijme.2019.a3.545](https://doi.org/10.3940/rina.ijme.2019.a3.545)
- [12] Chybowski, L, Strojecki, S., Markiewicz, W. Simulation-Based Training in Fire Prevention and Fire-Fighting of Scavenge Air Receivers Fires. *System Safety: Human-Technical Facility-Environment*. Vol.2, No.1. 2020. pp. 100-111. [DOI:10.2478/czoto-2020-0013](https://doi.org/10.2478/czoto-2020-0013)
- [13] Mangga, C., Tibo-oc, P., Montaña, R. Impact Of Engine Room Simulator As A Tool For Training And Assessing Bsmare Students' Performance In Engine Watchkeeping. *Pedagogika-Pedagogy*. 2021. Vol. 93. No. 6. pp. 88-100. [DOI:10.53656/ped21-6s.07eng](https://doi.org/10.53656/ped21-6s.07eng)
- [14] Dewan, M.H., Godina, R., Chowdhury, M.R.K., Noor, C.W.M., Wan Nik, W.M.N., Man, M. Immersive and Non-Immersive Simulators for the Education and Training in Maritime Domain – A Review. *J Mar Sci Eng*. 2023. Vol. 11, No.1. 147. [DOI:10.3390/jmse11010147](https://doi.org/10.3390/jmse11010147)
- [15] Hjellvik, S., Mallam, S. Adaptive training with cloud-based simulators in maritime education. *International Maritime Lecturers' Association (IMLA) 2021 Joint Conference with IMEC32, ICERS15 and INSLC21*. 2021. [DOI:10.21677/imla2021.21](https://doi.org/10.21677/imla2021.21)
- [16] Shen, H., Zhang, J., Yang, B., Jia, B. Development of an educational virtual reality training system for marine engineers. *Comput Appl Eng Educ*. 2019. Vol. 1. No. 23. pp. 580-602. [DOI:10.1002/cae.22099](https://doi.org/10.1002/cae.22099)
- [17] Renganayagalu, S.K., Mallam, S.C., Nazir, S., Ernstsens, J., Haavardtun, P. Impact of simulation fidelity on student self-efficacy and perceived skill development in maritime training. *Transnav*. 2019. Vol. 13. pp. 663-669. [DOI:10.12716/1001.13.03.25](https://doi.org/10.12716/1001.13.03.25)
- [18] Bakalov I. A Contemporary Concept in Troubleshooting and Fixing Malfunctions Using an Engine Room Simulator in Augmented Reality Environment. *Universal Journal of Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 7. No.2. pp.33-36. [DOI:10.13189/ujme.2019.070201](https://doi.org/10.13189/ujme.2019.070201)
- [19] International Maritime Organization. *STCW: Including 2010 Manila amendments: STCW Convention and STCW Code: International*

Convention on Standards of Training, Certification and watchkeeping for seafarers. 2017th ed. IMO Publication.

[20] Demirel, E., Albayrak, T. Evaluation of Simulator Use in Maritime Education and Training (MET) Institutes. *Proceedings of the International Scientific Conference, SEA-CONF 2022*. pp. 135-154 [DOI: 10.21279/2457-144X-22-017](https://doi.org/10.21279/2457-144X-22-017)

[21] Ali, A. Simulator Instructor – STCW Requirements and Reality. *Pomorstvo*, 2006. Vol. 20. No. 2. pp. 23-32.

[22] DNV GL (2019). DNVGL-ST-0033: Maritime simulator systems.

[23] International Maritime Organization. *Model course 2.07. Engine-room simulator*. 2017th ed. IMO Publication.

[24] International Maritime Organization. *Model course 6.10. Train the simulator trainer and assessor*. 2012. IMO Publication.

[25] Deling Wang, Xinwei Liu, Zhangfeng Ni, Yijun Liu. Challenges and Innovation That Will Be Brought to Maritime Education by the Rapid Development of Shipping Technology. *American Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2023.Vol. 8. No. 5. pp. 113-118. [DOI: 10.11648/j.ajtte.20230805.11](https://doi.org/10.11648/j.ajtte.20230805.11)

Authors' information

Yurii Bohdan, Ph.D., Associate Professor, Engineer Officer of the Watch, Department of Vessel's Power Plants Operation of the Marine Engineering Faculty, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, [ORCID ID: 0000-0002-3178-1941](https://orcid.org/0000-0002-3178-1941).



Artem Ivanov, Ph.D., Lecturer Engineering Simulation Warsash Maritime academy part of Solent University, Electro-Technical Officer, United Kingdom, [ORCID ID: 0000-0002-1919-2570](https://orcid.org/0000-0002-1919-2570).



Anatoliy Satulov, Senior Lecturer, Chief Engineer, Department of Vessel's Power Plants Operation of the Marine Engineering Faculty, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, [ORCID ID: 0000-0003-2985-3755](https://orcid.org/0000-0003-2985-3755).



МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТУ ПЕРЕХОДУ СУДЕН З УРАХУВАННЯМ ПРОГНОЗУ ПОГОДНИХ УМОВ

Дудченко С.В., Макарчук Д.В., Литовченко В.І., Ісайчев А.Г., Жмур В.М.

Херсонська державна морська академія, Україна

Анотація

Ключові слова: Navigation, e-Voyage, маршрут переходу, маршрутизація за погодою, оптимізація рейсу.

Управління рухом морських суден з використанням автоматичних систем, що дозволяють суттєво покращити показники якості та забезпечити безпеку плавання є невід'ємною частиною судноплавства сучасних умов. Нові шляхи вдосконалення систем автоматичного управління рухом здійснюються за рахунок широкого застосування передових комп'ютерних технологій. На даний момент однією з передових концепцій для створення систем автоматичного управління рухом є концепція e-Navigation та e-Voyage, як її частина. Сучасні судна можуть здійснювати плавання в складних погодних умовах, проте вітер, хвилі, течії та інші гідрометеорологічні фактори впливають на швидкість та маршрут суден, і як наслідок, на ефективність переходу.

Вступ

Відповідно до Міжнародної конвенції з охорони людського життя на морі (SOLAS) [1], розроблення плану переходу судна вважається критично важливим для безпечної навігації та уникнення небезпечних ситуацій. Найвні в ІМО [2] інструкції, морські карти та публікації, що застосовуються в судноплавстві і в концепції E-навігації [3], використовуються для забезпечення безпеки та ефективної навігації суден.

Ефективна навігація містить формування безпечного оптимального маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов, що визначається як оптимальна, відповідно до вибраного критерію (декількох критеріїв), лінія маршруту судна. У визначених межах гідрометеорологічних та інших умов навігаційної обстановки для переходу судна "оптимальний" означає максимальну безпеку, мінімальні витрати палива та час переходу або комбінацію цих факторів. Тому точність визначення оптимального маршруту залежить від таких чинників:

- точність прогнозування гідродинамічної поведінки судна за різних гідрометеорологічних умов;
- точність прогнозу погоди;
- можливість і практичність алгоритму оптимізації.

Актуальність досліджень

При формуванні безпечного оптимального за часом маршруту суден з урахуванням прогнозу погодних умов враховуються фактори часу і безпеки переходу. Фактор безпеки переходу

пов'язаний із навігаційними небезпеками (глибинами, гідрометеорологічними умовами, перешкодами, тощо) на маршруті. До оптимальних відносяться маршрути, за якими можливий рух суден, забезпечується рівень безпеки для судна, вантажу екіпажу не нижче заданого, та є мінімальним за часом. Як правило, проблематика формування маршруту з урахуванням погодних умов моделюється як проблема досягнення мінімального часу переходу або проблема мінімального споживання палива з урахуванням існуючих.

Викладення основного матеріалу

Управління рухом морських суден з використанням автоматичних систем, що дозволяють суттєво покращити показники якості та забезпечити безпеку плавання є невід'ємною частиною судноплавства сучасних умов. Нові шляхи вдосконалення систем автоматичного управління рухом здійснюються за рахунок широкого застосування передових комп'ютерних технологій. На даний момент однією з передових концепцій для створення систем автоматичного управління рухом є концепція e-Navigation та e-Voyage, як її частина. Сучасні судна можуть здійснювати плавання в складних погодних умовах, проте вітер, хвилі, течії та інші гідрометеорологічні фактори впливають на швидкість та маршрут суден, і як наслідок, на ефективність переходу. Рух судна з урахуванням погодних вимог розробки оптимального маршруту переходу на основі прогнозів погоди, стану моря та індивідуальних характеристик судна для конкретних умов навігаційної обстановки. У визначених межах погодних і морських умов термін

оптимальний використовується для позначення максимальної безпеки та комфорту екіпажу, мінімального споживання палива, мінімального часу на ходу або будь-якої бажаної комбінації цих факторів. У роботі удосконалено метод формування безпечного оптимального за часом руху маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов, що дозволяє підвищити ефективність за часом переходу судна з урахуванням прогнозу погодних умов при формуванні безпечного маршруту в системі e-Navigation. В удосконаленому методі реалізоване сумісне застосування математичного апарату нечітких множин та нечіткої логіки для визначення можливостей руху судна відповідно до впливу гідрометеорологічних умов. Запропонований підхід використовує гексагональну сітку для апроксимації району плавання та систему продукційних правил для визначення функції переходу між ними.

Ефективна навігація містить формування безпечного оптимального маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов, що визначається як оптимальна, відповідно до вибраного критерію (декількох критеріїв), лінія маршруту судна. У визначених межах гідрометеорологічних та інших умов навігаційної обстановки для переходу судна "оптимальний" означає максимальну безпеку, мінімальні витрати палива та час переходу або комбінацію цих факторів. Тому точність визначення оптимального маршруту залежить від таких чинників:

- точність прогнозування гідродинамічної поведінки судна за різних гідрометеорологічних умов;

- точність прогнозу погоди;

- можливість і практичність алгоритму оптимізації.

При формуванні безпечного оптимального за часом маршруту суден з урахуванням прогнозу погодних умов враховуються фактори часу і безпеки переходу. Фактор безпеки переходу пов'язаний із навігаційними небезпеками (глибинами, гідрометеорологічними умовами, перешкодами, тощо) на маршруті. До оптимальних відносяться маршрути, за якими можливий рух суден, забезпечується рівень безпеки для судна, вантажу екіпажу не нижче заданого, та є мінімальним за часом. Як правило, проблематика формування маршруту з урахуванням погодних умов моделюється як проблема досягнення мінімального часу переходу або проблема мінімального споживання палива з урахуванням існуючих. Як показує практика судноплавства, максимально короткий маршрут не завжди проходить за мінімальний час. У загальному вигляді час переходу маршрутом визначається так:

$$T_{route}^{sh} = \frac{D^{W_{route}^{sh}}}{V^{sh}}, \quad (1)$$

де T_{route}^{sh} – час переходу судна;

$D^{W_{route}^{sh}}$ – довжина маршруту W_{route}^{sh} ;

V^{sh} – задана швидкість судна.

Враховуючи, що маршрут переходу складається з початкового, кінцевого та проміжних пунктів, між якими рухається судно з постійною швидкістю та курсом, то час переходу маршрутом визначається як

$$T_{route}^{sh} = \sum_{i=1}^N \frac{d_i^{W_{route}^{sh}}}{v_i^{sh}}, \quad (2)$$

де N – кількість пунктів маршруту W_{route}^{sh} ;

$d_i^{W_{route}^{sh}}$ – дистанція між $(i-1)$ -им та i -им пунктом маршруту W_{route}^{sh} ;

v_i^{sh} – швидкість судна між $(i-1)$ -им та i -им пунктом маршруту W_{route}^{sh} .

Відповідно до виразу (2), маршрут переходу судна визначимо множиною точок (пунктів) маршруту, що утворюють траєкторію судна, та пов'язаним з ними часом проходження (рис. 1).

Точка (p_i^{route}) пункту маршруту W_{route}^{sh} визначається вектором:

$$p_i^{route} = \left[Cord_i^{W_{route}^{sh}}, t_i^{route} \right], \quad (3)$$

який представляє довготу, широту та час відповідно проходження даного пункту маршруту.

Вектор управління судном задамо:

$$U^{ship} = \left[u_1^{sh}, \dots, u_{i-1}^{sh}, \dots, u_i^{sh}, \dots, u_N^{sh} \right] \quad (4)$$

при

$$u_i^{sh} = \left[v_i^{sh}, h_i^{sh} \right], \quad (5)$$

де v_i^{sh} – швидкість судна між $(i-1)$ -им та i -им пунктом маршруту W_{route}^{sh} ;

h_i^{sh} – курс судна між $(i-1)$ -им та i -им пунктом маршруту W_{route}^{sh} .

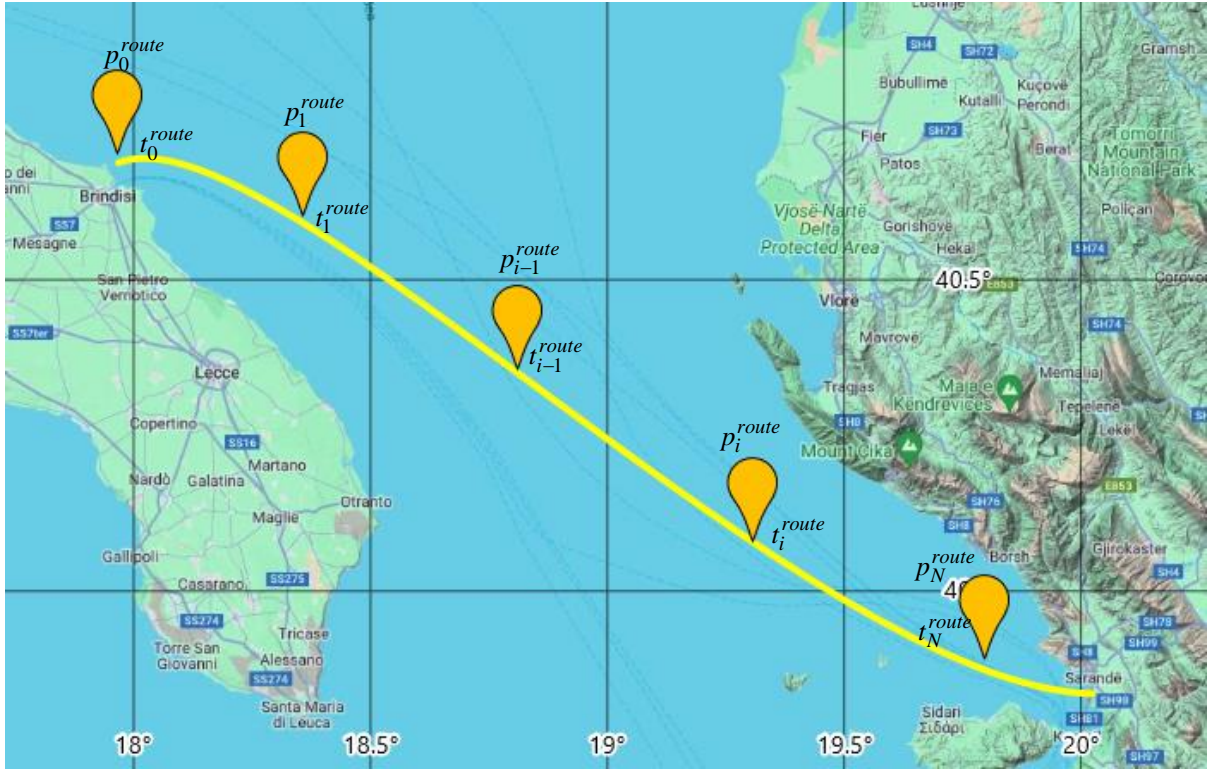


Рисунок 1. Множина точок (пунктів маршруту), що утворюють траєкторію судна

На швидкість руху судна впливають такі зовнішні фактори як сила та напрям вітру і течії, хвилювання. Вектор зовнішніх впливів визначимо:

$$INF_i = [inf_i^{wind}, inf_i^{curr}, inf_i^{wave}], \quad (6)$$

де $inf_i^{wind} = [\beta_i^{wind}, v_i^{wind}]$ – вектор, що визначає напрям (β_i^{wind}) та швидкість (v_i^{wind}) вітру судна між $(i-1)$ -им та i -им пунктом маршруту W_{route}^{sh} ;

$inf_i^{curr} = [\beta_i^{curr}, v_i^{curr}]$ – вектор, що визначає напрям (β_i^{curr}) та швидкість (v_i^{curr}) течії між $(i-1)$ -им та i -им пунктом маршруту W_{route}^{sh} ;

$inf_i^{wave} = [h^{wave}, \beta^{wave}]$ – вектор, що визначає висоту (h^{wave}) та напрям (β^{wave}) хвиль між $(i-1)$ -им та i -им пунктом маршруту W_{route}^{sh} .

Звідси випливає, що для формування оптимального за часом руху безпечного маршрут переходу судна необхідно вибрати в районі плавання такі точки пунктів маршруту з множини $p_1^{route} \dots p_i^{route}$, де вектор зовнішніх впливів

$INF_1 \dots INF_i$, які дозволяють сформувати такий вектор управління U^{ship} , що досягається:

$$\begin{cases} T_{route}^{sh} \rightarrow \min; \\ \sum_{i=1}^N t_i^{route} \leq T_{dest}^{route}; \\ p_i^{route} \in MR, \quad i = \overline{1, N}. \end{cases} \quad (7)$$

де MR – район плавання в якому забезпечується рівень безпеки не нижче заданого; T_{dest}^{route} – заданий час прибуття в кінцевий пункт маршруту.

Для алгоритму оптимізації маршруту переходу швидкість та курс судна в кожній точці пункту маршруту вибираються як змінні управління, які необхідно оптимізувати під час подорожі.

На рис. 2 показано узагальнений процес оптимізації маршруту переходу судна, який складається з таких елементів:

- модель району плавання, а саме з врахуванням прогнозу змін гідрометеорологічних умов в районі плавання;
- модель судна: оцінка впливу навколишнього середовища на маневрені та технічні характеристики судна;

- обмеження: можуть бути залежними від часу чи ні, повинні бути задоволені при оптимізації маршруту (заборонені зони, канали, загальна тривалість рейсу, зміни потужності двигуна тощо) та безпеки (максимальні рухи судна та погодні умови);

- цілі: залежно від експлуатації судна, необхідно оптимізувати різні критерії, одночасно чи ні, такі як тривалість рейсу, споживання палива, безпека тощо.

При вирішенні завдання оптимізації накладаються обмеження, а саме, у поточній навігаційній ситуації навігації маршрут має відповідати:

1. Судно повинно йти в районі з достатньою глибиною води.
2. Судно не повинно плавати в умовах небезпечного вітру та хвиль.
3. План маршруту повинен враховувати динамічні гідрометеорологічні умов для дальнього та тривалого плавання.
4. Тривалість часового кроку зміни гідрометеорологічних умов, для моделювання навігаційної

обстановки збігається з прогнозованим інтервалом в 1 годину. Даний інтервал дозволяє зробити припущення щодо стаціонарності цих умов. Функція керування (тобто швидкість і курс) є постійною протягом цього кроку часу. Прискорення не враховуються. Перехідні процеси, що пов'язані зі зміною керуючого впливу (наприклад, зміни в режимі роботи двигуна), дуже короткі відносно масштабу часу, тому ними можна знехтувати. Компоненти опору руху судна, а саме: лобовий опір, опір повітря, диферентний або опір керму) не враховуються, оскільки вони є відносно невеликі за величиною.

5. Швидкість руху судна в стоячій воді називається швидкістю судна відносно води. Проте під впливом гідрометеорологічних умов навігаційної обстановки (вітер, хвилі та течії) судно не досягає заданої швидкості. Це впливає на рівень витрати палива за часом та на моделювання маршруту судна із врахуванням гідрометеорологічних умов. Дійсна швидкість судна з урахуванням впливу умов (швидкість руху судна відносно дна) визначимо як швидкість плавання.

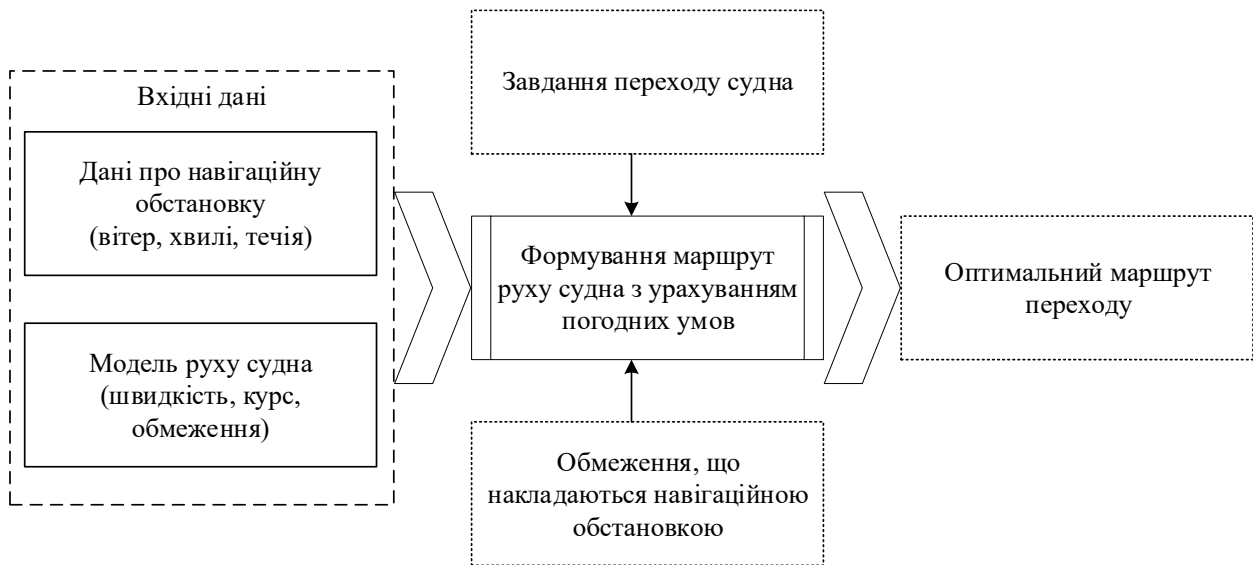


Рисунок 2. Узагальнений процес оптимізації маршруту переходу судна

Швидкість судна V_{INF}^{sh} визначена керуючою змінною, яку потрібно оптимізувати в процесі маршрутизації для формування безпечного оптимального за часом руху маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов. Час, що витрачається при планових та аварійних затримках, пропонується розраховувати додатково. Інформація про характер аварійних ситуацій та причини планових стоянок дозволить виявити найбільш вразливі у відношенні потенційні елементи часу процесу судноплавства.

Для формалізації моделі поздовжнього руху судна пропонується застосовувати математичний апарат нечіткої логіки. Основу нечітких продукційних моделей складає база знань, що застосовується для визначення впливу повного опору на повздовжній рух судна.

Узагальнений метод формування безпечного оптимального маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов в процесі планування та виконання переходу, показано на рис. 3.

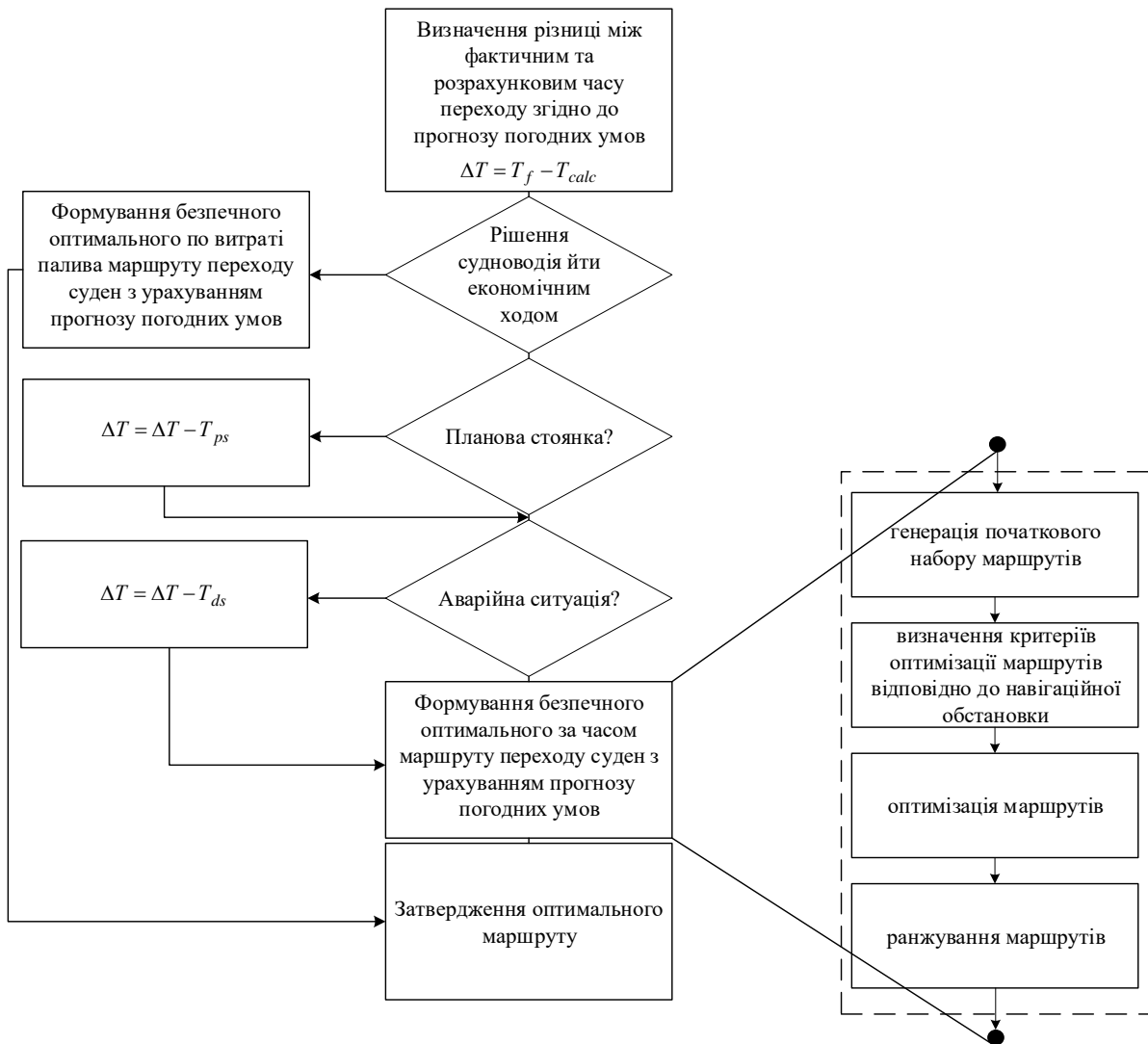


Рисунок 3. Узагальнений метод формування безпечного оптимального маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов

Загальна структура гексагонального растру для створення гексагональної сітки визначеної області плавання MR має вид (рис. 4):

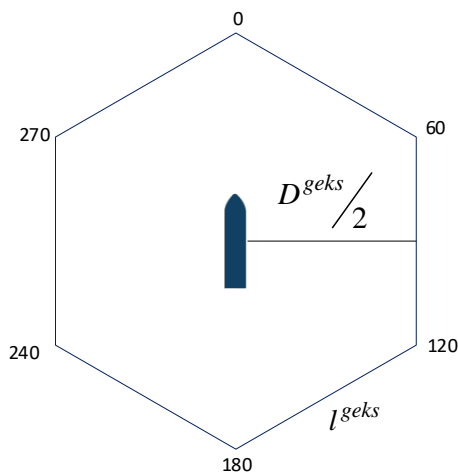


Рисунок 4. Структура гексагонального растру для створення гексагональної сітки визначеної області плавання

Критерій, що застосовується для вибору оптимального маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов застосовується вираз (7). Проте, в якості обмеження судноводій може задати максимальну витрату палива в ході переходу по маршруту. Відповідно до значень T_{route}^{sh} виконується ранжування маршрутів та вибір оптимального судноводієм для прокладки. Після оновлення інформації про гідрометеорологічних умов в районі плавання виконується перерахунок V_{INF}^{sh} растрів та визначаються нові маршрути, якщо це потрібно.

Висновки

У даній роботі описано удосконалення методу формування безпечного оптимального за часом руху маршруту переходу суден з урахуванням прогнозу погодних умов, який на відміну від відомих використовує сумісне застосування математичний апарат нечітких множин та нечіткої логіки для визначення можливостей руху судна

відповідно до впливу гідрометеорологічних умов. Запропонований підхід використовує гексагональну сітку для апроксимації району плавання та систему продукційних правил для визначення функції переходу між ними.

Література

[1]. Топалов В.П. Конвенция СОЛАС-74. Основные положения и комментарии (Практическое пособие) / Одесса: Астропринт, 2002. 288 с.

2. R. Becker-Hei WebnsVoyage Planning with ECDIS / Bremen: Geomares, 2016. 193 p.

3. Квасніков П.К. Концепція Е-навігації – навігації майбутнього. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту. Колективна монографія / за ред. В. Чимшира / Із-маїл : ДІ НУ «ОМА» 2020 – Київ: Міленіум, 2020. 472 с.

Відомості про авторів

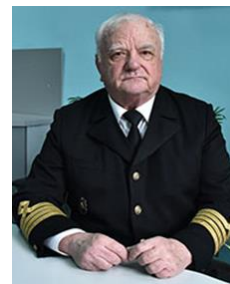
Сергій Дудченко, капітан далекого плавання (КДП), директор, Херсонський Морський спеціалізований тренажерний центр, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-1613-7226](https://orcid.org/0000-0002-1613-7226).



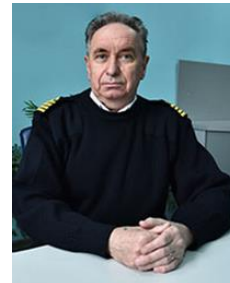
Дмитро Макарчук, к.т.н., КДП, доцент кафедри, в.о. завідувача кафедри судноводіння, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-4299-6614](https://orcid.org/0000-0002-4299-6614).



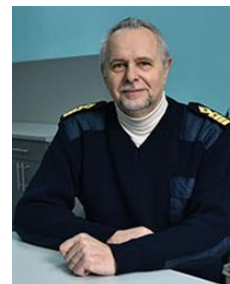
Віктор Литовченко, старший виклад кафедри судноводіння, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0003-1144-5425](https://orcid.org/0000-0003-1144-5425).



Анатолій Ісайчев, старший виклад кафедри судноводіння, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0001-9667-0209](https://orcid.org/0000-0001-9667-0209).



Віктор Жмур, старший виклад кафедри судноводіння, Херсонська державна морська академія, Херсон, Україна, [ORCID ID: 0000-0002-95034-3007](https://orcid.org/0000-0002-95034-3007).



Відповідальні за випуск *Р.Є. Врублевський, В.П. Савчук, Д.О. Зінченко*

Технічний редактор *Д.В. Курносенко*

Друк, фальцювальню-палітурні роботи *В.Г. Удов*

Формат 60x84/16. Папір офсетний.

Ум. друк. аркушів 23,42.

Тираж 100 прим.

Видавництво

Херсонська державна морська академія,

проспект Ушакова, 20, м. Херсон, 73000

тел. 091-32-65-473

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої

справи до Державного реєстру

ДК №4319 від 10.05.2012

