

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХЕРСОНСЬКА ДЕРЖАВНА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХЕРСОНСЬКА ДЕРЖАВНА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Матейчук Вадим Миколайович

УДК 656.61.052

ДИСЕРТАЦІЯ
АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ РУХОМ СУДЕН У
ШТОРМ

Спеціальність 151 - Автоматизація та комп'ютерно – інтегровані технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



В. М. Матейчук

Науковий керівник: Зінченко Сергій Миколайович

доктор технічних наук, доцент

Науковий керівник: Товстокорий Олег Миколайович

кандидат технічних наук, доцент

Херсон - 2024

АНОТАЦІЯ

Матейчук В. М. – Автоматизація процесів керування рухом суден у шторм. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно – інтегровані технології. – Херсонська державна морська академія Міністерства освіти і науки України, Херсон, 2024.

Комітет з безпеки на морі міжнародної морської організації на вісімдесят другій сесії (з 29 листопада по 8 грудня 2006 року) схвалив «Переглянуте керівництво для капітанів щодо уникнення небезпечних ситуацій за несприятливих погодних умов з метою забезпечення капітанів основою для прийняття рішень щодо керування судном за несприятливих погодних умов, таким чином допомагаючи їм уникати небезпечні явища, з якими вони можуть зіткнутися в несприятливих умовах.

Керування судном в шторм являється надзвичайно складним завданням і вимагає від капітана та екіпажу великого досвіду, вправності та контролю над ситуацією. Такі аспекти, як високі хвилі, що можуть призводити до пошкодження судна та втрати контролю; сильний вітер, що ускладнює не тільки напрямок руху судна, але й його стабільність; судно може почати розгойдуватися та кренитися під впливом сильного вітру та хвиль, що вимагає великого професійного вміння керувати судном; стрімкі зміни умов, таких як різкі зміни напрямку вітру, зростання висоти хвиль чи поява сильних течій, що вимагає швидкої реакції та адаптації з боку екіпажу; навігаційні труднощі, обмеженість видимості через дощ, бризи, туман та хвилі, що ускладнює правильну оцінку поточної ситуації; втома екіпажу через фізичну та емоційну виснажливість, що може призводити до зниження концентрації та прийняття рішень.

Усі ці аспекти ускладнюють керування судном в шторм та можуть призвести до аварійних ситуацій, спричинені людським фактором.

За результатами аналізу річного огляду морських аварій та інцидентів 2022 року Європейського агентства морської безпеки, було встановлено, що з 2014 по 2022 рік 59,1% аварій були спричинені діями людини, а 50,1% сприяючих факторів були пов'язані з поведінкою людини. Аналізуючи як дії людини, так і чинники, що сприяють цьому, людський чинник становить близько 80,7% розслідуваних морських аварій та інцидентів. Із них, близько 7 відсотків припадають на зовнішнє середовище, включаючи погіршені погодні умови. Ці тенденції характерні для всіх типів суден.

Один із аспектів основного документу, який визначає стратегію транспортного розвитку України як морської країни до 2030 року, що був схвалений розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 року № 430-р, передбачає впровадження інтелектуальних транспортних систем та систем управління рухом на наземному та водному транспорті.

Автоматизація процесів керування рухом судна, включаючи плавання у штормових умовах, а також створення невимогливого способу тестування автоматичних модулів керування дозволяють суттєво зменшити негативний вплив людського чинника на процеси керування та підвищити безпеку судноплавства.

Головною ідеєю дослідження є розробка методів та засобів автоматичного керування судном у шторм, методів та засобів розробки і тестування автоматичних модулів штормування, що дозволяло б зменшити вплив людського чинника на процеси штормування судна, зменшити виснаженість екіпажу, ризики втрат судна і вантажу, підвищити безпечність та надійність відпрацювання автоматичних модулів штормування.

Головне завдання дослідження полягає у розробці нових методів та засобів керування рухом судна у шторм, методів та засобів відпрацювання автоматичних модулів штормування, які дозволять автоматично і оптимально керувати рухом судна у шторм, зменшити вплив людського чинника на процеси штормування, зменшити виснаженість екіпажу, підвищити безпеку

операцій штормування, зменшити вартість та підвищити безпеку і надійність відпрацювання автоматичних модулів штормування.

Досягнення мети дослідження передбачає вирішення наступних задач:

1. Аналіз сучасного стану розвитку систем та методів штормування суден: використання штормових діаграм; заспокоювачі хитавиці; система моніторингу морехідності «HULLMOS» та системи підтримки прийняття рішень «OCTOPUS-DSS» і «IMDSS»; система оцінки оптимізації морехідності «VOSS» та волоконно-оптична система «SENSFIB»; огляд моделей та методів розробки і тестування автоматизованих систем.
2. Аналіз математичних моделей судна і хвилювання: нерегулярне хвилювання; математична модель судна; зовнішні сили і моменти від хитавиці.
3. Автоматичне штормування шляхом переміщення фазової точки у безпечну зону: структурна схема модуля автоматичного штормування; визначення спектру хвилювання та його врахування при побудові небезпечних областей; візуалізація небезпечних областей штормування судна; метод оптимального переміщення фазової точки у безпечну область; моделювання процесу оптимального переміщення фазової точки у безпечну область.
4. Автоматичне штормування методом умовної оптимізації функції якості керування: постановка задачі умовної оптимізації при керуванні судном у шторм; визначення безпечних областей штормового плавання; вирішення задачі умовної оптимізації; математичне моделювання автоматичного штормування методом умовної оптимізації.
5. Розробка стенду імітаційного моделювання та тестування модулів автоматичного штормування: інтегрування імітатора бортового обчислювача у локальну мережу існуючого навігаційного тренажеру Navi Trainer 5000 ХДМА; обмін даними між навігаційним тренажером і імітатором бортового обчислювача; моделювання процесів штормування на стенді імітаційного моделювання.

Об'єктом дослідження є процеси автоматичного штормування судна та процеси розробки і тестування автоматичних модулів керування.

Предметом дослідження є принципи, методи і моделі автоматичних модулів штормування; створення стенду імітаційного моделювання для відпрацювання принципів, методів і моделей автоматичних модулів штормування у замкнутому контурі із математичними моделями сертифікованого навігаційного тренажера Navi Trainer 5000.

Наукове значення отриманих результатів полягає у розробці: нових методів і підходів до автоматичного штормування судна; нових методів і підходів до відпрацювання автоматичних модулів керування рухом судна, із використанням системного підходу, аналізу і синтезу, абстрагування, уявного експерименту, теорії автоматичного та оптимального керування, гідродинаміки та математичного моделювання.

Практичне значення отриманих результатів полягає у використанні розроблених методів і технічних засобів для створення автоматичних модулів штормування, використання яких дозволить запобігти перевертанню судна при виникненні: гармонійного та параметричного резонансу; втрати остійності на попутному хвилюванні; втрати керованості при ударі групових хвиль у корму судна, зменшити вплив людського чинника на процеси керування, зменшити виснаження екіпажу та підвищити безпеку плавання у штормових умовах.

У роботі:

1. Вперше розроблено підхід автоматичного та оптимального переміщення фазової точки параметрів руху судна у безпечну область, який полягає у використанні залежності між швидкістю і курсом судна, яка мінімізує час знаходження фазової точки у небезпечній зоні, на відміну від існуючих рішень, дозволяє контролювати вихід фазової точки із небезпечної області, зменшити ризики розвитку небезпечних явищ, що ведуть до перекидання судна, підвищити безпеку штормового плавання.

2. Вперше розроблено підхід штормування, який полягає у автоматичному знаходженні безпечних та оптимальних параметрів руху судна шляхом постійного вирішення у бортовому обчислювачі оптимізаційної задачі з лінійними та нелінійними обмеженнями типу нерівностей, які визначають безпечні області штормування; використанні отриманих безпечних параметрів руху, як програмних, у автоматичній керування для підтримування програмного руху, на відміну від існуючих рішень дозволяє автоматично знайти безпечні від гармонійного, параметричного резонансів, втрати остійності на попутному хвилюванні, втрати керованості через удари групових хвиль у корму та оптимальні параметри руху, що дає можливість запобігти перевертанню судна, суттєво зменшити вплив людського чинника на процеси керування, зменшити втомлюваність екіпажу, підвищити безпеку судноплавства.

3. Удосконалено підхід оцінювання безпечних від перекидання судна областей, який полягає у застосуванні швидкого перетворення Фур'є для визначення спектру хвилювання; визначенні енергії демпфування; порівнянні енергії складових спектру із енергією демпфування; визначенні складових спектру, енергія яких перевищує енергію демпфування, для побудови та візуалізації областей небезпечних параметрів штормування та автоматичного визначення безпечних і оптимальних параметрів штормового плавання, на відміну від відомих рішень, враховує усі складові спектру хвилювання, енергія яких перевищує енергію демпфування, що дозволяє зменшити ризики перевертання судна, розширити область безпечного штормування, підвищити ефективність і безпеку штормового плавання.

4. Набув подальшого розвитку підхід щодо підвищення безпеки штормового плавання, який полягає у визначенні, на кожному кроці бортового обчислювача, положення фазової точки та небезпечних щодо перекидання судна областей, їх візуалізації, на відміну від існуючих рішень, надає судноводієві актуальну інформацію про поточні ризики, що дозволяє приймати своєчасні рішення по упередженню виникнення та розвитку

небезпечних явищ шляхом ручного маневрування або використання автоматичного модуля штормування.

5. Набув подальшого розвитку підхід до розробки і тестування автоматичних модулів керування у автоматизованих системах, який полягає в інтеграції імітатора бортового обчислювача в локальну мережу навігаційного тренажеру, організації замкнутого контуру «Імітатор бортового контролеру – Тренажерна модель судна», на відміну від існуючих рішень дозволяє використовувати моделі суден, погодні та навігаційні умови сертифікованого тренажеру для імітаційного моделювання, значно знизити ризики та вартість робіт по розробці і тестуванню автоматичних модулів керування у автоматизованих системах.

У розділі 1 проведено аналіз сучасного стану розвитку систем та методів штормування суден. Розглянуті рекомендації міжнародної морської організації (ММО) по боротьбі з небезпеками перевертання суден, таких як гармонійний резонанс, параметричний резонанс першого та другого типу, втрата остійності на попутному хвилюванні, брочинг, удари групових хвиль в корму судна. Встановлено, що загальний метод боротьби з цими небезпечними явищами – зміна курсу і швидкості судна. Також наведені існуючі системи заспокоєння хитавиці та принципи їх роботи, а саме, система моніторингу морехідності «HULLMOS», системи підтримки прийняття рішень «OCTOPUS-DSS» та «IMDSS», система оптимізації морехідності «VOSS» та волоконно-оптична система «SENSFIB». Останніми у розділі розглянуті існуючі моделі та методи розробки і тестування автоматичних модулів керування у автоматизованих системах. Зроблені висновки по розділу 1.

У розділі 2 розглянута математична модель нерегулярного хвилювання. Отримані диференційні динамічні рівняння лінійного та кутового руху судна для визначення лінійних і кутових швидкостей судна у проєкціях на осі зв'язаної системи координат, а також диференційні кінематичні рівняння лінійного та кутового руху судна для визначення лінійних і кутових переміщень судна відносно базової системи координат. Знайдені збурюючі

сили і моменти від хвилювання у залежності від геометричних характеристик судна, амплітуди та довжини хвилі, швидкості судна і кута набігання хвилі. Зроблені висновки по розділу 2.

У розділі 3 розглянуті питання автоматичного штормування методом оптимального переміщення фазової точки у безпечну область. Наведена структурна схема модуля автоматичного штормування та описані основні компоненти, до яких відносяться: вимірювачі параметрів руху судна та хвилювання, блок швидкого перетворення Фур'є, блок визначення складових спектру хвилювання, енергія яких перевищує енергію демпфування, блок визначення положення фазової точки та небезпечних щодо перекидання судна областей гармонійного резонансу, параметричного резонансу, втрати остійності на попутному хвилюванні, брочингу та ударів групових хвиль у корму, блоків формування керувань СЕУ та стерном, автоматика СЕУ та стерна. Швидке перетворення Фур'є використовується у бортовому обчислювачі для отримання у реальному часі спектру хвилювання. Складові спектру хвилювання, енергія яких перевищує енергію демпфування, використовуються для побудови небезпечних щодо перекидання судна областей параметрів штормування. На прикладі судна, що має період власних коливань $T_c=12,5\text{с.}$ та довжини хвилі $\lambda = 120\text{м}$ побудовано небезпечні області параметрів штормування. Для підвищення безпеки штормового плавання запропоновано визначати у реальному часі положення фазової точки та небезпечних областей і візуалізувати їх. Розроблено метод автоматичного та оптимального переміщення фазової точки параметрів руху судна у безпечну область, який полягає у використанні залежності між швидкістю і курсом судна, яка мінімізує час знаходження фазової точки у небезпечній зоні, що дозволяє контролювати вихід фазової точки із небезпечної області, зменшити ризики розвитку небезпечних явищ, що ведуть до перекидання судна, підвищити безпеку штормового плавання.

У розділі 4 розглянуті питання автоматичного визначення безпечних параметрів руху судна методом умовної оптимізації функції якості керування.

Це досягнуто за рахунок постійного вирішення у бортовому обчислювачі оптимізаційної задачі з лінійними та нелінійними обмеженнями типу нерівностей, які визначають безпечні області штормування, допустимий діапазон швидкостей штормування, напрямки на навігаційні небезпеки, тощо. Визначені безпечні параметри руху використовуються у подальшому як програмні у автоматичі керування. Цільова функція і обмеження залежать від параметрів руху судна (швидкості V та курсу K), а також від параметрів хвилювання (курсу, швидкості та довжини хвилі). Із усіх названих параметрів лише два доступні для керування – швидкість і курс судна, які і використовувалися для умовної оптимізації. Інші параметри, на які не можливо впливати (параметри хвилювання, діапазон допустимих швидкостей і курсів, тощо) використовуються як зовнішні дані при вирішенні оптимізаційної задачі. Працездатність та ефективність розробленого методу, алгоритмічного і програмного забезпечення перевірені математичним моделюванням у середовищі MATLAB та на стенді імітаційного моделювання для різних районів плавання, погодних умов і навігаційних небезпек. Наведено пояснення отриманих результатів. Використання розробленого методу дає можливість запобігати перевертанню судна, суттєво зменшити вплив людського чинника на процеси керування, зменшити втомлюваність екіпажу, підвищити безпеку штормового плавання.

У розділі 5 розглянуті питання розробки стенду імітаційного моделювання та тестування модулів автоматичного штормування. Зазначено, що основне призначення навігаційних тренажерів – це відпрацювання навичок ручного керування рухом судна. Важливою особливістю навігаційних тренажерів є надійність і реалістичність фізичних процесів, які моделюються в системі, що підтверджено сертифікатами на відповідність стандартам навчального обладнання світових реєстрів та класифікаційних організацій (Det Norske Veritas Germanischer Lloyd, Bureau Veritas, Lloyd's Register, American Bureau of Shipping). Один із таких тренажерів встановлено у Херсонській державній морській академії - тренажер від компанії Transas

«Navi-Trainer Professional 5000». На тренажері є можливість використовувати різні математичні моделі власного судна, цілей, командних приладів, виконавчих пристроїв, імітувати їх відмови, створювати погодні умови та візуалізувати усі ці дані. Здобувачем, разом із керівником дисертаційного дослідження, інтегровано імітатор бортового обчислювача у локальну мережу навігаційного тренажеру, для створення замкнутого контуру «Імітатор бортового обчислювача – Віртуальна модель судна навігаційного тренажеру». Для обміну даними між тренажером і імітатором бортового обчислювача, виконання допоміжних обчислень, розроблено спеціалізоване програмне забезпечення стенду імітаційного моделювання. Спеціалізоване програмне забезпечення написано на мові програмування C# і використовує стандартні методи бібліотеки C# для організації зв'язку через COM-порт, наприклад, метод `ReadExisting()` з класу `SerialPort` для зв'язку через COM-порт і метод `Substring()` з класу даних для аналізу повідомлень. Створено та налаштовано конфігурацію навігаційного тренажеру з імітатором бортового обчислювача. Працездатність та ефективність стенду перевірена математичним моделюванням операцій розходження з багатьма маневруючими цілями та операцій штурмування. Стенд імітаційного моделювання дозволяє відпрацьовувати модулі автоматичного керування із використанням різних тренажерних моделей суден, навігаційних небезпек і погодних умов.

Ключові слова: навігаційна безпека, людський чинник, інтелектуальні системи транспорту, автоматичне керування, штормові діаграми, оптимізація з обмеженнями, резонансні зони, безпека судноводіння, автоматизована система, оптимальне штурмування, імітаційне моделювання.

ANNOTATION

Mateichuk V.M. - Automation of the vessel movement control processes in a storm. - Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 151 - Automation and computer-integrated technologies. – Kherson State Maritime Academy of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kherson, 2024.

The Maritime Safety Committee of the International Maritime Organization at its eighty-second session (November 29 to December 8, 2006) approved the "Revised Guidance to the master for avoiding dangerous situations in adverse weather and sea conditions to providing masters with a basis for decision making on ship handling in adverse weather and sea conditions, thus assisting them to avoid dangerous phenomena that they may encounter in such circumstances.

Steering a ship in a storm is an extremely difficult task and requires a great deal of experience, skill and control of the situation from the captain and crew. Aspects such as high waves, which can cause damage to the vessel and loss of control; strong wind, which complicates not only the direction of movement of the vessel, but also its stability; the vessel may start to roll and heal under the influence of strong wind and waves, which requires great professional skill in control the vessel; rapid changes in conditions, such as sudden changes in wind direction, increasing wave height or the appearance of strong currents, which require a quick reaction and adaptation by the crew; navigation difficulties, limited visibility due to rain, breezes, fog and waves, which makes it difficult to correctly assess the current situation; crew fatigue due to physical and emotional exhaustion, which can lead to reduced concentration and decision-making.

All these aspects make it difficult to steer a ship in a storm and can lead to human-caused accidents.

An analysis of the 2022 Annual Review of Marine Accidents and Incidents by the European Maritime Safety Agency found that from 2014 to 2022, 59.1% of accidents were caused by human actions, and 50.1% of contributing factors were

related to human behavior. Analyzing both human actions and factors contributing to this, the human element refers to 80.7% of investigated marine accidents and incidents. According to data, about 7 percent of accidents occur in the external environment, including bad weather conditions. These trends are typical for all types of vessels.

One of the aspects of the main document, which defines the transport development strategy of Ukraine as a maritime country until 2030, which was approved by the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated May 30, 2018 No. 430-p, provides for the introduction of intelligent transport systems and control systems on land and water transport.

The development and the possibility of testing automated vessel movement control systems are important conditions for reducing the negative impact of the human factor in the tasks of controlling the movement of vessel. The creation of an undemanding way of testing automated SCRS is an important step towards the development of water transport.

The main idea of the research is the development of methods and means of automatic control of a ship movements in a storm, methods and means of development and testing of automatic control of a ship movements in a storm modules, which would allow to reduce the influence of the human factor on the processes of control of a ship movements in a storm, reduce fatigue of the crew, increase the safety of control of a ship in a storm, reduce costs, increase safety and reliability of automatic control of a ship movements in a storm modules.

The main task of the research is to develop methods and means of controlling the movement of a ship in a storm, methods and means of working out automatic control of a ship movements in a storm modules, which will allow to automatically and optimally control the movement of a ship in a storm, reduce the influence of the human factor on storming processes, reduce crew fatigue, increase the safety of storming operations, reduce the cost and increase the safety and reliability of the operation of automatic storming modules.

Achieving the goal of the research involves solving the following tasks:

1. Analysis of the current state of movement control in adverse weather condition systems and methods development: use of storm diagrams; rolling dampers; seaworthiness monitoring system "HULLMOS" and decision support systems "OCTOPUS-DSS" and "IMDSS"; "VOSS" seaworthiness optimization assessment system and "SENSFIB" fibre optic system; review of models and methods of development and testing of automated systems.
2. Analysis of mathematical models of the ship and waves: irregular waves; mathematical model of the vessel; external forces and rolling moments.
3. Automatic control by moving the phase point to the safe zone: structural diagram of the automatic control module; determination of the spectrum of oscillation and its consideration in the construction of dangerous areas; visualization of dangerous areas of storming of the ship; the method of optimal movement of the phase point in the safe area; simulation of the process of optimal movement of the phase point to the safe area
4. Automatic storm navigation using conditional optimization of control quality: formulation of the problem of conditional optimization in storm navigation; identification of safe storm navigation zones; solving the problem of conditional optimization; mathematical modeling of automatic storm navigation using conditional optimization.
5. Development of an imitation modelling stand and testing modules for automatic storm navigation: Navi Trainer 5000 HDMA navigation simulator; integration of the onboard computer simulator into the local network of the navigation simulator; data exchange between the navigation simulator and the onboard computer simulator; simulation of storm navigation processes on the imitation modelling stand.

The subject of the research is the development of principles, methods and models of automatic storming modules, a simulation stand, testing of automatic storming modules on a simulation stand.

The scientific value of the obtained results lies in the development of: methods and technical means of automatic ship storming modules in automated systems; methods and technical means of working out automatic modules of

storming in a closed circuit with mathematical models of a certified navigation simulator, using a systematic approach, analysis and synthesis, abstraction, imaginary experiment, theory of automatic and optimal control, hydrodynamics and mathematical modeling.

The practical significance of the obtained results lies in the use of the developed methods and technical means to create automatic storming modules, the use of which will prevent the ship from capsizing in the event of: harmonic and parametric resonance; loss of stability due to accompanying disturbance; loss of controllability when group waves hit the ship's stern, reduce the influence of the human factor on control processes, reduce crew exhaustion and increase the safety of sailing in stormy conditions.

In a dissertation:

1. For the first time, a method of automatically and optimally moving the phase point of the ship's movement parameters into a safe area was developed, which consists in using the dependence between the speed and the ship's course, which minimizes the time the phase point is in the dangerous zone, unlike existing solutions, it allows controlling the output of the phase point from the dangerous area, reduce the risks of the development of dangerous phenomena leading to the overturning of the ship, increase the safety of sailing in storms.
2. For the first time, a method of storming was developed, which consists in automatically finding safe and optimal parameters of the ship's movement by constantly solving an optimization problem in the on-board computer with linear and nonlinear constraints of the type of inequalities, which determine safe areas of storming; the use of the received safe motion parameters as software in control automation to support software motion, in contrast to existing solutions, allows you to automatically find safe from harmonic, parametric resonances, loss of stability due to traveling waves, loss of controllability due to impacts of group waves in the stern, and optimal motion parameters, which makes it possible to prevent the ship from capsizing, significantly reduce the influence of the human factor on control processes, reduce crew fatigue, and increase navigation safety.

3. The method of estimating areas safe from ship capsizing has been improved, which consists in the application of a fast Fourier transformation to determine the wave spectrum; determination of damping energy; comparing the energies of the spectrum components with the damping energy; determination of components of the spectrum, the energy of which exceeds the damping energy, for the construction and visualization of areas of dangerous storm parameters and automatic determination of safe and optimal parameters of storm sailing, unlike known solutions, takes into account all components of the wave spectrum, the energy of which exceeds the damping energy, which allows to reduce risks overturning the ship, expand the area of safe storming, increase the efficiency and safety of storm sailing.
4. The approach to improving the safety of stormy sailing has been further developed, which consists in determining, at each step of the on-board computer, the position of the phase point and areas dangerous for the ship to capsize, their visualization, unlike existing solutions, provides the shipmaster with up-to-date information about current risks, which allows you to make timely decisions to prevent the occurrence and development of dangerous phenomena by manual maneuvering or using the automatic storming module.
5. The approach of automatic control modules in automated systems development and testing has been further developed, which consists in the integration of the simulation of the on-board computer into the local network of the navigation simulator, the organization of the closed circuit "On-board controller simulator - simulator of the ship", unlike the existing solutions, has gained further development ship models, weather and navigation conditions of a certified simulation, significantly reduce the risks and cost of work on the development and testing of automatic control modules in automated systems.

In chapter 1 analyzes the current state of development of ship storming systems and methods. The IMO recommendations for preventing the dangers of overturning ships, such as harmonic resonance, parametric resonance of the first and second type, loss of stability due to accompanying waves, broaching, impacts of group waves in the stern of the ship, were considered. It has been established that

the general method of preventing of these dangerous phenomena is to change the ship's course and speed. Also, the existing systems of roll damping and the principles of their operation are given, namely, the seaworthiness monitoring system "HULLMOS", the decision support systems "OCTOPUS-DSS" and "IMDSS", the seaworthiness optimization system "VOSS" and the fiber optic system "SENSFIB". Last, the existing models and methods of development and testing of automatic control modules in automated systems are considered in the section. Conclusions on chapter 1 have been drawn.

In chapter 2 the mathematical model of irregular wave motion was considered. The differential dynamic equations for linear and angular ship motion were derived to determine linear and angular velocities of the ship projected onto the axes of the ship coordinate system. Additionally, the differential kinematic equations for linear and angular ship motion were obtained to determine linear and angular displacements of the ship relative to the base coordinate system. Disturbing forces and moments from wave motion were identified based on the geometric characteristics of the ship, wave amplitude and length, ship speed, and wave encounter angle. Conclusions are made in section 2.

In chapter 3 the issues of automatic storming by the method of optimal movement of the phase point to a safe area are considered. The structural diagram of the automatic storming module is presented and the main components are described, which include: ship motion and wave parameters meters, a fast Fourier transform unit, a unit for determining the components of the wave spectrum whose energy exceeds the damping energy, a unit for determining the position of the phase point and dangerous overturning vessels in the areas of harmonic resonance, parametric resonance, loss of stability due to traveling waves, broaching and impacts of group waves in the stern, blocks of ME and rudder controls formation, ME and rudder automation. A fast Fourier transform is used in the on-board computer to obtain a real-time wave spectrum. The components of the wave spectrum, the energy of which exceeds the damping energy, are used to construct zones of storm parameters that are dangerous for the ship to capsize. On the example of a ship with

a period of its own oscillations $T_c=12.5c$. and a wavelength of 120 m, dangerous areas of storm parameters are constructed. To increase the safety of storm sailing, it is proposed to determine the position of the phase point and dangerous areas in real time and visualize them. A method of automatic and optimal movement of the phase point of the ship's motion parameters into a safe area has been developed, which consists in using the dependence between the speed and the ship's course, which minimizes the time the phase point is in the dangerous zone, which allows you to control the exit of the phase point from the dangerous area, reduce the risks of dangerous phenomena occurrence leading to the overturning of the vessel, to increase the safety of sailing in stormy conditions.

Chapter 4 deals with the issue of automatic determination of safe ship movement parameters by the method of conditional optimization of the control quality function. This is achieved by continuously solving in the on-board computer an optimization problem with linear and non-linear constraints of the type of inequalities, which determine the safe areas of vessel movement in a storm, the permissible range of speed in stormy conditions, directions for navigational hazards, etc. The determined safe movement parameters are used later as desired in control automation. The objective function and constraints depend on the parameters of the ship's movement (speed and course), as well as on the wave parameters (course, speed and wavelength). Of all the named parameters, only two are available for control - the ship's speed and course, which were used for conditional optimization. Other parameters that cannot be influenced (perturbation parameters, range of permissible speeds and courses, etc.) are used as external data when solving the optimization problem. The workability and effectiveness of the developed method, algorithm and software are verified by mathematical modeling in the MATLAB environment and on the modelling simulation bench for various swimming areas, weather conditions and navigational hazards. An explanation of the obtained results is provided. Using the developed method makes it possible to prevent the ship from capsizing, significantly reduce the influence of the human factor on control processes, reduce crew fatigue, and increase the safety of storm sailing.

Chapter 5 deals with the development of a bench for simulation modeling and testing of automatic storming modules. It is noted that the main purpose of navigation simulators is to practice the skills of manual control of the ship's movement. An important feature of navigation simulators is the reliability and realism of the physical processes simulated in the system, which is confirmed by certificates of compliance with the standards of training equipment of world registers and classification organizations (Det Norske Veritas Germanischer Lloyd, Bureau Veritas, Lloyd's Register, American Bureau of Shipping). One of these simulators is installed at the Kherson State Maritime Academy - a simulator from Transas company "Navi-Trainer Professional 5000". On the simulator, it is possible to use various mathematical models of your own ship, targets, command devices, executive devices, simulate their failures, create weather conditions and visualize all this data. The acquirer, together with the head of the dissertation research, integrated the on-board computer simulator into the local network of the navigation simulator, to create a closed circuit "On-board computer simulator - Virtual model of the navigation simulator vessel".

To exchange data between the simulator and the on-board computer simulator, to perform auxiliary calculations, specialized software for the simulation stand has been developed. The specialized software is written in the C# programming language and uses standard C# library methods to handle COM port communication, such as the `ReadExisting()` method from the `SerialPort` class for COM port communication and the `Substring()` method from the `Data` class for message analysis. A navigation simulator configuration with an on-board computer simulator has been created and configured. The workability and efficiency of the stand is verified by mathematical modeling of separation operations with many maneuvering targets and storming operations. The simulation stand allows to working out automatic control modules using various simulator models of ships, navigational hazards and weather conditions.

Key words: navigation safety, human factor, intelligent transport systems, automatic control, storm diagrams, optimization with restrictions, dangerous zones,

safety of navigation, automated system, optimal storming, simulation modeling.

Наукові результати дисертаційного дослідження опубліковані в наступних працях:

1. Nosov P.S., Ben A.P., **Mateichuk V.N.**, Safonov M.S. Identification of “Human error” negative manifestation in maritime transport // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. Zaporizhzhia National Technical University. Pages 204-213. Web of Science. DOI 10.15588/1607-3274-2018-4-20

2. P. Nosov, A. Ben, S. Zinchenko, I. Popovych, **V. Mateichuk**, H. Nosova. Formal approaches to identify cadet fatigue factors by means of marine navigation simulators // *CEUR Workshop Proceedings*, 2732, P. 823-838, 2020. <http://ceur-ws.org/Vol-2732/20200823.pdf>

3. Serhii Zinchenko, **Vadym Mateichuk**, Pavlo Nosov, Ihor Popovych, Oleksandr Solovey, Pavlo Mamenko, Olga Grosheva. Use of Simulator Equipment for the Development and Testing of Vessel Control Systems / *Electrical, Control and Communication Engineering*. - 2020. - Vol.16. - №2. - P.58-64. DOI: 10.2478/ecce-2020-0009. <https://sciendo.com/pdf/10.2478/ecce-2020-0009>

4. Zinchenko S. M., Mamenko P. P., Grosheva O. O., **Mateichuk V. M.** Automatic control of the vessel's movement under external conditions // *Науковий вісник ХДМА*, №2(21), 2019. – с.10-15. DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.010-015. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/480/416>

5. S.Zinchenko, O.Tovstokoryi, **V.Mateichuk**, P.Nosov, I.Popovych, I.Gritsuk. Automatic vessel steering in a storm // *Electrical, Control and Communication Engineering*, September, vol. 18, no. 1, pp. 66–74, 2022, <https://doi.org/10.2478/ecce-2022-0009>

6. Mateichuk V. M., Zinchenko S. M., Tovstokoryi O. M. Automatic control of the vessel in a storm, *Науковий вісник ХДМА*, 2023, № 26-27, <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/>

Патенти, які захищають наукову новизну:

7. Патент на корисну модель № 133709 МПК (2006): G06F 8/35 (2018.01),

G06Q 99/00. Спосіб використання тренажерного обладнання для розробки та тестування систем керування рухом суден / С.М.Зінченко, **В.М.Матейчук**, В.Г.Ляшенко, Бень А.П., Товстокорій О.М., Грошева О.О. - Заявка № u 2018 08851, заявлено 20.08.2018, опубліковано 25.04.2019, бюл. № 8/2019

Апробація матеріалів дисертаційного дослідження:

8. **Mateichuk V.M.**, Zinchenko S.M., Tovstokoryi O.M., Kyrychenko K.V., Mamenko P.P. Method of automatic storming by movement of phase point to the safe zone // Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми сталого розвитку морської галузі» (PSDMI-2023), 22 листопада, 2023.

9. **Матейчук В.М.**, Зінченко С.М., Носов П.С., Маменко П.П., Кириченко К.В. Автоматичне штормування із врахуванням наявного демпфування // Матеріали II Міжнародної науково - практичної конференції "Проблеми сталого розвитку морської галузі", Херсон, 7 грудня 2022 року

10. **Матейчук В.М.**, Зінченко С.М., Носов П.С., Маменко П.П., Кириченко К.В. Врахування амплітудно-частотної характеристики хвильового впливу на судно під час шторму // Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології і автоматизація", Одеський національний технологічний університет, 20-21 жовтня 2022, м.Одеса

11. **Матейчук В.М.**, Зінченко С.М., Маменко П.П., Кириченко К.В. Врахування наявного демпфування та спектру зовнішніх впливів у задачі автоматичного штормування // Матеріали XIV Міжнародної науково - практичної конференції "Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті" (MINTT-2022), Херсон, 25-27 травня 2022р.

12. **Vadym Mateichuk**, Serhii Zinchenko, Oleh Tovstokoryi, Pavlo Nosov, Yaroslav Nahrybelnyi, Ihor Popovych and Vitaliy Kobets. Automatic Vessel Control in Stormy Conditions // 2 nd International workshop on computational and Information Technologies for Control and Modeling (CITCM 2021), 5 November, 2021. Rivne, Ukraine.

13. **Mateichuk V.M.**, Zinchenko S.M., Tovstokoryi O.M., Mamenko P.P.,

Artemenko A.G. TAKING INTO ACCOUNT THE SLAMMING DURING AUTOMATIC SAFE SAILING IN A STORM // Матеріали 1 міжнародної науково - практичної конференції "Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2021), Херсон: ХДМА, 03-04 листопада 2021

14. **Mateichuk V.M.**, Zinchenko S.M., Nosov P.S., Moiseienko V.S., Mamenko P.P. Automatic vessel steering in a storm // Materials of the I International scientific-practical conference "Actual problems of transport, energy, infrastructure safety". - Kherson: KhSMA, 8-11 September, 2021.

15. S. M. Zinchenko, P. S. Nosov, **V. M. Mateichuk**, P. P. Mamenko, O. O. Grosheva. Use of navigation simulator for development and testing ship control systems // Materials of the International scientific and practical conference dedicated to the memory of professors Fomin Yu. Ya. And Semenov V. S., Odessa (Ukraine) – Istambul (Turkey) – Odessa (Ukraine), 24-28 April 2019, pp. 350-355

16. С. М. Зінченко, **В. М. Матейчук**, В. Г. Ляшенко. Використання інформаційних систем моделювання для розробки та тестування систем автоматичного керування рухом судна // Матеріали V МНПК «Безпека життєдіяльності на транспорті а виробництві: освіта, наука, практика», Херсон, 13-15 вересня 2018р., с.27-29

Дисертаційні дослідження опубліковані в наступних роботах здобувача:

Всі положення, що виносяться на захист, належать особисто здобувачу і не містять результатів, ідей або розробок, що належать співавторам, разом з якими опубліковані наукові праці.

У роботі [4] здобувачем проведено математичне моделювання процесів руху конвенційного одногвинтового судна та конвенційного одногвинтового судна з носовим кермом в умовах дії вітру і течії. Результати моделювання підтвердили розрахунки, що схема керування конвенційним одногвинтовим судном з носовим кермом має суттєві переваги, які полягають у скороченні часу перехідних процесів, можливості підтримування керованості для більших швидкостей вітру та течії, підвищенні надійності системи керування за

рахунок резервування (використання носового стерна).

У роботах [5, 12, 14] здобувачем розроблено метод автоматичного штормування, який полягає у автоматичному вимірюванні параметрів руху судна і хвилювання, побудові у бортовому обчислювачі області гармонійного резонансу, розрахунку безпечних параметрів штормування, використання у подальшому їх як програмних значень для автоматичного підтримування безпечної швидкості і курсу. Працездатність та ефективність методу, розробленого на його основі алгоритмічного та програмного забезпечення, підтверджені моделюванням у замкнутому контурі на стенді імітаційного моделювання.

У роботі [8] здобувачем запропоновано метод оптимального переміщення фазової точки системи координат $e \sin q - e \cos q$ у безпечну від гармонійного резонансу область.

У роботах [9, 11] здобувачем запропоновано враховувати наявне демпфування судна при розрахунку областей гармонійного резонансу, отримано формулу розрахунку максимальної амплітуди зовнішнього впливу, яка не приведе до перевищення встановленого максимального кута крену при резонансі.

У роботі [10] здобувачем запропоновано використовувати швидке перетворення Фур'є для отримання спектру хвилювання у реальному часі, вибору із спектру небезпечних компонент, енергія яких перевищує енергію демпфування судна, використання небезпечних компонент для побудови областей гармонійного резонансу.

У роботі [13] здобувачем побудовано небезпечну область, знаходження у якій фазової точки викликає появу і розвиток слемінгу.

У роботі [6] здобувачем розроблено метод автоматичного оптимального штормування, який полягає у постійному вирішенні задачі нелінійної оптимізації цільової функції з лінійними та нелінійними обмеженнями типу нерівностей, для визначення безпечних та оптимальних параметрів штормування, подальшого їх використання, як програмних, для

автоматичного підтримування безпечного курсу і швидкості.

У роботах [3, 7, 15, 16] здобувач приймав участь у створенні стенду імітаційного моделювання. Особисто ним проведені роботи по: інтегруванню імітатора бортового обчислювача у локальну мережу навігаційного тренажеру Navi Trainer 5000; розробці програмного забезпечення обміну даними між імітатором бортового обчислювача і навігаційним тренажером; налаштуванню конфігурації стенду імітаційного моделювання із використанням штатного конфігуратора; розробці програмного забезпечення модуля автоматичного штормування, математичному моделюванню процесів штормування у замкнутому контурі «Імітатор бортового обчислювача – Тренажерна модель судна».

Обсяг і структура роботи. Дисертація складається із розширеної анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 157 найменувань на 15 сторінках і чотирьох додатків на 24 сторінках. Повний обсяг роботи становить 199 сторінок тексту, у тому числі 124 сторінки основного тексту, 6 таблиць та 58 рисунків.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ.....	27
ВСТУП.....	29
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ СИСТЕМ ТА МЕТОДІВ ШТОРМУВАННЯ СУДНА.....	36
1.1 Рекомендації ММО по боротьбі з небезпеками перекидання судна..	37
1.2. Штормові діаграми Ремеза. Зміна курсу та швидкості судна.....	43
1.3. Заспокоювачі хитавиці.....	51
1.4. Поведінка судна в шторм в залежності від форми корпусу.....	67
1.5. Система моніторингу морехідності «HULLMOS» та системи підтримки прийняття рішень «OCTOPUS-DSS» і «IMDSS».....	69
1.6. Система оцінки оптимізації морехідності «VOSS» та волоконно-оптична система «SENSFIB».....	74
1.7. Огляд моделей та методів розробки і тестування автоматичних модулів штормування в автоматизованих системах.....	77
1.8. Висновки по розділу 1.....	80
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ СУДНА І ХВИЛЮВАННЯ.....	83
2.1. Нерегулярне хвилювання.....	83
2.2. Математична модель судна.....	89
2.3. Зовнішні сили і моменти від хитавиці, що діють на судно.....	96
2.4. Висновки по розділу 2.....	100
РОЗДІЛ 3. АВТОМАТИЧНЕ ШТОРМУВАННЯ МЕТОДОМ ПЕРЕМІЩЕННЯ ФАЗОВОЇ ТОЧКИ У БЕЗПЕЧНУ ЗОНУ.....	102
3.1. Структурна схема модуля автоматичного штормування.....	102
3.2. Визначення спектру хвилювання та його врахування при побудові небезпечних областей.....	104
3.3. Візуалізація небезпечних областей штормування судна.....	109

3.4. Метод оптимального переміщення фазової точки у безпечну зону..	121
3.5. Моделювання процесу оптимального переміщення фазової точки у безпечну зону.....	124
3.6. Висновки по розділу 3.....	126
РОЗДІЛ 4. АВТОМАТИЧНЕ ШТОРМУВАННЯ МЕТОДОМ УМОВНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ФУНКЦІЇ ЯКОСТІ КЕРУВАННЯ.....	128
4.1. Постановка задачі умовної оптимізації при керуванні судном у шторм.....	128
4.2. Визначення безпечних областей штормового плавання.....	129
4.3. Вирішення задачі умовної оптимізації.....	132
4.4. Математичне моделювання автоматичного штормування методом умовної оптимізації.....	134
4.5. Висновки по розділу 4.....	145
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТЕНДУ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ МОДУЛІВ АВТОМАТИЧНОГО ШТОРМУВАННЯ.....	146
5.1. Навігаційний тренажер Navi Trainer 5000 ХДМА.....	146
5.2. Інтегрування імітатора бортового обчислювача у локальну мережу навігаційного тренажеру.....	147
5.3. Обмін даними між навігаційним тренажером і імітатором бортового обчислювача.....	149
5.4. Моделювання процесів штормування на стенді імітаційного моделювання.....	153
5.5. Висновки по розділу 5.....	157
ВИСНОВКИ.....	159
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	161
ДОДАТКИ.....	176
Додаток А. Технологічна карта наукового дослідження.....	177
Додаток Б. Лістинги основних програм	178

Додаток В. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи.....	196
Додаток Г. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	197

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ СКОРОЧЕНЬ

ARPA (Automatic Radar Plotting Aids) - засоби автоматичної радіолокаційної прокладки;

COLREG – International Regulations for Preventing Collisions at Sea;

CFD – Computer Fluid Dynamic;

CPG - кооперативна позиційна гра;

DP (Dynamic positioning) – Динамічне позиціонування, керована комп'ютером система для автоматичної підтримки позиції та курсу судна за допомогою власних гвинтів і двигунів;

GPMS – супутниковий вимірювач параметрів руху корпусу судна;

GPS (Global Positioning System) – Система глобального позиціонування;

Gyro – Gyrocompass;

HIL – Hardware in the loop (Замкнений контур);

IMO – International Maritime Organization;

Lpp – Length between particulars;

MATLAB - MATrix LABoratory;

MSC (The Maritime Safety Committee) – організація, що займається питаннями, пов'язаними з безпекою на морі;

NMEA – National Marine Electronics Association;

NTPro 5000 – Navi-Trainer Professional 5000;

NWT – Numerical Wave Tank;

RADAR – Radio Detecting and Ranging;

UAIS – Universal Automatic Identification System (Автоматична Ідентифікаційна Система);

АСК – Автоматизована система керування;

АСКМ – Автоматизована система контролю морехідності;

КР – Крильчасті рушії;

ЛОМ – Локальна обчислювальна мережа;

ММО – Міжнародна морська організація;

МПЗЗС – Міжнародні правила запобігання зіткненню суден у морі;

НТХ – Нелінійна теорія хвилювання;

ПІД – Пропорційно Інтегрально Диференційний регулятор;

СКРС – Система керування рухом суден;

ХДМА – Херсонська державна морська академія.

ВСТУП

В сучасному світі, де технологічний прогрес стрімко змінює обличчя багатьох індустрій, мореплавство залишається ключовою галуззю, в якій безпека та ефективність висувають високі вимоги до технічних та людських ресурсів. Однією з найважливіших аспектів забезпечення безпеки судноплавства є ефективне управління судном в умовах шторму [1, 37, 60, 68, 69, 86]. Штормові умови, з їхніми сильними вітрами, хвилями та атмосферними умовами, висувають великі виклики перед сучасними судовласниками, морськими екіпажами та розробниками навігаційних систем [138, 136, 45, 40, 41, 42, 43, 44, 9, 38].

Справжній високотехнологічний революційний стрибок у галузі управління судном в умовах шторму відбувається в контексті поєднання передових технологій, високоточних навігаційних систем та інтелектуальних алгоритмів [55, 82, 85, 97, 99]. Із ростом потреб у швидкому та ефективному реагуванні на зміни у морських умовах, важливість розробки та вдосконалення автоматизованих систем керування суднами набуває нового значення [10, 110, 111, 113, 121, 132, 133, 137]. Розвиток оптимальних методів управління судном в умовах шторму є надзвичайно актуальним завданням для України, яка володіє значущим морським потенціалом. Морські перевезення є важливою складовою господарського розвитку країни, і ефективність цього сектору прямо залежить від здатності суден ефективно функціонувати в умовах шторму та інших негод [15, 25, 39, 3, 58].

Україна, маючи значні морські порти та берегові лінії, стикається з викликами, пов'язаними зі змінами погодних умов, особливо в штормовий період. Забезпечення безпеки судноплавства та надійності морських перевезень стає пріоритетом, оскільки це впливає на економічну стійкість країни, міжнародну торгівлю та забезпечення енергетичної безпеки [143, 155, 148, 147].

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Спрямованість дисертаційного дослідження тісно пов'язана з Національною

транспортною стратегією України на період до 2030 року, Морською доктриною на період до 2035 року, концепцією реформування транспортного сектору економіки. Робота виконана на базі тренажерного комплексу ХДМА, науково-дослідної лабораторії «Розробка систем підтримки прийняття рішень, ергатичних та автоматизованих систем керування рухом суден», в рамках тематичних планів кафедри управління судном та: науково-дослідної роботи: «Розробка програмних засобів для підвищення якості функціонування систем динамічного позиціонування морських суден», номер державної реєстрації 0117U002176; проєкту науково-технічної (експериментальної) розробки «Розробка методів, алгоритмів та програмних засобів для автоматизованих систем керування рухом морських суден»; науково-дослідної роботи № 55п/21 «Розробка новітніх моделей та програмних засобів для автоматизованих систем керування рухом морських суден цивільного та спеціального призначення»; науково-дослідної роботи «Виконання завдань перспективного плану розвитку наукового напрямку «Технічні науки», номер державної реєстрації 0121U114703, проєкту «Розробка автоматизованих навігаційних систем керування рухом морських суден з урахуванням ризиків в умовах воєнного стану», що фінансуються із видатків загального фонду державного бюджету України.

Мета наукового дослідження полягає у автоматизації процесів штормування та відпрацювання автоматичних модулів штормування, що дозволить автоматично і оптимально керувати рухом судна у шторм, зменшити вплив людського чинника на процеси штормування, зменшити виснаженість екіпажу, підвищити безпеку операцій штормування, зменшити вартість та підвищити безпеку і надійність відпрацювання автоматичних модулів штормування.

Наукова гіпотеза дослідження полягає у: використанні автоматичних модулів керування судном у шторм, що дозволить автоматизувати операції штормування, зменшити вплив людського чинника на процеси штормування, зменшити виснаження екіпажу, підвищити безпеку мореплавства; створенні

стенду імітаційного моделювання для відпрацювання автоматичних модулів штормування у замкнутому контурі із математичними моделями сертифікованого навігаційного тренажеру Navi Trainer 5000, що дозволить зменшити вартість, підвищити безпеку та надійність відпрацювання автоматичних модулів штормування.

Головне завдання дослідження полягає у розробці нових методів та засобів керування рухом судна у шторм, методів та засобів відпрацювання автоматичних модулів штормування, які дозволять автоматично і оптимально керувати рухом судна у шторм, зменшити вплив людського чиннику на процеси штормування, зменшити виснаженість екіпажу, підвищити безпеку операцій штормування, зменшити вартість та підвищити безпеку і надійність відпрацювання автоматичних модулів штормування.

Досягнення мети дослідження передбачає вирішення наступних задач:

1. Аналіз сучасного стану розвитку систем та методів штормування суден: використання штормових діаграм; заспокоювачі хитавиці; система моніторингу морехідності «HULLMOS» та системи підтримки прийняття рішень «OCTOPUS-DSS» і «IMDSS»; система оцінки оптимізації морехідності «VOSS» та волокно-оптична система «SENSFIB»; огляд моделей та методів розробки і тестування автоматизованих систем.
2. Аналіз математичних моделей судна і хвилювання: нерегулярне хвилювання; математична модель судна; зовнішні сили і моменти від хитавиці.
3. Автоматичне штормування шляхом переміщення фазової точки у безпечну зону: структурна схема модуля автоматичного штормування; визначення спектру хвилювання та його врахування при побудові небезпечних областей; візуалізація небезпечних областей штормування судна; метод оптимального переміщення фазової точки у безпечну область; моделювання процесу оптимального переміщення фазової точки у безпечну область.

4. Автоматичне штормування методом умовної оптимізації функції якості керування: постановка задачі умовної оптимізації при керуванні судном у шторм; визначення безпечних областей штормового плавання; вирішення задачі умовної оптимізації; математичне моделювання автоматичного штормування методом умовної оптимізації.

5. Розробка стенду імітаційного моделювання та тестування модулів автоматичного штормування: використання навігаційного тренажеру Navi Trainer 5000 для розробки стенду імітаційного моделювання; інтегрування імітатора бортового обчислювача у локальну мережу навігаційного тренажеру; організація обміну даними між навігаційним тренажером і імітатором бортового обчислювача; моделювання процесів штормування на стенді імітаційного моделювання.

Об'єкт дослідження - процеси автоматичного штормування судна та процеси розробки і тестування автоматичних модулів керування.

Предмет дослідження - принципи, методи і моделі автоматичних модулів штормування; створення стенду імітаційного моделювання для відпрацювання принципів, методів і моделей автоматичних модулів штормування у замкнутому контурі із математичними моделями сертифікованого навігаційного тренажеру Navi Trainer 5000.

Методи дослідження:

- аналіз і синтез - для розщеплення єдиного процесу на складові і інтеграції складових у єдиний процес;
- формалізація, ідеалізація, абстрагування, - для запису досліджуваних процесів у вигляді математичних формул та подальшого застосування математичного апарату;
- уявний експеримент – для відтворення в уяві реального експерименту;
- дедукція - для переходу від знання загальних закономірностей до окремих їх проявів;
- індукція – для переходу від часткових знань до загальних висновків;

- математичне моделювання – для отримання параметрів протікання нелінійних багатовимірних процесів;
- спостереження, вимірювання, моніторинг – для збору інформації про параметри процесу.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше розроблено:

- підхід автоматичного та оптимального переміщення фазової точки параметрів руху судна у безпечну область, який полягає у використанні залежності між швидкістю і курсом судна, яка мінімізує час знаходження фазової точки у небезпечній зоні, на відміну від існуючих рішень, дозволяє контролювати вихід фазової точки із небезпечної області, зменшити ризики розвитку небезпечних явищ, що ведуть до перекидання судна, підвищити безпеку штормового плавання;
- підхід штормування, який полягає у автоматичному знаходженні безпечних та оптимальних параметрів руху судна шляхом постійного вирішення у бортовому обчислювачі оптимізаційної задачі з лінійними та нелінійними обмеженнями типу нерівностей, які визначають безпечні області штормування; використанні отриманих безпечних параметрів руху, як програмних, у автоматичній керуванні для підтримування програмного руху, на відміну від існуючих рішень дозволяє автоматично знайти безпечні від гармонійного, параметричного резонансів, втрати остійності на попутному хвилюванні, втрати керованості через удари групових хвиль у корму та оптимальні параметри руху, що дає можливість запобігти перевертанню судна, суттєво зменшити вплив людського чинника на процеси керування, зменшити втомлюваність екіпажу, підвищити безпеку судноплавства.

Удосконалено:

- підхід оцінювання безпечних від перекидання судна областей, який полягає у застосуванні швидкого перетворення Фур'є для визначення спектру хвилювання; визначенні енергії демпфування; порівнянні енергії складових спектру із енергією демпфування; визначенні складових спектру, енергія яких

перевищує енергію демпфування, для побудови та візуалізації областей небезпечних параметрів штормування та автоматичного визначення безпечних і оптимальних параметрів штормового плавання, на відміну від відомих рішень, враховує усі складові спектру хвилювання, енергія яких перевищує енергію демпфування, що дозволяє зменшити ризики перевертання судна, розширити область безпечного штормування, підвищити ефективність і безпеку штормового плавання.

Набули подальшого розвитку:

- підхід щодо підвищення безпеки штормового плавання, який полягає у визначенні, на кожному кроці бортового обчислювача, положення фазової точки та небезпечних щодо перекидання судна областей, їх візуалізації, на відміну від існуючих рішень, надає судноводієві актуальну інформацію про поточні ризики, що дозволяє приймати своєчасні рішення по упередженню виникнення та розвитку небезпечних явищ шляхом ручного маневрування або використання автоматичного штормування;

- підхід до розробки і тестування автоматичних модулів керування у автоматизованих системах, який полягає в інтеграції імітатора бортового обчислювача в локальну мережу навігаційного тренажеру, організації замкнутого контуру «Імітатор бортового контролеру – Тренажерна модель судна», на відміну від існуючих рішень дозволяє використовувати моделі суден, погодні та навігаційні умови сертифікованого тренажеру для імітаційного моделювання, значно знизити ризики та вартість робіт по розробці і тестуванню автоматичних модулів керування у автоматизованих системах.

Наукове значення отриманих результатів полягає у розробці: нових методів і підходів до автоматичного штормування судна; нових методів і підходів до відпрацювання автоматичних модулів керування рухом судна, із використанням системного підходу, аналізу і синтезу, абстрагування, уявного експерименту, теорії автоматичного та оптимального керування, гідродинаміки та математичного моделювання.

Практичне значення отриманих результатів полягає у використанні розроблених методів і підходів для створення автоматичних модулів штормування, використання яких дозволить запобігти перевертанню судна при виникненні: гармонійного та параметричного резонансу; втрати остійності на попутному хвилюванні; втрати керованості при ударі групових хвиль у корму судна, зменшити вплив людського чинника на процеси керування, зменшити виснаження екіпажу та підвищити безпеку плавання у штормових умовах.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ СИСТЕМ ТА МЕТОДІВ ШТОРМУВАННЯ СУДНА

Керування судном у шторм - важливий етап у проводі судна. Під час шторму виникають небезпеки перевертання судна, викликані гармонійним резонансом, параметричним резонансом першого та другого типу, втратою остійності на попутному хвилюванні, ударами групових хвиль у корму судна [67, 66, 65, 14, 109, 20, 21]. Також, під час шторму на судно діють великі навантаження, які можуть значно зрости при неправильному керуванні та привести до руйнування корпусу [70]. Для полегшення завдання керування судном у шторм, рядом вчених запропоновано використовувати діаграми штормування. Найбільшого поширення набула універсальна діаграма Ю.В. Ремеза [5, 156], яка дозволяє визначати небезпечні зони щодо перекидання судна та вибирати безпечні параметри штормування (курс і швидкість судна). Міжнародною морською організацією у різні часи також розроблялися рекомендації щодо безпечного плавання у шторм. Це «Resolution A.562(14), adopted on 20 November 1985. Recommendation on a severe wind and rolling criterion (weather criterion) for the intact stability of passenger and cargo ships of 24 metres in length and over [32], MSC/Circ.707 from 19 October 1995. Guidance to the master for avoiding dangerous situations in following and quartering seas [31] та MSC.1/Circ.1228 from 11 January 2007. Revised guidance to the master for avoiding dangerous situation in adverse weather and sea conditions [33]. Штормові діаграми та рекомендації ММО передбачають візуальне визначення параметрів хвилювання та подальші ручні розрахунки, із використанням формул та графіків, що дає низьку точність та містить елемент людського чинника. Для зменшення хитавиці застосовуються також заспокоювачі хитавиці, побудовані на різних фізичних принципах, крильчасті рушії, спеціальні форми корпусу судна, тощо. Останнім часом розробляються автоматизовані системи контролю морехідності, які автоматично вимірюють параметри руху власного судна та хвилювання, проводять необхідні

розрахунки для оцінювання морехідності судна. Разом з тим, автоматизовані системи контролю морехідності передбачають наявність людини – оператора у контурі керування та пов'язані з цим затримки на прийняття рішення і людський чинник [100].

1.1. Рекомендації ММО по боротьбі з небезпеками перекидання судна

Комітет з безпеки на морі міжнародної морської організації на своїй шістдесят п'ятій сесії (9 - 17 травня 1995 р.) схвалив «Керівництво для капітана щодо уникнення небезпечних ситуацій у морі на попутному хвилюванні» (Guidance to the master for avoiding dangerous situations in following and quartering seas [31]) з метою забезпечення капітанів основою для прийняття рішень щодо керування рухом судна на попутному хвилюванні, таким чином допомагаючи їм уникнути небезпечних явищ, з якими вони можуть зіткнутися.

Комітет вирішив у майбутньому переглянути дане керівництво з метою його вдосконалення, зокрема щодо великих суден, на основі нових технічних розробок і з урахуванням досвіду, отриманого в результаті його застосування.

І вже на своїй вісімдесят другій сесії (з 29 листопада по 8 грудня 2006 року) комітет з безпеки на морі схвалив «Переглянуте керівництво для капітанів щодо уникнення небезпечних ситуацій за несприятливих погодних умов» (Revised guidance to the master for avoiding dangerous situations in adverse weather and sea conditions [33]) з метою забезпечення капітанів основою для прийняття рішень щодо керування судном за несприятливих погодних умов, таким чином допомагаючи їм уникати небезпечні явища, з якими вони можуть зіткнутися в несприятливих умовах. Урядам-членам організації (175 країн) було запропоновано довести переглянуте керівництво до відома зацікавлених сторін.

Основними положеннями рекомендацій ММО є:

1. До несприятливих погодних умов належать хвилі, спричинені вітром, або сильне хвилювання. Деякі комбінації довжини хвилі та висоти хвилі за певних умов експлуатації можуть призвести до небезпечних ситуацій для

суден. Проте опис несприятливих погодних умов, наведений нижче, не перешкоджає капітану судна вживати розумних заходів у менш суворих умовах, якщо це здається необхідним.

2. Під час плавання за несприятливих погодних умов судно, ймовірно, зіткнеться з різними видами небезпечних явищ, які можуть призвести до перекидання або сильного крену, що спричинить пошкодження вантажу, обладнання та людей на борту. Чутливість судна до небезпечних явищ буде залежати від фактичних параметрів остійності, геометрії корпусу, розміру судна та його швидкості. Це означає, що вразливість до небезпечних реакцій, включаючи перекидання, і ймовірність його виникнення в конкретному стані моря можуть відрізнятися для кожного судна.

3. На суднах, які обладнані бортовим комп'ютером для оцінки остійності та які використовують спеціально розроблене програмне забезпечення, яке враховує основні деталі, фактичну остійність і динамічні характеристики окремого судна в реальних умовах плавання, таке програмне забезпечення має бути схвалено Адміністрацією. Результати, отримані в ході таких розрахунків, слід розглядати лише як допоміжний інструмент у процесі прийняття рішень.

4. Слід регулярно спостерігати за хвилями. Зокрема, період хвилі T_w слід вимірювати за допомогою секундоміра як проміжок часу між утворенням плями піни хвилею, що розбивається, та її повторною появою. Довжина хвилі λ визначається або шляхом візуального спостереження в порівнянні з довжиною судна, або шляхом зчитування середньої відстані між послідовними гребнями хвиль на радіолокаційних зображеннях хвиль.

5. Період хвилі та довжина хвилі λ пов'язані наступним чином:
 $\lambda = 1.56 \cdot T_w^2$ [m] or $T_w = 0.8T \lambda$ [s].

6. Період зустрічі T_E може бути виміряний як період хитавиці за допомогою секундоміра або розрахований за формулою: $T_E = \frac{3T_w^2}{3T_w + V \cos(a)}$ [S].

7. Діаграма (Рис. 1.1) також може бути використана для визначення періоду набігання хвиль на судно.

8. Слід також оцінювати висоту значних хвиль.

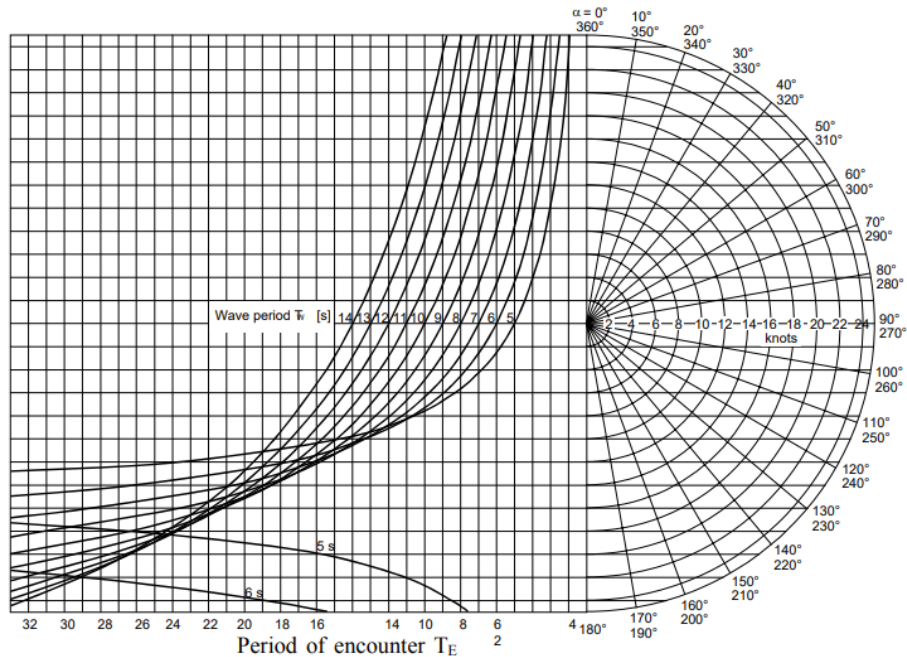


Рис. 1.1 – Визначення періоду зустрічних хвиль T_E [33]

Також в рекомендаціях перелічені наступні небезпечні явища, що виникають під час несприятливий погодних умов:

1. Явища, що відбуваються на попутному хвилюванні. Судно, що йде на хвилях, які направлені з кормових курсів, стикається з хвилями з більшим періодом, ніж на хвилях, що йдуть зустрічними курсами, і основні небезпеки, що виникають у такій ситуації, такі:

1.1. Surf-riding та брочинг. Коли судно знаходиться на крутому передньому краї високої хвилі на попутному хвилюванні, судно може прискоритися, знаходячись зверху на хвилі. Це явище відоме як Surf-riding. У цій ситуації може виникнути так зване явище брочингу, яке створює загрозу перекидання судна внаслідок раптової зміни курсу судна та несподіваного великого крену.

1.2. Зменшення остійності під час проходження гребня хвилі посередині судна. Коли судно йде на гребені хвилі, остійність судна може бути суттєво знижена відповідно до змін форми зануреного корпусу. Це зниження остійності може стати критичним для довжин хвиль у діапазоні від $0,6 L$ до $2,3$

L , де L – це довжина судна в метрах. У цьому діапазоні ступінь зниження стабільності майже пропорційна висоті хвилі. Особливо небезпечна ця ситуація при попутному хвилюванні, тому що тривалість перебування на гребні хвилі, що відповідає часовому інтервалу зниженої стійкості, стає більшою.

2. Гармонійний резонанс. Великі обертаючі моменти можуть створюватися, коли період вільних коливань судна збігається з періодом хвилі. У разі навігації на попутному хвилюванні це може статися, коли поперечна остійність судна є незначною, і тому вільних коливань судна період хитавиці судна стає довшим.

3. Параметричний резонанс.

3.1. Параметричні рухи крену з великими та небезпечними амплітудами крену у хвилях зумовлені різницею стабільності між положенням на гребені хвилі та положенням у підшві хвилі. Параметричний резонанс може відбуватися в двох різних ситуаціях:

3.1.1. Остійність змінюється залежно від вдаваного періоду хвилювання T_E , який приблизно дорівнює періоду хитавиці судна T_R судна (співвідношення 1:1). Остійність досягається мінімального значення один раз протягом кожного періоду. Ця ситуація характеризується асиметричною хитавицею, тобто амплітуда з гребнем хвилі посередині набагато більша, ніж амплітуда з іншого боку. Через тенденції сповільнення повернення у вихідне положення рівноваги від великої амплітуди, період хитавиці T_R може певною мірою адаптуватися до вдаваного періоду хвилювання, так що цей тип параметричного резонансу може відбуватися з широкою смугою частот вдаваного періоду хвилювання. Під час хвилювання, коли хвилі рухаються під певним кутом з кормового напрямку може стати помітним перехід до гармонічного резонансу.

3.1.2. Остійність змінюється залежно від вдаваного періоду хвилювання T_E , який приблизно дорівнює половині періоду хитавиці судна T_R судна (співвідношення 1:0,5). Остійність досягається мінімального значення двічі

протягом кожного періоду хитавиці судна. При попутному хвилюванні, де період зіткнення стає більшим, ніж період хвилі, це може статися лише з дуже великими періодами хитавиці судна T_R , що вказує на граничну непорушену остійність судна. Результатом є симетрична хитавиця з великими амплітудами, знову ж таки з тенденцією адаптації реакції судна до вдаваного періоду хвилювання через зменшення остійності на гребні хвилі. Параметрична хитавиця з коефіцієнтом зустрічі 1:0,5 також може відбуватися на зустрічних хвилях і хвилях, що йдуть під різним кутом до діаметральної площини судна.

Відповідно до розділу 4.2.2. рекомендацій [33] для послідовних ударів високою хвилею, у випадку, якщо судно піддається впливу хвиль безпосередньо з корми, небезпечна зона визначається в межах діапазону відношення $\frac{V(\text{вузли})}{T_w(\text{секунди})}$ від 1,3 до 2,0, як можна побачити на (Рис. 1.2).

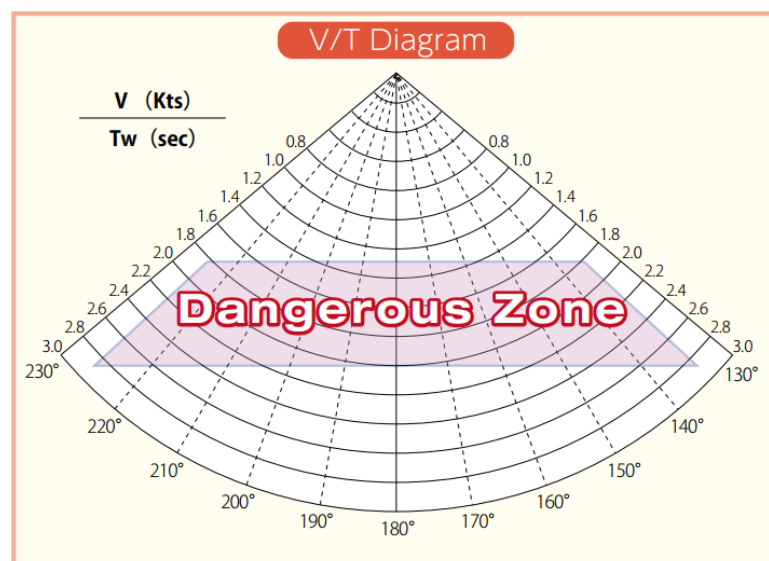


Рис. 1.2 – Ризик послідовних ударів високих хвиль з кормових курсів [33]

Також у пункті 4.2.2.1 вищезазначеної настанови визначається, як оцінити, чи судно послідовно атакують високі хвилі:

- 1) Середня довжина хвилі більша за 0,8 L (L_{pp} : довжина між перпендикулярами)

2) Значна висота хвилі більша $0,04 L$ (L_{pp} : довжина між перпендикулярами)

Метод оцінки для визначення того, чи судно послідовно атакують високі хвилі. Наприклад, якщо довжина судна L_{pp} становить 120 м, довжина хвилі - 126 м, а значна висота хвилі - 5 м, можна встановити, що судно послідовно атакують високі хвилі.

Також слід зазначити резолюцію A.749(18) «IS Code - Intact Stability for All Types of Ships Covered by IMO Instruments», що замінює резолюцію IMCO A.167(ES.IV) – Рекомендація щодо остійності пасажирських і вантажних суден довжиною менше 100 метрів [29].

Кодекс було зібрано для надання в одному документі рекомендованих положень, що стосуються непорушеної остійності, на основі існуючих інструментів ММО.

Критерії, включені до Кодексу, базуються на концепціях, враховуючи надійні принципи проектування та інженерії та досвід, отриманий під час експлуатації таких суден. Крім того, технологія проектування сучасних суден постійно розвивається, і кодекс не залишається статичним, а за потреби періодично переглядається, враховуючи як досвід, так і подальший розвиток.

Так, в 1998р. комітет з безпеки на морі прийняв резолюцію MSC.75(69) - Прийняття поправок до Кодексу (14 травня 1998 р.) [94] та резолюцію MSC.267(85) – Adoption of the International Code on Intact Stability, 2008 – (Adopted on 4 December 2008) [89]. В 2011 та 2015 році було прийнято поправки до частини В Міжнародного кодексу непорушеної остійності (20 травня 2011 р. та 5 червня 2015 р.) [90, 91]. В 2016 та 2018 році також було прийнято поправки до Вступу та частини А Міжнародного кодексу непорушеної остійності (25 листопада 2016 р. та 24 травня 2018 р.) [92, 93].

Під час розробки Кодексу було визнано, що з огляду на велику різноманітність типів, розмірів суден, а також умов їх експлуатації та навколишнього середовища проблеми безпеки від аварій, пов'язані з остійністю, загалом ще не вирішені. Зокрема, безпека судна у морському

просторі включає складні гідродинамічні явища, які досі не були належним чином досліджені та зрозумілі. Судна у морському руслі слід розглядати як динамічну систему, а взаємозв'язки між судном та умовами навколишнього середовища, такими як хвильове та вітрове хвилювання, визнаються надзвичайно важливими елементами. Визнається, що розробка критеріїв остійності, заснованих на гідродинамічних аспектах та аналізі остійності судна в морському руслі, наразі створює складні проблеми, які потребують подальших досліджень.

Для оцінки критерію погоди, що має вплив на остійність судна ММО 20 листопада 1985 року прийняли резолюцію А.562(14) «Recommendation on a severe wind and rolling criterion (weather criterion) for the intact stability of passenger and cargo ships of 24 metres in length and over» [32] (Рекомендація щодо критерію сильного вітру і бортової хитавиці для непорушеної остійності пасажирських і вантажних суден довжиною 24 метри і більше).

В рекомендаціях передбачається вплив хвиль на бортову хитавицю і нахил від результуючого кута рівноваги до кута крену при бортовій хитавиці в навітряну сторону. Також рекомендації звертають увагу на вплив постійного вітру для того, щоб уникнути надмірних результуючих кутів крену.

1.2. Штормові діаграми Ремеза. Зміна курсу та швидкості судна

По відношенню до бортової хитавиці судно є системою з дуже різко вираженими резонансними властивостями. Якщо в спектрі збурювальних сил присутня частота, досить близька до частоти вільних коливань такої системи, то вплив цієї спектральної складової буде різко переважати над впливом всіх інших і система поводитиметься приблизно так, начебто на неї діє тільки гармонійна збурювальна сила резонансної частоти. Цим пояснюється добре відомий з практики мореплавання факт при будь-якому курсі та швидкості рівності середнього періоду бортової хитавиці на нерегулярному хвилюванні, у спектрі якого присутні всі частоти, у тому числі і резонансна, і періоду вільних коливань сулна. Тому для забезпечення гарної мореплавності

остійності повинна обмежуватися не тільки знизу, а й зверху.

На відміну від періоду амплітуда хитавиці на нерегулярному хвилюванні істотно залежить від курсу та швидкості судна. Якщо частоти вільної бортової або кільової хитавиці ω_4 або ω_5 помітно відрізняються від частоти максимуму спектру вдаваного хвилювання, то енергія резонансних гармонік збурюючої сили буде невеликою і амплітуди хитавиці помірними. Якщо ж ω_4 або ω_5 близькі до σ_m , то енергія резонансних гармонік і амплітуди відповідних видів хитавиці різко зростають.

Це підтверджується чисельним експериментом, який показує, що на нерегулярному хвилюванні амплітуди бортової або кільової хитавиці істотно збільшуються при рівності ω_4 або ω_5 і частоти вдаваної гармоніки що відповідає максимуму спектра ухилів схвильованої поверхні. Будемо називати таке явище резонансом нерегулярної хитавиці за аналогією з хитавицею на регулярному хвилюванні, де під резонансом розуміється різке збільшення амплітуд за рівності періодів власних коливань і сили, що обурює [156].

Період збурюючої сили (вдаваного періоду хвилі) залежить від швидкості і курсу судна по відношенню до хвилі. Отже, за рахунок цілеспрямованого вибору курсу та швидкості можна ухилитися від резонансу та уникнути небезпечного посилення хитавиці.

Для вирішення задачі про вибір курсів і швидкостей, що забезпечують помірну хитавицю, рядом фахівців пропонувалися діаграми, що називаються діаграмами хитавиці або штормовими діаграмами. Розглянемо одну з них — універсальну штормову діаграму, придатну для будь-якого судна за будь-якої глибини моря.

Вираз для уявного періоду хвилі, можна записати у вигляді

$$\tau = \frac{1,95\lambda}{c + v \cos q}, \quad (1.1)$$

де λ — довжина хвилі, м; c - фазова швидкість хвиль, вуз; v — швидкість судна, вуз; q — курсовий кут хвилі, між напрямом руху судна і вектором — c , протилежним вектору фазової швидкості хвиль. Таким чином, кут q дорівнює

нулю при зустрічному хвилюванні, 90° при розташуванні судна лагом до хвилі і 180° при попутному хвилюванні.

Формула для фазової швидкості хвиль на глибині H має вигляд

$$C = 1,95 \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi H}{\lambda}},$$

де g - прискорення сили тяжіння.

Як впливає з виразу (1.1),

$$v \cos q = -c + \frac{1,95\lambda}{\tau} \quad (1.2)$$

Вводячи позначення $x = v \cos q$; $x_1 = -C$; $x_2 = 1,95 \frac{\lambda}{\tau}$ перепишемо рівність (1.2) у вигляді

$$x = x_1 + x_2. \quad (1.3)$$

Діаграма (Рис. 1.3) дає можливість легко знайти рішення рівняння (1.3) графічним шляхом за будь-яких значень λ , H і τ .

По вертикальній осі діаграми відкладено довжину хвилі λ , а горизонтальною — значення $v \cos q = x$. Діаграма містить ряд кривих x_1 при параметрі H і пучок прямих x_2 при параметрі τ . Для зручності практичного використання діаграми значення x_2 відкладено вліво від її правого краю. Таким чином, прямі x_2 нахилені до негативного напрямку осі абсцис на кут, тангенс якого дорівнює $\tau/1,95$.

Знизу до діаграми прилягає графік для визначення можливих поєднань v та q , відповідальних даному значенню $v \cos q$, чи визначення $v \cos q$ по відомих v і q . Цей графік складається з ряду концентричних півкола і пучка радіальних прямих. Кожне півколо відповідає певному значенню швидкості судна v , кожна пряма - певному курсовому куту q .

Зони курсових кутів, близьких до нуля або 180° , коли амплітуди бортової хитамиці виявляються незначними навіть в умовах резонансу, відзначені на графіку вертикальною штрихуванням. Зона кутів, близьких до 90° , коли судно розташовується майже лагом до хвилі і резонанс бортової

хитавиці стає особливо небезпечним, відзначена горизонтальним штрихуванням. Прийнято вважати, що амплітуди хитавиці істотно зростають при

$$0,7 \leq \frac{T_c}{\tau} \leq 1,3 \quad (1.4)$$

де через T_c позначено період вільних коливань судна. Таким чином, для бортової хитавиці під T_c розуміється T_4 , а для кільової T_5 .

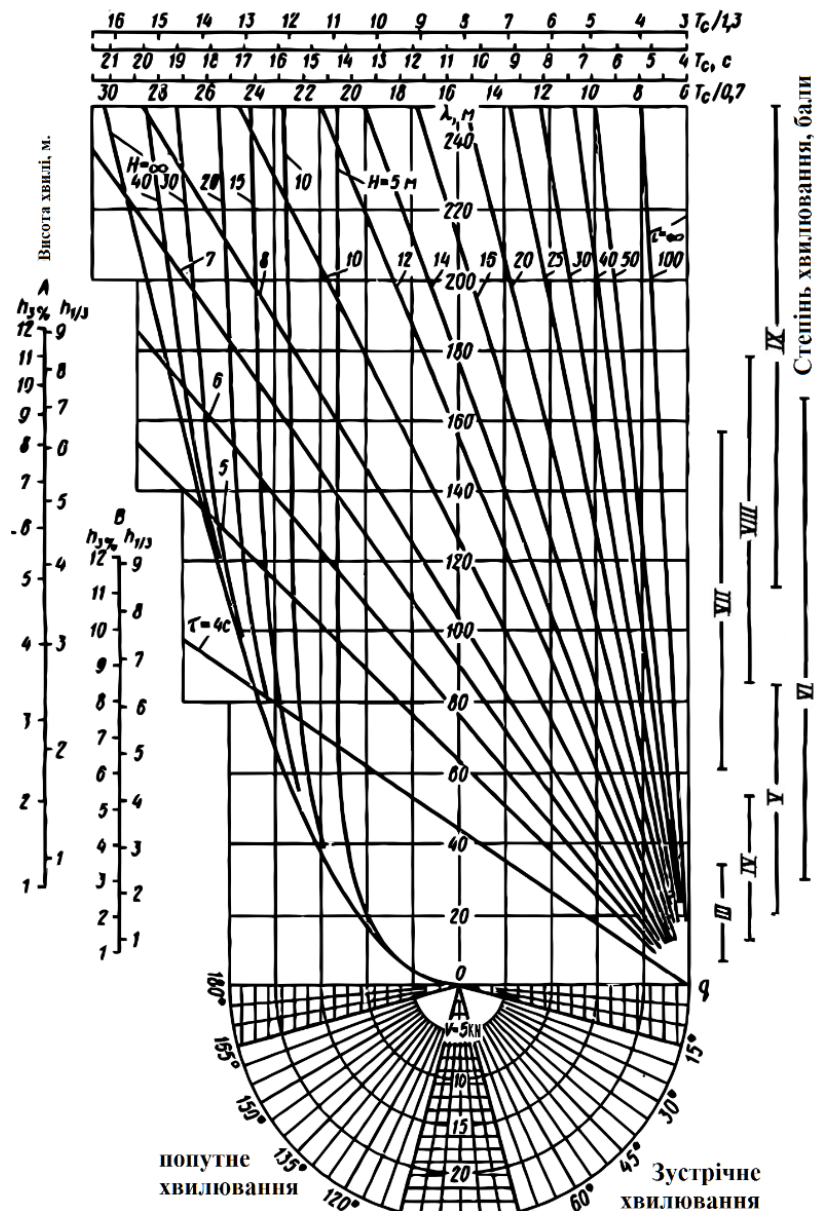


Рис. 1.3 – Універсальна штормова діаграма Ремеза [156]

Зона, в якій виконується нерівність (1.4), називається резонансною, і її кордонам відповідають значення вдаваного періоду хвилі τ , рівні $T_c/1,3$ і

$T_c/0,7$.

Для визначення зазначених значень τ над діаграмою вміщено допоміжну шкалу, на середній лінії якої відкладено величини періоду вільних коливань судна T_c , а над і під ними нанесено відповідно значення $T_c/1,3$ та $T_c/0,7$.

Зліва від діаграми розташовані шкали A і B висот нерегулярних хвиль. На кожній з цих шкал нанесена висота 3%-ого забезпечення $H_{3\%}$ і «значна» висота $h_{1/3}$, яка прийнята в ряді зарубіжних країн в якості характеристики ступеня хвилювання. Під «значною» висотою розуміється середня з 1/3 найбільших хвиль, пов'язана з дисперсією хвильових ординат співвідношенням $h_{1/3} = 4,0\sqrt{D_g}$. За наявними даними, $h_{1/3}$ приблизно дорівнює висоті, що фіксується при візуальних спостереженнях.

При розподілі амплітуд хвиль за законом Релея висота трьохвідсоткової забезпеченості $h_{3\%}$ визначається виразом

$$h_{3\%} = 5,28\sqrt{D_g} \quad (1.5)$$

З (1.5) ми маємо відповідність між шкалами $h_{3\%}$ і $h_{1/3}$, що встановлюється рівністю $h_{3\%} = 1,32h_{1/3}$.

Для приведення у відповідність шкал висот і довжин хвиль використані такі міркування.

Для визначення середнього періоду хвилювання використовується наступна формула:

$$\tau_{cp} = 2\pi B^{-\frac{1}{n}} \sqrt{\frac{\Gamma(\frac{k-1}{n})}{\Gamma(\frac{k-3}{n})}}, \quad (1.6)$$

де $\Gamma(x)$ – гамма-функція, $\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt$, при $(x > 0)$;

B – параметр, що залежить від умов хвилеутворення або статистичних характеристик хвиль;

k і n — цілі числа коефіцієнти, запропоновані рядом вчених ($k \geq 5$, $n \geq 2$) [156, 157, 145].

Далі, представивши спектр уклонів схвильованої поверхні у вигляді $S_a(\sigma_0) = Ag^{-2}\sigma_0^{-k+4}e^{-B\sigma_0^{-n}}$ можна переконатися, що максимуму цього спектра відповідає період

$$\tau_m = 2\pi B^{-\frac{1}{n}} \sqrt[n]{\frac{k-4}{n}}. \quad (1.7)$$

Беручи до уваги (1.6) та (1.7), між періодами τ_m і τ_{cp} існує співвідношення

$$\tau_m = \tau_{cp} \sqrt[n]{\frac{k-4}{n}} \sqrt{\frac{\Gamma(\frac{k-3}{n})}{\Gamma(\frac{k-1}{n})}} \quad (1.8)$$

Якщо, відповідно до А. І. Вознесенського та Ю. А. Нецветаєва, в (1.8) прийняти $k = 6$, $n = 4$, то відношення τ_m/τ_{cp} виявиться рівним 0,98. Приймавши $k = 5$, $n = 4$ (Другий міжнародний конгрес за конструкцією та міцністю суден: Пірсон і Московіць та інші автори), отримаємо $\tau_m/\tau_{cp} = 0,94$. Відповідно Ю. М. Крилову ($k = 7$, $n = 4$), матимемо $\tau_m/\tau_{cp} = 0,99$. Таким чином, відношення періоду, що відповідає максимуму кривої спектральної щільності ухилів схвильованої поверхні, до середнього істинного періоду хвилювання настільки близько до одиниці, що з практичної точки зору ці періоди можна вважати рівними. Що стосується відношення відповідних вдаваних періодів, то воно може відрізнятись від одиниці і на більшу і на меншу величину. Але з точністю, що задовольняє практиці мореплавання, їх також можна вважати рівними. Це дає можливість, входячи в діаграму по середньому вдавальному періоду, тобто використовуючи шкалу довжин хвиль, з успіхом визначати поєднання курсів і швидкостей, що відповідають резонансним режимам бортової або кільової хитамиці на реальному морському хвилюванні, що завжди має нерегулярний характер.

Для визначення залежності найбільших τ_{cp1} і найменших τ_{cp2} значень середнього періоду хвилювання від висоти хвиль 3%-вої забезпеченості використовуємо дані Н. Н. Рахманіна, отримані за допомогою обробки результатів вимірів, проведених на різних морях і океанах. Найбільше τ_{m1} і

найменше τ_{m2} значення періоду, що відповідає максимуму спектра ухилів схвильованої поверхні, виходячи з наведених вище міркувань, вважається рівними відповідно τ_{cp1} і τ_{cp2} .

При необмеженій глибині моря довжина хвилі λ та її справжній період τ_0 пов'язані залежністю

$$\lambda = \frac{g}{2\pi} \tau_0^2 = 1,56 \tau_0^2 \quad (1.9)$$

Таким чином, довжини хвиль, що мають періоди τ_{m1} і τ_{m2} , будуть $\lambda_1 = 1,56 \tau_{m1}^2$; $\lambda_2 = 1,56 \tau_{m2}^2$.

Оскільки на діаграмі є не дві, а одна шкала довжин хвиль, їй приведені у відповідність дві шкали висот.

В умовах нерегулярного хвилювання формула, що зв'язує середню довжину та середній період хвилі, має вигляд, аналогічний (1.9). Проте коефіцієнт у ній може дещо відрізнятиметься від 1,56, залежно від ступеня розвиненості хвилювання. Для того, щоб ця обставина не вносила помітних спотворень у вихідну інформацію діаграми, в резонансну зону, що визначається рівнянням (1.4), включено досить великий діапазон значень періодів.

Праворуч від діаграми вміщена шкала ступеня хвилювання, побудована на основі шкал висоти хвиль 3%-вої забезпеченості відповідно співвідношенням, встановленим шкалою Головного управління гідрометслужби 1953 р.

Шкали висот хвиль і ступеня хвилювання доцільно використовувати для планування переходу через штормову зону з урахуванням хвильових прогнозів [16, 88]. В умовах вже сформованого шторму варто користуватися шкалою довжин хвиль, зважаючи, що довжина легко визначається за допомогою самої діаграми.

Для цієї мети необхідно знати глибину моря, швидкість судна, курсовий кут і вдаваний період хвилі. Значення останнього може бути визначено як час проходження однієї хвилі через корпус судна. Практично для знаходження

вдаваного періоду, слід визначити час проходження через корпус судна серії з 10-20 хвиль і обчислити фактичне значення τ як середнє арифметичне. Позначимо знайдене таким чином значення τ через τ_{ϕ} .

Далі на нижньому графіку знаходиться точка, що відповідає даним значенням швидкості судна та курсового кута хвилі. Потім ця точка переноситься по вертикалі на вісь абсцис діаграми через отриману точку осі абсцис проводиться пряма, паралельна лінії $\tau = \tau_{\phi}$. Ордината точки перетину цієї прямої з кривою x_1 відповідає даному значенню глибини моря H , і визначить собою шукану довжину хвилі λ . Так, наприклад, якщо $H = 20$ м, $v = 10$ вуз, $q = 60^\circ$, $\tau_{\phi} = 8$ с, зробивши вказану побудову, знайдемо, що $\lambda = 117$ м.

На зустрічному хвилюванні з допомогою такої побудови довжина хвилі визначається однозначно. На попутному хвилюванні у разі, коли хвилі обганяють судно, відшукування довжини хвилі дещо ускладнюється тим, що похила пряма, що відповідає знайденим значенням $v \cos q$ і τ_{ϕ} , може перетинати криву x_1 , відповідну цій глибині H , у двох точках. Це означає, що в даному випадку певному поєднанню величин $v \cos q$, τ і H можуть відповідати два різних значення λ .

Якщо ці значення істотно відрізняються один від одного, то вибір з них істинного може бути зроблений окомірним способом, а у разі малої відмінності часто можна з достатньою точністю для практики зупинитися на будь-якому зі знайдених значень. Крім того, можна ще раз визначити за діаграмою довжину хвилі за змінених v або q . Значення λ , що збіглися в результаті обох вимірів, будуть істинними.

Існує ряд факторів, які перешкоджають ефективному використанню штормових діаграм. По-перше, параметри морського хвилювання вимірюються доступними засобами (за допомогою пеленгатора або радара), без використання спеціального обладнання, яке вже на цьому етапі вносить значні похибки в розрахунки. По-друге, вимірювана інформація обробляється

вручну, за допомогою графічних діаграм, що ще більше збільшує похибки. Потретьє, розрахунки вимагають часу, якого може просто не бути в критичних ситуаціях, і розрахунки не можуть виконуватися безперервно, щоб відстежувати зміни умов руху та хвилювання моря. Не можна також не враховувати людський фактор [26, 27, 74, 84]. Все це призводить до того, що на практиці управління судном у шторм зазвичай здійснюється інтуїтивно, без використання штормових схем і будь-яких розрахунків. Використання автоматичних і оптимальних методів моніторингу, планування маршруту і управління зустрічається в багатьох технічних системах, наприклад [18, 56, 46, 13], в тому числі в системах управління судном [98,75,102], особливо в складних умовах плавання [31, 33, 63, 32, 112, 108, 12, 69]. Застосування систем автоматичного керування судном дозволяє значно зменшити вплив людського фактору та підвищити безпеку судноплавства [84, 18, 56, 46, 13, 98, 75, 102], особливо в складних умовах плавання [31, 33, 63, 32, 112, 108, 12, 69].

1.3. Заспокоювачі хитавиці

Крім цілеспрямованого вибору курсу і швидкості на хвилюванні стабілізація судна може здійснюватися за допомогою спеціальних пристроїв, що називаються заспокоювачами хитавиці [76]. Стабілізуючий ефект при цьому досягається за рахунок створення моменту, протилежного по фазі збурюючому моменту. Якщо при такому поєднанні фаз стабілізуючий і збурюючий моменти виявляться рівними за величиною, судно взагалі гойдатися не буде. Зауважимо відразу, що повна ліквідація хитавиці на нерегулярному хвилюванні практично неможлива. Тому метою стабілізації є зменшення амплітуд до меж, що забезпечують задовільне функціонування судна та можливість виконувати відповідні його призначення [96, 54, 125]. У практиці застосовують заспокоювачі лише для бортової хитавиці. Створити ефективні заспокоювачі кильової хитавиці поки не вдалося.

З численних видів заспокоювачів, що пропонувалися різними авторами, життєздатними і застосовуваними нині виявилось лише розміщення кіля на

нижніх частинах бортах судна, бортові керовані керма та рідинні цистерни. Якщо класифікувати ці заспокоювачі за природою сил, що створюють стабілізуючий момент, то виличні кілі та бортові керма слід віднести до гідродинамічних заспокоювачів, а рідинні цистерни – до гравітаційних. В меншій мірі для заспокоєння хитавиці застосовують гіроскопи.

Всі заспокоювачі хитавиці можна розділити на два типи: пасивні, не мають спеціальних джерел енергії та системи управління. Такі системи використовують рух безпосередньо, щоб створити демпфування або ефект антирезонансу; активні, в яких момент, що перешкоджає крену, створюється спеціальними енергетичними установками з автоматичним управлінням.

Існує два принципи стабілізації бортової хитавиці. Згідно з першим із них заспокоєння здійснюється таким чином, щоб палуба весь час залишалася майже горизонтальною (стабілізація щодо горизонту). Стабілізація щодо горизонту важливіша для військових кораблів при стрільбі в штормових умовах. Згідно з другим принципом, палуба повинна бути паралельна до хвильового профілю. Цей принцип називається стабілізацією щодо динамічної вертикалі (Динамічною вертикаллю називається нормаль до хвильового профілю) і є кращим з погляду поліпшення функціонування судна. Остання обставина пояснюється тим, що діюча на судно, так звана вдавана сила тяжіння, що являє собою геометричну суму ваги і сили інерції, спрямована паралельно динамічної вертикалі. Таким чином, при використанні другого принципу стабілізації екіпажу легше залишатися на своїх місцях, люди не випадають із ліжок, зменшується небезпека зміщення вантажів тощо.

Розглянемо бортову хитавицю при так званій параметричній стабілізації щодо горизонту. І тут стабілізуючий момент визначається залежністю

$$M_{CT} = (A\theta + B\dot{\theta} + C\ddot{\theta}), \quad (1.10)$$

Де А, В, С – коефіцієнти рівняння, $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ – кут нахилу стабілізованого судна, кутова швидкість і прискорення (параметри системи). Активний заспокоювач, керований за таким законом, називається ідеальним.

Стабілізуючий момент, створюваний реальним заспокоювачем, не буде точно підкорюватися залежності (1.10) із-за недосконалості системи керування, різного роду обмежень та інших причин подібного характеру.

Для судна з включеним ідеальним успокоювачем, що рухається косим курсом по відношенню до хвилі, «скорочене» рівняння бортової хитавиці можна записати у вигляді

$$(I_x + M_{44})\ddot{\theta} + \Lambda_{44}\dot{\theta} + mgh\theta = -ia_0x_4mgh e^{i\sigma} - \left(A\theta + B\dot{\theta} + C\ddot{\theta} \right) \quad (1.11)$$

або

$$\ddot{\theta} + 2\nu\dot{\theta} + \omega^2\theta = -ia_0x_4\omega_*^2 e^{i\sigma}, \quad (1.12)$$

де

$$\begin{cases} \nu = \frac{A_{44} + B}{2(I_x + M_{44} + C)} \\ \omega = \sqrt{\frac{mgh + A}{I_x + M_{44} + C}} \\ \omega_* = \sqrt{\frac{mgh}{I_x + M_{44} + C}} \end{cases} \quad (1.13)$$

з отриманих рівнянь (1.11), (1.12), (1.13) видно, що керування успокоювачем по куту нахилу ($M_{CT} = -A\theta$) рівномірно змінює коефіцієнт поперечної остійності і призводить до переміщення резонансу в області більш високих частот при $A > 0$ і більш низьких при, $A < 0$. При стабілізуючому моменті, пропорційному кутовому прискоренню ($M_{CT} = -C\ddot{\theta}$), також відбувається зміна резонансної частоти в сторону зменшення при $C > 0$ і в сторону збільшення при $C < 0$. Величина резонансної амплітуди при регулюванні по куту нахилу або по кутовому прискоренню майже не змінюється, у зв'язку з чим, керування заспокоювачем тільки за цими параметрами, не проводиться. Частіше всього керування ведеться за кутовою швидкістю ($M_{CT} = -B\dot{\theta}, B > 0$), що

рівномірно збільшує коефіцієнт демпфування. Такий закон керування призводить до істотного зменшення резонансної амплітуди і тому є основним. Крім того, керування може вестись за двочленними залежностями

$M_{CT} = -(A\theta + B\dot{\theta}) \rightarrow M_{CT} = -(B\dot{\theta} + C\ddot{\theta})$, або за трьохчленною залежністю (1.10). Якщо використовується трьохчленна залежність (1.10) і при цьому $\frac{A}{mgk} = \frac{B}{\Lambda_{44}} = \frac{C}{I_x + M_{44}} = F$, то дифференціальне рівняння (1.11) приймає вигляд

$$(I_x + M_{44})\ddot{\theta} + \Lambda_{44}\dot{\theta} + mgh\theta = -i \frac{a_0}{1+F} x_4 mghe^{i\sigma t} \quad (1.14)$$

Таке керування (1.14) заспокоювачем, називається регулюванням за моментом, рівносильне зменшенню нахилу зхвильованої поверхні або, що й те ж саме, зменшення збуреного моменту. В умовах регулярного хвилювання воно є оптимальним, так як призводить до зменшення амплітуди хитавиці при всіх частотах.

Найважливішими критеріями ефективності заспокоювача є його статична характеристика і кратність стримування хитавиці n_c , відношенням амплітуди хитавиці без заспокоювачів до амплітуди хитавиці при працюючих заспокоювачах ($n_c = \phi / \phi_c$).

При хитавиці на нерегулярному хвилюванні кратність визначається відношенням відповідних стандартів кутів крену. Застосовується також поняття коефіцієнта гасіння хитавиці $k = \frac{a_0 - a_c}{a_0}$, де a_0 і a_c - коефіцієнти динамічності при хитавиці судна без заспокоювачів і з ними.

Коефіцієнти демпфування хитавиці судна з працюючими заспокоювачами b_c і без них b_0 можна визначити дослідним шляхом, вимірюючи амплітуди кута крену при згасаючих вільних коливаннях (Рис. 1.4) (а - без заспокоювачів, б - з діючими заспокоювачами хитавиці) та підставивши в формули (1.15).

$$\begin{cases} b_c = \frac{1}{\pi} \ln \frac{\phi'_i}{\phi'_{i+1}} \\ b_0 = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{\phi_i + \phi_{i+1}}{\phi_{i+2} + \phi_{i+3}} \end{cases}, \quad (1.15)$$

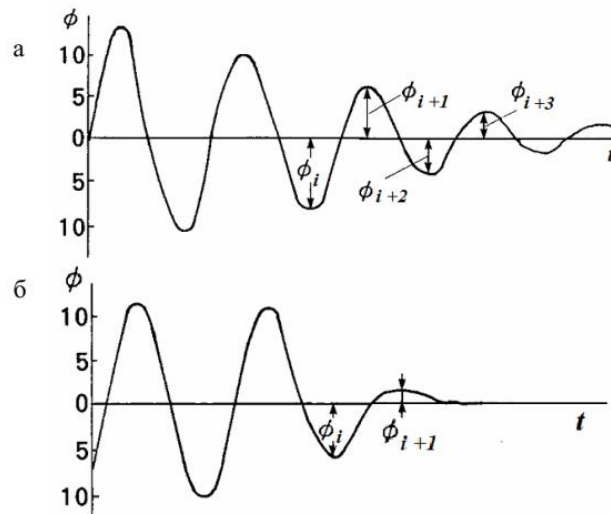


Рис. 1.4 – Визначення коефіцієнтів демпфування хитавиці

Розрізняють номінальну та використовувану статичні характеристики заспокоювача. Під номінальною статичною характеристикою φ_s розуміють кут крену, який отримає судно, що плаває на тихій воді, при статичному додаванні до нього максимального моменту, що розвивається заспокоювачем.

$$\varphi_s = \frac{M_{\max}}{mgh}, \quad (1.16)$$

де, M_{\max} — максимальний стабілізаційний момент. Статичною характеристикою, що використовується, φ_s^* називається відношення амплітуди M_a стабілізуючого моменту, що розвивається заспокоювачем при хитанні на хвилюванні, до коефіцієнта поперечної остійності судна mgh .

При конструюванні заспокоювача прагнуть підвищити характеристику, що використовується, до рівня номінальної, проте домогтися цього не вдається і практично завжди $\varphi_s^* < \varphi_s$. Тільки в ідеальному випадку має місце рівність цих характеристик. Таким чином, застосувавши (1.16) можемо написати

$$M_a = mgh\varphi_s^* \leq mgh\varphi_s. \quad (1.17)$$

Кратністю стримування хитами на регулярному хвилюванні називається відношення резонансних амплітуд хитами нестабілізованого та стабілізованого судна. На нерегулярному хвилюванні під кратністю стримування розуміється корінь квадратний із відношення дисперсій кутів нахилу нестабілізованого і стабілізованого судна. Найбільші значення кратності помірності, досяжні на практиці, не перебільшують 3-4.

В умовах нерегулярного хвилювання стабілізуючий момент, залежить від випадкових функцій часу $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$, також буде випадковою функцією часу (випадковим процесом). Відповідно до (1.10) його дисперсія визначається виразом

$$D_M = A^2 D_{\theta} + B^2 D_{\dot{\theta}} + C^2 D_{\ddot{\theta}} + 2ABK_{\theta\dot{\theta}} + 2ACK_{\theta\ddot{\theta}} + 2BCK_{\dot{\theta}\ddot{\theta}} \quad (1.18)$$

де $D_{\theta}, D_{\dot{\theta}}$ і $D_{\ddot{\theta}}$ - дисперсії кутів нахилу, кутових швидкостей та прискорень, $K_{\theta\dot{\theta}}, K_{\theta\ddot{\theta}}$ і $K_{\dot{\theta}\ddot{\theta}}$ - взаємні кореляційні функції.

В теорії нормальних стаціонарних випадкових процесів доводиться, що дві послідовні похідні одного й того процесу утворюють незалежні випадкові процеси. Таким чином, взаємні кореляційні функції між процесами θ та $\dot{\theta}$, а також між $\dot{\theta}$ і $\ddot{\theta}$ дорівнюють нулю. Взаємна кореляційна функція між θ і $\ddot{\theta}$ дорівнюватиме за величиною і протилежна за знаком дисперсії $\dot{\theta}$. Тоді формула (1.18) набуде вигляд

$$D_M = A^2 D_{\theta} + (B^2 - 2AC) D_{\dot{\theta}} + C^2 D_{\ddot{\theta}} \quad (1.19)$$

При розподілі за законом Релея амплітуда 3%-вої забезпеченості стабілізуючого моменту визначатиметься формулою

$$M_{3\%} = 2,64 \sqrt{D_M} \quad (1.20)$$

Приймаючи забезпеченість (1.20) за розрахункову та маючи на увазі співвідношення (1.17) та (1.19), побачимо, що коефіцієнти керування A, B, C повинні задовольняти умови (1.21):

$$2,64 \sqrt{A^2 D_{\theta} + (B^2 - 2AC) D_{\dot{\theta}} + C^2 D_{\ddot{\theta}}} \leq mgh\varphi_s \quad (1.21)$$

Оскільки дисперсії та коефіцієнти керування залежать один від одного, розрахунок хитавиці стабілізованого судна на нерегулярному хвилюванні виконують методом послідовних наближень.

Гідродинамічні Заспокоювачі. Найпростішим пасивним гідродинамічним заспокоювачем хитавиці є виличні кілі - пластини, що встановлюються на нижніх частинах борту судна нормально до його зовнішньої обшивки [34, 35, 36, 57]. Сумарна площа кілів становить 3-5% від площі ватерлінії, а висоту вибирають так, щоб вони не виходили за габарити перетину міделя. В іншому випадку кілі пошкоджуватимуться при швартуванні та посадці на мілину. Міцність їх з'єднання з корпусом розраховують так, щоб у разі удару об ґрунт або причальну стінку кіль відламувався без пошкодження зовнішньої обшивки.

При відносно малій висоті кіль зазвичай є просто листом, привареним до зовнішньої обшивки судна, при висоті 500-600 мм для підвищення жорсткості вздовж вільної кромки листа приварюють прокатні профілі різної форми, при великій висоті кіль підкріплюють бракетами.

З метою зменшення негативного впливу кілів на ходові характеристики судна встановлюють їх уздовж ліній потоку. У цьому випадку під час руху без диферента на тихій воді опір кілів складатиметься тільки з тертя; додаткового опору форми та хвильового опору виникати не буде. Проте навіть за такої установки кілів швидкість на тихій воді зменшуватиметься на 2—3 % від швидкості повного ходу. Враховуючи, що за наявності диферента напрямки ліній потоку змінюється, особливо поблизу країв судна, виличні кілі встановлюють лише в середній частині протягом 30—40 % довжини. Установка в середній частині найбільш доцільна і з погляду ефективності стабілізації, оскільки у цьому випадку кілі виявляються на максимально можливій відстані один від іншого, що збільшує стабілізуючий момент і зменшує їх взаємне екранування.

Стабілізуюча дія кілей обумовлена збільшенням демпфування бортової хитавиці за рахунок відривного обтікання у поперечній площині. У зв'язку з

цим застосування кілів призводить до суттєвого зменшення амплітуди в області резонансу, і вони бувають дуже ефективними як на ходу судна, так і в умовах стоянки. На ходу вони мають додаткову стабілізуючу дію, працюючи як крила гранично малого подовження. Однак додатковий момент, що виникає при цьому, дуже малий

В якості активних гідродинамічних заспокоювачів широко застосовують обертальні крила, бортове кероване кермо (Рис. 1.5). Їх встановлюють на вилицях або трохи вище вилиць, зазвичай недалеко від міделя, і перекладають за допомогою спеціальної системи автоматичного керування. На тихій воді, щоб уникнути підвищення опору, активні керма, або втягують всередину корпусу, або завалюють у спеціальні ніші.

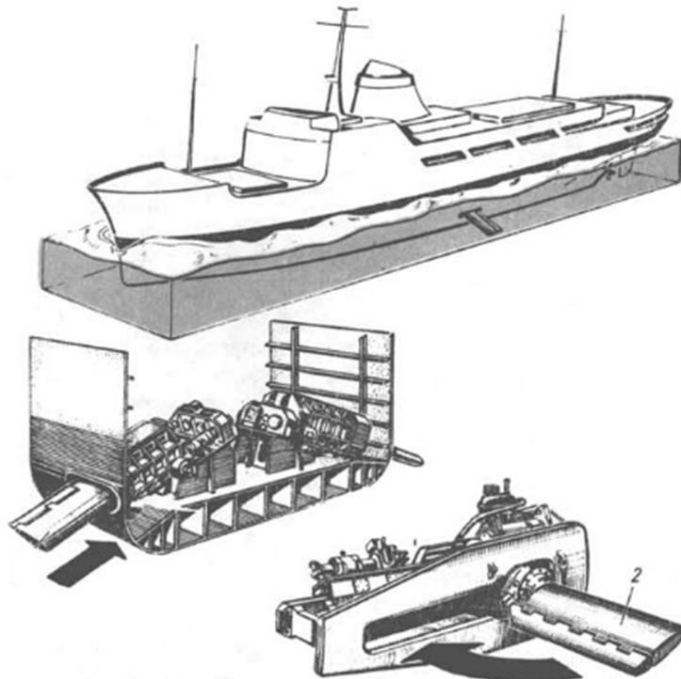


Рис. 1.5 – Активні бортові керма

Так само рулі прибирають при швартовці, що оберігає їх від пошкодження.

Якщо на виличних кілях, що є крила гранично малого подовження, стабілізуючий момент практично повністю створюється за рахунок збільшення демпфування, то момент, створюваний бортовими кермами, має іншу природу. На кермах правого і лівого бортів, які є крильми не гранично

малого, а малого подовження, при достатній швидкості виникають значні підйомні сили різних знаків, що утворюють стабілізуючий момент. Таким чином, на кермі борту, що опускається, підйомна сила буде спрямована вгору, а на кермі борту що піднімається - вниз, і момент, створюваний цими силами, протидіятиме нахилу.

Гідродинамічний розрахунок керма повинен будуватися на основі теорії тонкого крила малого подовження в нестационарному потоці. Однак, численні дослідження показують, що для визначення бокової сили керма може бути використана гіпотеза стаціонарності.

У рамках цієї гіпотези коефіцієнт бокової сили керма, при докритичних кутах атаки, можна визначити за формулою Г. Ф. Бураго з поправкою К. К. Федяєвського. Ця формула має вигляд

$$C_y = 4,75\alpha_0 \frac{2,75\lambda + 2\alpha_0}{2,75\lambda + 5,6} \cos \alpha_0 \quad (1.22)$$

де λ — геометричне подовження, яке для прямокутного в плані стерна дорівнює відношенню довжини стерна до хорди. При розташуванні стерна поблизу корпусу, якщо зазор не перевищує 1/4 довжини стерна, замість геометричного подовження в розрахунок слід приймати ефективне подовження, яке більше геометричного і, за відсутності зазору між крилом і корпусом, перевищує його в два рази. Під α_0 в останній формулі розуміється сумарний кут атаки, приблизно рівний (1.23)

$$\alpha_0 = \alpha - \frac{l\dot{\theta}}{2v}, \quad (1.23)$$

де α - Кут перекладки; l - відстань середини розмаху керма від осі нахилу судна; v - швидкість судна; $\dot{\theta}$ - кутова швидкість бортової хитавиці.

Бокова сила керма Y може бути визначена за формулою (1.24):

$$Y = C_y \frac{\rho v^2}{2} S_r, \quad (1.24)$$

де C_y - коефіцієнт бокової сили стерна (1.22), ρ – густина води, S_r - площа стерна. Знаючи бокову силу стерна, можна визначити стабілізаційний момент,

створюваний стерном.

Площу стерна вибирають виходячи з мінімальної швидкості судна, при якій необхідно отримати стабілізуючий момент певної величини. Подовження стерна визначається умовою міцності балерів та необхідністю втягування стерна вередину корпусу. Для стерен, що втягуються, подовження зазвичай становить 1,5-2,0., а для стерен, що завалюються 2,0-2,5. Критичний кут атаки стерен, що втягуються, не перевищує 25° . На практиці, щоб уникнути кавітації, максимальний кут перекладки обмежують величиною 20 - 22° . Для стерен, що завалюються, ці кути ще менше.

Зважаючи на те, що керма повинні однаково ефективно працювати при нахилі на будь-який борт, для них вибирають симетричні профілі. Однак такі профілі створюють значно меншу підйомну силу, ніж вигнуті. Для того щоб, зберігаючи симетричну форму профілю, збільшити його підйомну силу, керма часто роблять розрізними, що складаються з основної частини і закрилка. Основна частина і закрилок повертаються в ту саму сторону, причому закрилок повертається на великий кут, що і призводить до збільшення підйомної сили.

Експерименти показують, що за середнього ступеня хвилювання за допомогою бортових керованих кермів можна майже повністю стабілізувати судно. На сильному нерегулярному хвилюванні бортові керма забезпечують приблизно триразове стримування хитаючи.

Гравітаційні заспокоювачі. У гравітаційних заспокоювачах стабілізуючий ефект створюється з допомогою переміщення вантажів. Спроби використовувати з цією метою тверді вантажі виявилися неефективними; придатними для практичного використання виявилися гравітаційні заспокоювачі рідинного типу. Вони представляють собою гідравлічний маятник, що складається із з'єднаних між собою цистерн, які розташовані біля бортів судна.

Розрізняють цистерни першого та другого типу (Рис. 1.6). Цистерни першого типу (закриті) з'єднуються знизу рідинним, а згори повітряним

каналами [64,131,7,8,115].

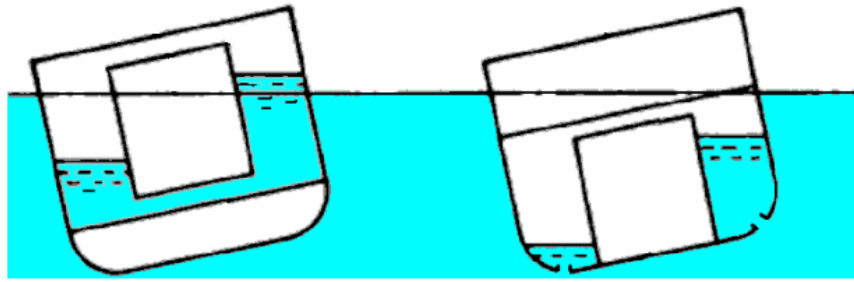


Рис. 1.6 – Заспокоювальні цистерни закритого типу [4].

У цистерн другого типу (відкритих) також є повітряний канал, а замість водяного каналу роблять отвори в бортах і рідинне сполучення здійснюється через забортну воду. Таким чином, цистерни першого роду, можуть бути використані як паливні, а для цистерн другого роду така можливість відсутня.

Стабілізуюча дія пасивних цистерн ґрунтується на принципі вторинного резонансу. Суть цього принципу полягає в тому, що при резонансі вимушені коливання судна відстають по фазі від збурюючої сили на 90° . Якщо період власних коливань рідини в цистернах дорівнює періоду власних коливань судна, то тут також має місце резонанс (вторинний) і коливання рідини, в свою чергу, відстають на 90° від коливань судна. Таким чином, у цьому випадку зсув фаз між коливаннями рідини в цистернах і збурюючою дією хвилі становить 180° , в результаті чого і створюється стабілізуючий момент.

В даний час пасивні цистерни застосовують рідко через низьку ефективність на нерегулярному хвилюванні, збільшення амплітуд гойдання в нерезонансних умовах, зниження вантажопідйомності та вантажомісткості та інших недоліків. Крім того, відкриті цистерни помітно знижують швидкість судна, так як частина потужності силової установки витрачається на надання воді кінетичної енергії, що втікає, яка при витіканні безповоротно втрачається.

Зниження амплітуд хитамиці відбувається не в усьому діапазоні частот. Це означає, що при хитамиці на довгих хвилях рідкий вантаж в цистерні створює додатковий момент, що накренає, і збільшує розмахи хитамиці. Таким чином, поза зоною резонансу пасивні цистерни можуть не стабілізувати, а

розгойдати судно. Період власних коливань в цистернах складно змінювати в широкому діапазоні, тому вони не застосовуються на вантажних суднах, що мають великі зміни власних періодів при різних випадках навантаження.

Цього недоліку позбавлені цистерни типу «Флюм» (Рис. 1.7). Ця система складається із двох бортових цистерн, з'єднаних каналом, висота якого однакова з висотою цистерн, завдяки чому в каналі теж є вільна поверхня. Зміна рівня води змінює площу живого перетину каналу, завдяки чому помітно змінюється період власних коливань рідини в цистерні. Таку цистерну легко налаштовувати під час власних коливань судна.

Систему проектують таким чином, щоб період вільних коливань стабілізуючої рідини дорівнював періоду вільних коливань судна при деякому характерному для умов експлуатації стані навантаження. Зміна рівня наливу рідини на періоді її вільних коливань відбивається слабо. Таким чином, цистерни типу «Флюм» поєднують у собі властивості плоских цистерн, що зменшує остійність, і пасивних цистерн закритого типу, стабілізуючий ефект яких заснований на принципі вторинного резонансу. Потік рідини у цих цистернах щонайменше двічі різко змінює площу свого перерізу, відчуваючи раптове звуження та розширення.

При цьому, як відомо з гідравліки, потік втрачає частину своєї кінетичної енергії, тобто існує демпфування коливань стабілізуючої рідини. Це, з одного боку, послаблює небажані удари рідини в кришки цистерн, а з іншого, зменшує їхню дію при нерезонансних режимах.

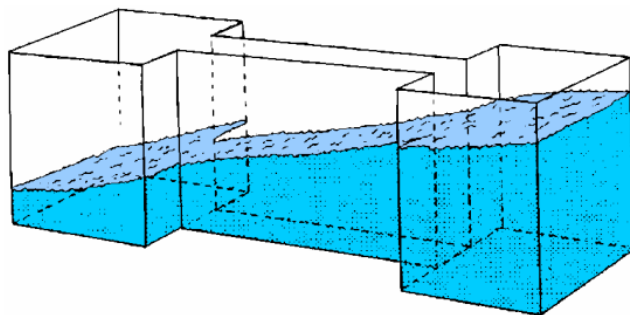


Рис. 1.7 – «Флюм» — система.

Ефективні також пасивні плоскі заспокійливі цистерни, ширина яких

набагато більше глибини. Завдяки великій площі вільної поверхні рідини в такій цистерні, знижується метацентрична висота судна. Це призводить до збільшення періоду власних коливань судна і область резонансу зсувається в область хвиль з великим періодом, які в морі зустрічаються рідше.

Активні цистерни, зі встановленими компресором та насосом, виявляються значно ефективнішими за пасивні. Вони створюють стабілізуючий момент як при резонансі, а й за будь-якому співвідношенні частот, що відіграє істотну роль в умовах нерегулярного хвилювання. Їх можна використовувати для стабілізації судна, що має статичний крен, для розгойдування на тихій воді і т. д. Однак внаслідок своєї складності, великої вартості, необхідності витрачати потужність, щоб привести в рух стабілізуючу рідину, високих вимог до системи автоматичного керування, активні цистерни на судах не встановлюють.

Активні цистерни бувають різного типу. Вони також складаються з двох цистерн по бортах судна, рівень води і відновлюючий момент в яких регулюється за допомогою насосів (Рис. 1.8. а). Управління роботою насосів виконується автоматично відповідно до показань системи датчиків, що знімають тиски і кінематичні параметри хитами.

У цистернах другого типу (б) рівень води регулюється опосередковано, - за допомогою зміни тиску повітря. При такій схемі потрібні менші витрати потужності, ніж при схемі (а). У схемі (в) кожна цистерна має окремий насос.

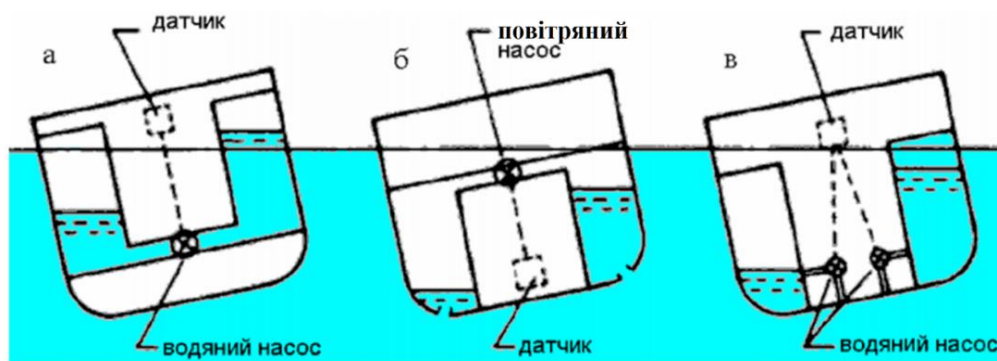


Рис. 1.8 – Активні цистерни першого і другого типу

Слід зазначити, що характер хитавиці на штормовому хвилюванні істотно нелінійний, тому для оцінки ступеня ефективності заспокійливих цистерн недостатньо АЧХ, побудованих на основі лінійних моделей або модельних експериментів на пологих хвилях.

Гіроскопічні заспокоювачі. Гіроскопічні заспокоювачі хитавиці, застосування яких у 20-30-ті роки. мало масовий характер, останнім часом використовуються рідко. Разом з тим гіроскопи широко застосовують для місцевої стабілізації різних приладів, пристроїв і т.п [80].

Як заспокоювач хитавиці використовують гіроскоп з ротором, що обертається навколо вертикальної осі. Цапфи зміцнюють у рамі, розташованій у площині шпангоуту (Рис. 1.9). Ця рама може коливатися в цапфах навколо поперечної осі. Такий рух рами, називається прецесією, виникає у разі, коли зовнішні сили нахиляють раму навколо поздовжньої осі, як і має місце при бортовій хитавиці.

Зрозуміло, що вертикальна і поперечна осі, маються на увазі матеріальні, а під поздовжньою віссю розуміється просто певний напрямок у просторі.

Прецесія викликає гіроскопічний момент, що діє у площині, що проходить через вісь прецесії та вісь обертання ротора, тобто у площині, дуже близької до площини шпангоуту. Цей гіроскопічний момент, пропорційний кутовій швидкості прецесії, протидіє збурювальному моменту, що нахиляє судно. У цьому полягає механізм виникнення стабілізуючого ефекту.

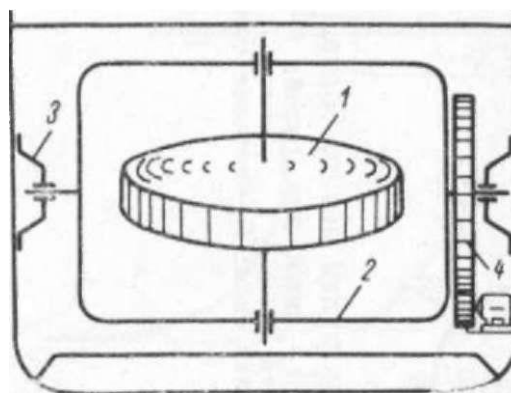


Рис. 1.9 – Схема гіроскопічного заспокоювача [77].

Гіроскопічні заспокоювачі, так само як гідродинамічні та гравітаційні, можуть бути пасивними та активними. У пасивних заспокоювачів прецесія виникає лише як реакція на бортову хитавицю, а в активних створюється примусово спеціальним двигуном, що регулюється за допомогою системи автоматичного керування. Істотна перевага активного гіроскопа полягає у можливості створення стабілізуючого ефекту при будь-якому співвідношенні між періодом збурюючої сили (вдаваним періодом хвилі) і періодом власних коливань судна [77, 19, 117].

На косому хвилюванні бортова хитавиця завжди супроводжуватиметься іншими видами коливань, зокрема кильовою хитавицею і рисканням. По відношенню до гіроскопічного заспокоювача бортової хитавиці кильова повинна розглядатися як додаткова прецесія, а рискання - як зміна кутової швидкості обертання ротора. Це може призвести до втрати остійності системи «судно – заспокоювач». Щоб уникнути цієї небезпеки, пропонувалися спарені гіростабілізатори з протилежними напрямками обертання роторів. Однак через їхню складність такі заспокоювачі використовувалися лише в поодиноких випадках. Висока вартість, велика маса та габарити, складність систем керування та інші причини призвели до майже повної відмови від застосування гіроскопів для загальної стабілізації судна.

При бортовій хитавиці судна рама гіроскопа мимовільно розгойдується в ДП. Якщо ці коливання рами гальмувати або примусово повертати раму за допомогою спеціального електродвигуна, то вона буде надавати на цапфи додатковий тиск, утворюючи пару, яка протидіє хитавиці судна. Наприклад, такий заспокоювач (з маховиком вагою 20 т) встановлено на американському підводному човні «Джордж Вашингтон».

Заспокоювання бортової хитавиці крильчастими рушіями. Встановлений на судні крильчастий рушій весь час обертається в один і той же бік, а судно переміщується в різні боки.

Використовуючи цю властивість рушія, на судах можна встановлювати більш прості двигуни – нереверсивні, тобто ті, що не змінюють напрямку

обертання. Такі двигуни легше за вагою порівняно з реверсивними, простіше за складом та доглядом та значно дешевше реверсивних.

Однак крильчасті рушії мають і недоліки, основним з яких є складність передачі обертання від двигуна до рушія, завдяки чому двигуни більших потужностей (більше 5000к.с.) з крильчастими рушіями використовувати не можна, а це обмежує розміри суден, на яких можна використовувати ці рушії.

Тим не менш основні властивості суден з крильчастими рушіями – можливість мати боковий хід, розвертатися на місці, швидко міняти напрямок руху – роблять такі судна незамінними при плаванні у вузькостях: каналах, річках, портах. Крильчасті рушії з успіхом використовуються на річкових пасажирських суднах, на портових кранах та буксирах, на суднах-постачальниках шельфового флоту і т.і.

Характеристики КР дозволяють швидко та безступенево контролювати упор за величиною та напрямком, що може призвести до подальшої функціональності окрім рушійної сили та стернування. З невеликим обсягом додаткового електронного устаткування КР може бути додатково використаний для активної стабілізації бортової хитавиці (Рис. 1.10).

Момент, що ініціює бортову хитавицю, частково вирівнюється боковим упором КР. Так як величина упору КР є однаковою в усіх напрямках, для нульової швидкості протидіючий момент може утворюватися прикладенням бокових сил. Цей принцип зберігається і для плавання на швидкості, так як стернові сили можуть утворюватися дуже швидко завдяки тому, що боковий упор КР залишається високим при будь-якій швидкості.

Для визначення можливості подолання бортової хитавиці завдяки КР була проведена серія тестів на моделі 44-метрової моторній яхти у дослідному басейні. Тести проводилися при нульовій швидкості з хвилями 1,5м заввишки та періодом в 5сек в вилицю.

При активній стабілізації спостерігається зниження амплітуди бортової хитавиці на 64,9%. При активній стабілізації КР виробляють альтернативні

бокові сили щоб протидіяти бортовій хитавиці. Наразі КР стабілізаційна система успішно запроваджена на багатьох офшорних допоміжних судах.

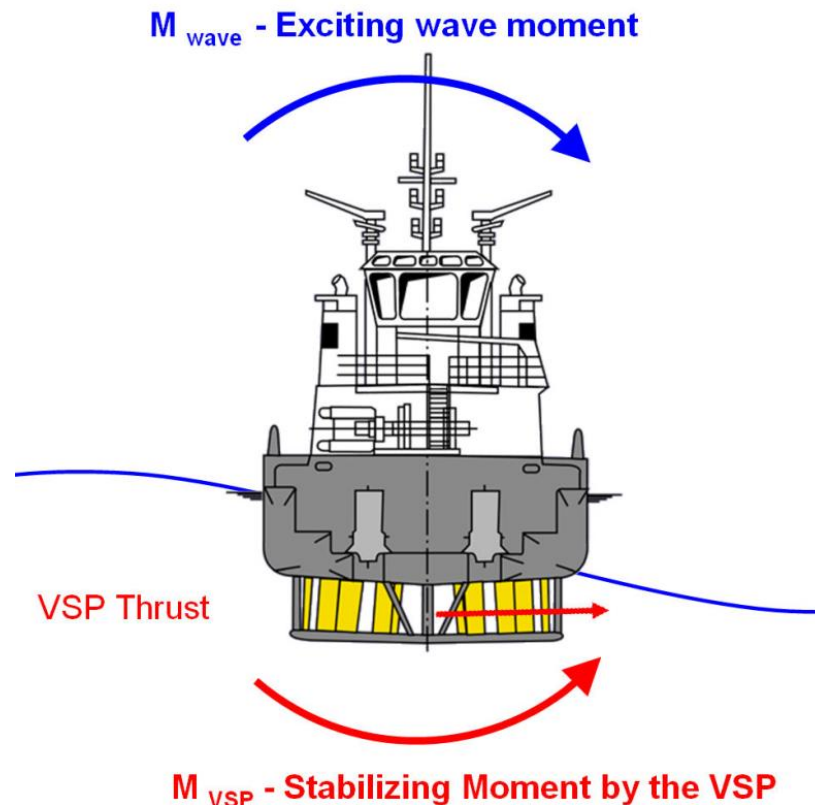


Рис. 1.10 – Стабілізації бортової хитавиці за допомогою КР

1.4. Поведінка судна в шторм в залежності від форми корпусу

Історична еволюція суднової архітектури пояснюється змінами в принципах ведення руху і лише частково станом технології суднобудування. Дану тезу можна використовувати для аналізу морехідності корпусу судна з найдавніших часів до початку XX століття. На (Рис. 1.11) проілюстровано механізм мінімізації хитавиці та дрейфу для судна з округлими бортами (А) та вплив сил на корпус сучасних суден (В). У військово-морській архітектурі сучасних суден або кораблів однакового призначення можна знайти суттєві відмінності у їх формі корпусу та надбудов, тому цікавим є проведення порівняльного аналізу морехідних якостей, зумовлених контурами корпусу та архітектурою надбудов. Актуальність такого питання пов'язана з швидкою зміною уявлень про найкращу форму корпусу протягом останніх десятиліть,

але за цей період не відбулося жодних змін у принципах морехідності та технічного обслуговування.

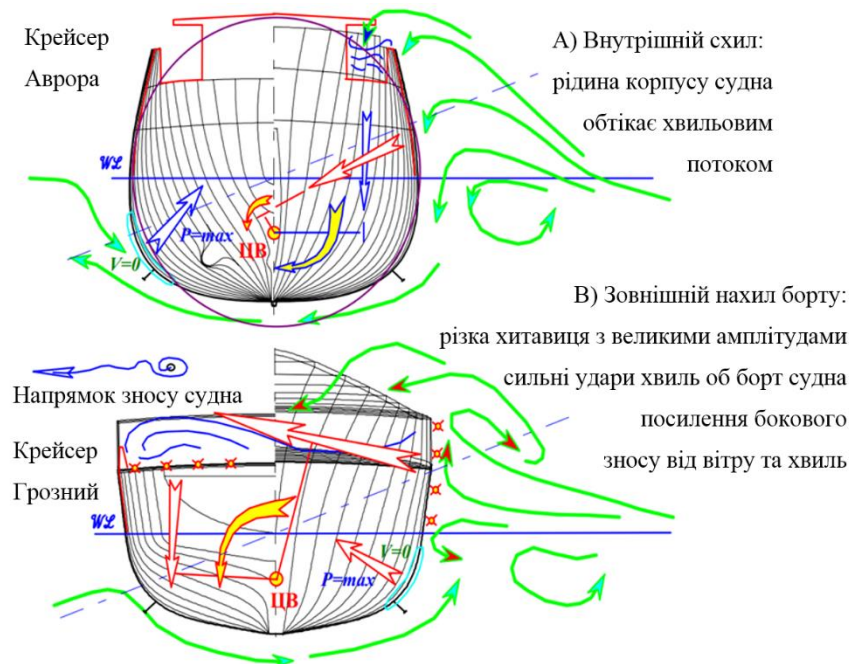


Рис. 1.11 – Інтерпретація гідромеханіки для зовнішніх сил хвильової природи [126]

Крен від прямого впливу гребеня хвилі на надводний борт судна може бути мінімізований за допомогою завалу борту (Рис. 1.11 (А)), а довга подовжкорпусна надбудова на верхній палубі, округлість шпангоутів і бортові кілі в цьому випадку, і тільки за умови завалу надводного борту, зможуть частково компенсувати залишковий момент, що кренить, від впливу вітру і хвилювання. Якщо ж корпус має розвал бортів (схема В), то і бортові кілі, і розподіл тисків в підводній частини корпусу будуть посилювати момент що кренить, під впливом морського хвилювання [126].

Підйом судна призводить до зниження пропульсивної тяги, стабілізації корпусу, а також погіршення загальної та поздовжньої міцності корпусу.

Безсумнівно, що в конфігурації корпусу судна, задуманому на початку ХХ століття, реалізувалися компромісні пропозиції між покорою та протистоянням перед загрозою штормового моря:

Носова частина судна обладнана бульбом продовжила служити для стабілізації корпусу і збереження стійкості на курсі в умовах хвилювання;

Особливо це важливо для високої швидкості руху, в порівнянні з галерою з веслами, бульб сприятливо впливає на зниження хвильового опору на спокійній воді; загострення кінцівок і невелика повнота об'ємів поверхні в носовій і кормовій частині сприяють стійкості на нерівностях і сприятливо впливають на зменшення хитавиці і запобігання слемінгу; вузькі корпуси кораблів будуються для досягнення високої швидкості руху, як у середземноморських галер; звужена ширина настилу служить для збереження штормової стійкості. Внутрішній нахил бортів також зменшує ризикання під час хитавиці, що забезпечує збереження заданого курсу і швидкості в умовах сильного шторму; досить низький борт і невелика вітрильна поверхня надбудов дає можливість вести судно навіть в умовах сильного вітру.

1.5. Система моніторингу морехідності «HULLMOS» та системи підтримки прийняття рішень «OCTOPUS-DSS» і «IMDSS»

Зразки судових автоматизованих систем контролю морехідності (АСКМ). В даний час різні фірми випускають серійні зразки систем для оцінки, моніторингу, прогнозування та оптимізації мореплавства. Існуючі АСКМ в певною ступеня відрізняються друг від друга складом обладнання, переліком розв'язуваних завдань, методами їх рішень, інформаційними ресурсами. Нижче коротко характеризуються деякі з що випускаються АСКМ.

Система моніторингу параметрів мореплавства "HULLMOS". Система "HULLMOS" розроблена фірмою SIREHNA [152]. Вона призначена для зменшення напруги корпусу та попередження появи їх неприпустимих значень у процесі експлуатації судна. Це досягається на основі вимірювання деформацій корпусу при завантаженні (статична напруга) та параметрів реакції судна на хвилювання на переході (динамічні навантаження) [146].

Склад системи. Базова конфігурація системи включає центральний модуль, який зазвичай розташовується на містку, резисторні тензодатчики з короткою (100 мм) і/або з довгою (1700 мм) основою, акселерометр на носі судна, канали зв'язку. Вона може доповнюватися інерційним модулем IMU,

супутниковим датчиком GPMS (GPS based motion sensor), датчиком тиску води в носовій частині днища та іншими приладами [48, 135].

Основні функції системи: тензовимірювання та їх аналіз; вимір параметрів руху корпусу та їх аналіз; визначення характеристик морського хвилювання; реєстрація даних та сигналізація; подання результатів вимірювань, аналізу та обробки у наочному вигляді; керування системою.

Вимірювальні пристрої. Система «HULLMOS» може використовувати інформацію вимірювачів механічних напруг, інерційних та супутникових датчиків лінійних та кутових переміщень, манометрів та інших вимірювальних пристроїв.

Датчики напруги можуть встановлюватися на палубі і стінках. На палубі вони розташовуються таким чином, щоб вимірювати деформації за загального поздовжнього згину [72]. Вигляд кріплення датчиків повинен забезпечити виключення ефектів впливу локальної напруги, зварювання та шліфування на результати вимірювань. Резисторні тензодатчики, що використовуються в системі, доповнені спеціальним електронним блоком для попереднього аналізу результатів вимірювань. Цей блок містить пам'ять та програмні засоби. У ньому виключається вплив температури на результати вимірювань, виділяється статична та динамічна складова навантажень. Тензодатчики мають функції самодіагностики. Вони пристосовані для роботи у локальній комп'ютерній мережі. Вихідна інформація датчиків по каналах мережі спрямовується для подальшого аналізу головний модуль системи.

До складу датчиків руху включено акселерометр, що вимірює вертикальне прискорення бака судна. Додатково в центральній частині корпусу може встановлюватися та сполучатися з системою інерційний модуль IMU, що вимірює параметри руху судна у всіх 6-ти ступенях волі. Передбачена можливість підключення до системи «HULLMOS», заснованого на GPS супутниковому вимірювачі параметрів руху корпусу - GPMS.

Датчиком тиску води може бути манометр будь-якого типу, що відповідає вимогам до застосування в АСКМ.

Головний модуль системи забезпечує керування системою та процесом моніторингу параметрів мореплавства, виконує аналіз руху та напруги суднового корпусу, визначає стан моря, підтримує роботу локальної мережі, відображає результати моніторингу та аналізу.

При аналізі навантажень виконуються такі операції: визначаються середні значення навантажень; обчислюються стандартні відхилення від середніх значень; знаходяться максимальні значення; оцінюються середні періоди зміни навантажень; запам'ятовуються та систематизуються результати минулих вимірів; виявляються 24-годинні тенденції зміни навантажень; відображаються тривожні повідомлення, що ґрунтуються на обліку експлуатаційних обмежень, поточних оцінок та трендів.

Аналіз руху корпусу включає: знаходження статистичних характеристик параметрів руху (середніх, середньоквадратичних, пікових значень); оцінку безпеки судна та вантажу; оцінку комфортності екіпажу та/або пасажирів у різних частинах судна (індикація можливості морської хвороби); виявлення тенденцій зміни параметрів руху з часом; попередження про наближення параметрів руху до небезпечних кордонів та про перевищення цих значень.

Визначення стану моря у системі ґрунтується на вимірах параметрів руху корпусу, навантажень у ньому, тиску води лише на рівні днища. При виконанні цього завдання оцінюються параметри хвилювання та його спектр за частотою та напрямом. Крім того, система запам'ятовує результати обробки та відстежує тенденції зміни характеристик хвилювання з часом.

Система підтримки прийняття рішень «OCTOPUS-DSS». Виріб «OCTOPUS-DSS» фірми AMARCON BV [153] є системою підтримки прийняття рішень щодо забезпечення безпечного плавання в несприятливих погодних умовах. Ця система постачається у різних конфігураціях. Вона може оперувати інформацією: бази даних судна, що містить параметри, що його характеризують, у тому числі й необхідні для оцінки мореплавності; комп'ютерів для розрахунку та керування навантаженням та баластуванням судна; приймача GPS та гірокомпасу; визначника параметрів морського

хвилювання за інформацією навігаційної РЛС (Радіо-локаційної станції) у X-діапазоні; прогнозів погоди; плану рейсу судна.

Система «OCTOPUS-DSS» перетворює поточну та прогностичну інформацію на параметри реакції судна. Для цього в системі використовуються програмні засоби "SEAWAY" Дельфтського університету технології. Система може виконувати безперервний моніторинг параметрів мореплавства судна, попереджати про наближення їх значення до порогових, сигналізувати про можливість слемінгу, заливання та виникнення інших морехідних небезпек. «OCTOPUS-DSS» прораховує та відображає ефекти впливу на мореплавність судна зміни курсу, швидкості, баластного стану для поточних та прогнозованих погодних умов. Допомогає капітану вибрати оптимальний режим штормування.

Розглянута система має програмні засоби для вибору оптимального маршруту і швидкості ходу на його ділянках з урахуванням очікуваних погодних умов і оцінок мореплавності судна на шляху шляху, що залишився. При виконанні цього завдання можуть використовуватись різні критерії оптимальності (час переходу, витрата палива та ін.). При розрахунках враховуються численні чинники, що впливають швидкість ходу чи потребують її зниження капітаном задля забезпечення безпеки судна і вантажу.

Система має програмний модуль для навчання судноводіїв роботі з нею та для тренажу з метою отримання необхідних навичок. «OCTOPUS-DSS» моделює різні несприятливі умови плавання, у яких оператор має знайти правильне рішення, що забезпечує ефективність експлуатації судна. При необхідності від системи можна отримати підказку, що робити в тих чи інших умовах: як уникнути слемінгу, зменшити заливання, попередити навантаження двигуна і т.д.

Інтегрована морська система підтримки рішень «IMDSS». Інтегрована морська система підтримки рішень "IMDSS" (Integrated Decision Support System) фірми Oceanweather Inc. [30] являє собою пакет програм, який

дозволяє капітану та його помічникам суттєво покращити планування рейсу та його виконання. При зміні погоди капітан здатний швидко ухвалити ефективні рішення у випадках, коли є необхідна гідрометеорологічна інформація та засоби для отримання на її основі даних щодо реакції судна. "IMDSS" надає капітану цю можливість. Ця система перевершує багато інших плануючих перехід засобу досконалістю процедур для оцінки мореплавності, поліпшенням прогнозів поведінки судна на хвилюванні, що дозволяє своєчасно вживати необхідних заходів та зменшує ризик потрапляння судна у важкі погодні умови. «IMDSS» дозволяє: виконувати планування рейсів з урахуванням усіх основних факторів, що впливають на морехідність судна; оптимізувати маршрут переходу; використовувати довгострокові прогнози вітру, хвилювання; виробляти рекомендації щодо тактичного маневрування в погану погоду.

Система складається з таких програмних модулів: погоди; вибір шляху; консультації; посібників плавання; комунікацій; інформація для судна; реєстрації.

Модуль планування шляху є передовий програмний продукт, розроблений, щоб надавати допомогу штурманському складу у виборі оптимального маршруту та швидкості ходу на його ділянках. Програма враховує прогнози погоди, розклад судна, вартість палива, операційні обмеження.

Консультативний модуль є програмним засобом, створеним для полегшення судноводію вибору тактичних маневрів курсом та швидкістю з метою запобігання шкоді судну та вантажу в умовах хвилювання та вітру. Програма передбачає реакцію судна на вітрохвильові впливи (параметри бортової, кільової хитавиці, прискорення у вказаних користувачем місцях), оцінює ймовірність оголення гребного гвинта, заливання палуби, слемінгу, розраховує динамічні згинальні моменти і сили, що перерізують.

Програма посібників плавання зберігає шляхові точки рекомендованих маршрутів, дозволяє використовувати їх у модулі планування шляху, доповнювати їх склад, а також автоматично генерувати звіти AMVER.

1.6. Система оцінки оптимізації морехідності «VOSS» та волоконно-оптична система «SENSFIB»

Судова система «VOSS» (Vessel Optimization and Safety System) фірми Ocean Systems Incorporated (США) [127] призначена для уникнення пошкоджень судна та вантажу у важких погодних умовах плавання та оптимізації маршрутів переходу. Вона є ефективним засобом для планування рейсів з урахуванням погоди та консультантом із забезпечення безпеки у штормових умовах. В даний час VOSS використовується більш ніж на ста судах. На багатьох вона інтегрована з навігаційно-інформаційною системою «Voyage Management System» фірми Litton Marine Systems і реєстратором даних рейсу.

Аналіз розробниками системи "VOSS" досвіду її експлуатації показав, що вона: запобігає затримкам в дорозі через погодні умови на 80%; знижує кількість пошкоджень корпусу на 73%; зменшує кількість пошкоджень вантажу на 87%.

Модель судна. Програмні засоби системи забезпечують детальне моделювання руху корпусу судна в умовах хитавиці, роботу енергетичної установки, витрати пального в різних погодних умовах. За допомогою такої «віртуальної» моделі досить точно оцінюються швидкість та інші кінематичні параметри судна за різних погодних умов, що задаються.

Модуль консультацій «VOSS» показує ефект від зміни курсу та/або швидкості на бортову, кильову хитавицю, прискорення, на ймовірність слемінгу (заливання), на згинальні моменти та перерізуючі сили в найбільш навантажених балках корпусу. Система включає до свого складу датчик, безперервно вимірює поточні значення параметрів хитавиці судна (переміщення, швидкості, прискорення). Він має розміри 115x66x31 мм. За

інформацією цього приладу обчислюються амплітуди та середні періоди параметрів руху корпусу, ймовірності перевищення допустимих меж, відображаються графіки зміни елементів хитавиці, визначається спектр хвилювання, забезпечуються завчасні попередження про основний та параметричний резонанс.

Програмні засоби системи дозволяють судноводію встановлювати операційні обмеження для параметрів хитавиці, напруги корпусу, роботи головного двигуна. Сукупність таких параметрів утворює так званий "пакет безпечної експлуатації" (Safe operation envelope) званий також конвертом (вектором) критеріїв мореплавства. Система «VOSS» дає можливість для елементів вітрового хвилювання і зйбу, що задаються судноводієм: розрахувати параметри кильової, бортової хитавиці, прискорення різних частин корпусу; оцінити ймовірність слемінгу, заливання, небезпечних прискорень, розгону двигуна; отримати значення згинальних моментів, сил що перерізують; визначити необхідність зменшення потужності головного двигуна, щоб запобігти його перевантаженню.

Гідрометеорологічна інформація. Прогнози вітру та хвилювання для системи «VOSS» генерує метеоцентр Oceanweather (США). На ньому для прогнозування погодних умов використовується велика інформація основних національних метеоцентрів США. Центр Oceanweather передає прогнози вітру та хвилювання на десять діб уперед двічі щодня.

Метеоцентр Oceanweather надає сіткові цифрові дані про поточну та очікувану погоду на весь Світовий океан з роздільною здатністю 1,250 за широтою та довготою. Ця інформація включає: прогнози швидкості, напрями приземного вітру, вітрових хвиль та зйби на період до 10 діб; прогнози атмосферного тиску на земній поверхні на період до 10 діб; прогнози швидкості місцевих вітрів та висот хвиль біля узбережжя; прогнози висот, середніх періодів та напрямів змішаного хвилювання та його основних складових; відомості про шлях руху та інтенсивність тропічних циклонів; середні значення швидкості, напрями поверхневих течій та розташування

головних систем течій; текстові поради щодо штормування від Oceanweather та Урядових центрів попереджень.

Волоконно-оптична АСК «SENSFIB». Система «SENSFIB» включає такі елементи: розташовані вздовж палуби волоконно-оптичні прилади для вимірювання напруги на корпусі при загальному поздовжньому вигині; датчики локальної напруги набору корпусу; акселерометри з електрооптичними конверторами; волоконно-оптична мережа від надбудови судна до форпіка; сполучні коробки для підключення до головної волоконно-оптичної мережі на судні світловодів від датчиків інформації; головний модуль системи, що є комп'ютером зі спеціальним програмним забезпеченням, який пов'язаний з датчиками інформації; накопичувач для зберігання результатів вимірювань, обробки та даних, що характеризують стан системи; пристрої сигналізації [116].

Волоконно-оптичні датчики напруги, що використовуються в системі «SENSFIB», засновані на решітці Бреггов і мають такі характеристики: розміри 220x140x30 мм³; вага 0,25 кг; частота >100 гц; діапазон вимірювань >4000 мє; чутливість 1 мє; нелінійність <1% у діапазоні 2500 мє; температурний діапазон від -25 С до +70 С; поміщені в корпусі з поліуретану.

Система «SENSFIB» зазвичай включає до свого складу один акселерометр, який розміщується в діаметральній площині на баку судна і служить для вимірювання вертикального прискорення. Він має електрооптичний конвертор і під'єднаний до оптичної мережі через встановлену на баку сполучну коробку. Акселерометр має такі характеристики: діапазон вимірювань ± 3 g; частотний діапазон 0–160 Гц; роздільна здатність 0,001 g; нелінійність <0,2%; температурний діапазон від -45 С до +85 С;

У волоконно-оптичній мережі використовуються 24-жильні кабелі ($\varnothing 12,5$ мм) та чотирижильні світловоди ($\varnothing 7,6$ мм).

Система «SENSFIB» випускається у різних конфігураціях. Системі забезпечена можливість з'єднання з комп'ютером для керування

завантаженням, з приладами контролю баластного стану, із засобами контролю крену та диферента судна, GPS-приймачем, радаром для вимірювання параметрів хвилювання, реєстратором даних рейсу, станцією супутникового зв'язку.

"SENSFIB" може бути частиною судової централізованої системи моніторингу та сигналізації. У цьому випадку її волоконно-оптична мережа може використовуватися для передачі даних інших судових засобів, наприклад систем дистанційного контролю: головного двигуна, підрулюючих пристроїв, рівня рідин в різних танках і т.д.

Мінімальна конфігурація «SENSFIB» для великотоннажних суден, що перевозять сухі вантажі навалом, включає чотири тензодатчики, один акселерометр і головний модуль, розташований на містку. Датчики напруги встановлюються на палубі вздовж ДП і служать для вимірювання напруги при загальному поздовжньому згині та крученні корпусу. За даними акселерометра визначаються прискорення, швидкість та величина вертикального руху носової частини судна.

Регістр Ллойда рекомендує до цього комплекту додавати в носовій частині днища судна датчик тиску для реєстрації ударів об воду при слемінгу. Рекомендації норвезького класифікаційного товариства DNV додатково включають встановлення: датчиків місцевих напруг на наборі в носовій частині судна для визначення сили ударів хвиль та напрямки хвилювання; тензодатчиків на бортовому наборі корпусу на міделі нижче ватерлінії для отримання більш повної картини напруги при загальному поздовжньому вигині та крученні.

1.7. Огляд моделей та методів розробки і тестування автоматизованих систем

В тезах [71] розглянуто питанням автоматичного тестування алгоритмів попередження зіткнень надводних суден. Реалізовано два алгоритми уникнення зіткнень, один з яких базується на швидкісній перешкоді, а інший

— на типовій моделі прогнозного керування. Алгоритми були автоматично перевірені шляхом генерації різних сценаріїв і оцінок ситуації за допомогою набору метрик. Було протестовано в багатьох сценаріях автономних надводних суден. Сценарії генеруються за допомогою методу, який ставить перед системою запобігання зіткненням велику кількість послідовних взаємодій із судном. Щоб оцінити продуктивність сценарію системи запобігання зіткненням, застосовано ряд оціночних показників, які використовуються для визначення відповідності МПЗЗС.

У статті [82] розглядаються питання проектування та тестування систем керування в HIL (hardware in the loop), коли частини компонентів контуру керування є реальним обладнанням, а частини – змодельованими. Цей підхід використовується, коли експериментувати з реальним процесом є занадто дорого або довго. Розглянуто моделювання повільних процесів на прикладі систем опалення та швидких процесів на прикладі двигунів внутрішнього згоряння. Описано моделі для 6 та 8-циліндрових дизельних двигунів, включаючи вприскування палива та згоряння, підвищення тиску, генерування крутного моменту колінчастого вала, динаміку турбокомпресора вихлопних газів і динаміку автомобіля. Моделювання в реальному часі порівнюється з вимірюваннями на реальних дизельних двигунах і вантажівках.

У статті [85] розглядається метод HIL для тестування суднових систем керування. Метод передбачає використання апаратних засобів разом із віртуальними моделями для спільного математичного моделювання. Автори пропонують використання методу HIL як нового методу для перевірки та валідації морських систем керування. Розглянуто термінологію, функції та відмови системи керування, характеристики та вимоги до тренажерів HIL, а також проблему тестування HIL.

У статті [99] досліджено структуру та компоненти апаратного забезпечення в закритому контурі для різних систем, а також робиться спроба більш детально оцінити застосування HIL-моделювання у динаміці та техніці керування. Були досліджені причини та необхідність використання контурів

НІЛ, останні досягнення в цій галузі та його важливість у проектуванні, розробці, впровадженні та тестуванні програмного забезпечення для керування. Було представлено історію НІЛ та зростаючий інтерес до нього за останні роки та в різних галузях. Наприкінці, окрім згадки про його важливу роль у проектуванні системи, було введено загальну структуру відповідної лабораторії. Були перераховані переваги апаратного забезпечення в лабораторії циклу при проектуванні та розробці системи керування. Запропоновано та обговорено загальну структуру апаратного забезпечення в циклічній лабораторії для різних галузей промисловості.

У статті [111] повідомляється про пілотне дослідження НІЛ-тестування систем DP. Симулятор судна DP-НІЛ — це симулятор у режимі реального часу, який безпосередньо підключено до комп'ютерної системи DP. Він розраховує рух судна у відповідь на змодельовані умови навколишнього середовища, режими відмови, введені користувачем, і команди двигуна, отримані від комп'ютерної системи DP. На основі обчисленого руху змодельованого судна він також моделює бортові системи та обладнання, і передає відповідні датчики та сигнали стану назад на комп'ютера DP. Порівняно з вбудованим тренажером, симулятор судна DP-НІЛ відрізняється можливістю значно більш детального моделювання режимів відмови. Представлено нову концепцію та технологію симулятора DP-НІЛ.

У дослідженні [37] представлено симулятор реального часу. Розкриті питання моделювання в реальному часі, розглянуто ефективність даного моделювання. Розглянуто як моделювання в реальному часі може сприяти теперішнім і майбутнім дослідженням. Також обговорені теми перевірки результатів, змішування моделювання в режимі реального часу та автономного режиму, а також покриття тестів у складних системах. Приділена увага питання впливу моделювання в реальному часі на сферах енергосистем, що швидко розвиваються.

У роботах [137, 113, 110, 97] представлено створену імітовану систему валідації для перевірки здатності автономних суден уникати зіткнень у

відкритих водах, прибережних регіонах і районах архіпелагу з різною інтенсивністю руху. Для імітації сценаріїв випадкових зіткнень розроблено новий метод для підтримки цільової кількості суден, проведення різноманітних тестів,

Недоліком запропонованих рішень [71], [82, 85, 99, 111, 37, 137, 113, 110, 97] є низька гнучкість включення в замкнутий цикл моделювання різноманітних моделей командних пристроїв, виконавчих механізмів, об'єктів керування, об'єктів навчальної сцени, погодних умов тощо; запропоновані рішення містять вузькоспеціалізоване обладнання і, як правило, мають високу вартість.

1.8. Висновки по розділу 1

1. Проаналізовано документи ММО щодо безпечного плавання у штормових умовах: Resolution A.562(14), adopted on 20 November 1985. Recommendation on a severe wind and rolling criterion (weather criterion) for the intact stability of passenger and cargo ships of 24 metres in length and over, MSC/Circ.707 from 19 October 1995. Guidance to the master for avoiding dangerous situations in following and quartering seas, MSC.1/Circ.1228 from 11 January 2007. Revised guidance to the master for avoiding dangerous situation in adverse weather and sea conditions. У останньому документі MSC.1/Circ.1228 from 11 January 2007. Revised guidance to the master for avoiding dangerous situation in adverse weather and sea conditions визначені небезпечні явища, які виникають на попутному хвилюванні: Surf-riding (бровичинг), зменшення остійності, небезпечні явища, які виникають для усіх напрямків хвилювання:: гармонійний резонанс, параметричний резонанс першого типу (вдаваний період хвиль приблизно дорівнює періоду вільних коливань судна), параметричний резонанс другого типу (вдаваний період хвиль приблизно дорівнює половині періоду вільних коливань судна), та наведені рекомендації по боротьбі із цими небезпеками.
2. Описано метод знаходження безпечних щодо гармонійного резонансу параметрів руху судна у шторм на регулярному хвилюванні, заснований на

використанні штормової діаграми Ремеза. Наведена умова виникнення гармонійного резонансу, формула визначення уявного періоду хвилювання та побудована на її основі штормова діаграма. Описано алгоритм знаходження безпечної швидкості та курсу штормового плавання на основі інформації про довжину або період хвилі, поточну швидкість судна та кут набігання хвилі на діаметральну площину судна. Для нерегулярного хвилювання описані можливості входу у діаграму через шкали А та Б (розміщені зліва діаграми), використовуючи висоту хвилі 3% забезпеченості або висоту хвилі $h_{1/3}$, яка використовується у ряді зарубіжних країн. Описана також можливість входу у діаграму штормування через шкалу бальності хвилювання (розміщена справа від діаграми).

3. Описані пасивні засоби заспокоєння хитавиці за рахунок використання: спеціальної форми корпусу судна, гідродинамічних заспокоювачів (вирічні кілі), гіроскопічних заспокоювачів; та активні засоби заспокоєння хитавиці: активні бортові керма, активні цистерни, крильчасті рушії.

4. Проаналізовані існуючі системи моніторингу морехідності HULLMOS, підтримки прийняття рішень OCTOPUS-DSS і IMDSS. Система моніторингу параметрів мореплавства HULLMOS призначена для зменшення напруги корпусу та попередження появи їх неприпустимих значень у процесі експлуатації судна, що досягається на основі вимірювання деформацій корпусу при завантаженні (статична напруга) та параметрів реакції судна на хвилювання на переході (динамічні навантаження). Система підтримки прийняття рішень OCTOPUS-DSS може виконувати безперервний моніторинг параметрів мореплавства судна, попереджати про наближення їх значення до порогових, сигналізувати про можливість слемінгу [61, 2], заливання та виникнення інших морехідних небезпек. OCTOPUS-DSS прораховує та відображає ефекти впливу на мореплавність судна зміни курсу, швидкості, баластного стану для поточних та прогнозованих погодних умов. Допомогає капітану вибрати оптимальний режим штормування. Інтегрована морська система підтримки рішень IMDSS дозволяє капітану та його помічникам

суттєво покращити планування рейсу та його виконання. При зміні погоди капітан здатний швидко ухвалити ефективні рішення у випадках, коли є необхідна гідрометеорологічна інформація та засоби для отримання на її основі даних щодо реакції судна.

5. Проаналізовані системи оптимізації безпеки судна (Vessel Optimization and Safety System) VOSS та волоконно-оптична система SENSFIB. VOSS є ефективним засобом оптимізації маршрутів переходу, із врахуванням погоди, та консультантом із забезпечення безпеки у штормових умовах. SENSFIB використовується для контролю напружень у корпусі судна, вона може бути також частиною суднової централізованої системи моніторингу та сигналізації. У цьому випадку її волоконно-оптична мережа може використовуватися для передачі даних інших суднових засобів: головного двигуна, підрулюючих пристроїв, рівня рідин в танках, тощо.

6. Зроблено огляд моделей та методів розробки і тестування систем автоматичного керування, який показав, що значне поширення на сьогодні у різних галузях промисловості знайшли системи тестування HIL (hardware in the loop), у замкнутому контурі яких повністю або частково використовуються реальні вимірювальні та/або виконавчі пристрої. Зокрема, проведений огляд показав, що HIL симуляція вже знаходить своє застосування для тестування систем динамічного позиціонування. Недоліком відомих рішень є низька гнучкість включення в замкнутий цикл моделювання різноманітних моделей командних пристроїв, виконавчих механізмів, об'єктів керування, об'єктів тренажерної сцени, погодних умов тощо; запропоновані рішення містять вузькоспеціалізоване обладнання і, як правило, мають високу вартість.

На підставі вивчення та систематизації матеріалів з відкритих джерел щодо методів, засобів та систем штормового плавання, методів, засобів та систем розробки і тестування автоматичних модулів керування, сформульовано завдання, вимоги та концептуальну модель модуля автоматичного штормування у автоматизованій системі, визначено його структурний склад.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ СУДНА І ХВИЛЮВАННЯ

2.1. Нерегулярне хвилювання

Закон розподілу є найбільш вичерпною характеристикою випадкової величини. Однак на практиці він не завжди буває відомий. У цьому випадку для вирішення практичних завдань обмежуються розглядом деяких числових характеристик законів розподілу, які визначають основні властивості випадкових величин і можуть служити для наближених оцінок. Ці числові показники називаються моментами розподілу випадкової величини. Розрізняють початкові та центральні моменти. Початковим моментом порядку n називають величину $a_n = \int_{-\infty}^{\infty} x^n f(x) dx$.

Перший початковий момент ($n = 1$) називається математичним очікуванням чи середнім значенням випадкової величини X :

$$a_1 = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx = m_x = M(X), \quad (2.1)$$

де $M(X)$ і m_x — символи математичного очікування величини X .

Враховуючи (2.1), абсциса центру тяжіння площі, обмеженої кривою $f(x)$, буде

$$x_f = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx}{\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx} = m_x, \text{ так як } \int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1 \quad (2.2)$$

Таким чином, математичне очікування випадкової величини дорівнює абсцисі центру тяжіння площі, обмеженої кривою, що виражає диференціальний закон розподілу (2.2).

Центральним моментом порядку, n називають інтеграл виду

$$\mu_n = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^n f(x) dx. \quad (2.3)$$

Використовуючи 2.3 можна знайти перший центральний момент $\mu_1 = 0$.

Другий центральний момент

$$\mu_2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 f(x) dx = M[(X - m_x)^2] = D_x \quad (2.4)$$

називається дисперсією випадкової величини X . У механічному сенсі дисперсія є момент інерції площі, обмеженою кривою $f(x)$, щодо центральної осі, тобто осі, що проходить через точку з абсцисою m_x . Дисперсія характеризує розкид можливих значень випадкової величини щодо її середнього значення. Чим дисперсія більша, тим більше розкид.

У тих випадках, коли відхилення випадкової величини від її середнього значення не схильні до будь-якого систематичного впливу або обмеженню, щільність ймовірності описується нормальним законом розподілу (законом Гауса)

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_x}} e^{-\frac{(x-m_x)^2}{2D_x}}. \quad (2.5)$$

Очевидно, що нормальний закон повністю визначається математичним очікуванням та дисперсією. Дещо забігаючи вперед, зазначимо, що цьому закону підпорядковуються ординати реального морського хвилювання та нерегулярної хитавиці.

Тепер вважатимемо, що безперервна нормально розподілена випадкова величина x залежить від деякого аргументу t і має дисперсію D_x , і нульове середнє значення. Якщо в інтервалі між сусідніми нулями $x(t)$ мало відрізняється за формою від синусоїди і має один екстремум (Рис. 2.1), то розподіл (2.5) її амплітуд x_0 підпорядковується закону Релея:

$$\left. \begin{aligned} f(x_0) &= \frac{x_0}{D_x} e^{-\frac{x_0^2}{2D_x}} && \text{при } x_0 > 0; \\ f(x_0) &= 0 && \text{при } x_0 < 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

Закон (2.6) широко застосовується для ймовірнісного опису амплітуд морського хвилювання та нерегулярної хитавиці.

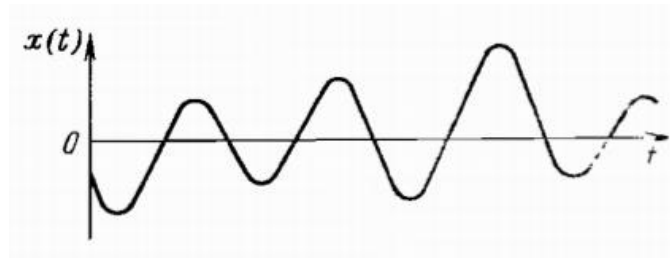


Рис. 2.1 – Безперервна випадкова величина, що залежить від часу (реалізація випадкового процесу).

Періодична функція з несуттєвими для технічних програм математичними обмеженнями може бути розкладена в ряд Фур'є:

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{j=1}^{\infty} (A_j \cos \omega_j t + B_j \sin \omega_j t), \quad (2.7)$$

$$\omega_j = j \frac{2\pi}{T} = j\omega_1 \rightarrow \omega_1 = \frac{2\pi}{T}, \quad (2.8)$$

Помножимо праву і ліву частини ряду на $\cos \omega_k t$, і проінтегруємо в межах від $-T/2$ до $T/2$. Потім помножимо обидві частини ряду на $\sin \omega_k t$, і проінтегруємо в тих же межах. Враховуючи, що за властивістю ортогональності однойменних функцій (синусів або косинусів) кратних кутів

$$\int_{-T/2}^{T/2} \sin \omega_j t \sin \omega_k t dt = \int_{-T/2}^{T/2} \cos \omega_j t \cos \omega_k t dt = \begin{cases} \frac{T}{2} \text{ при } k = j, \\ 0 \text{ при } k \neq j \end{cases}, \quad (2.9)$$

і крім того, $\int_{-T/2}^{T/2} \cos \omega_j t \sin \omega_k t dt = 0$

отримаємо такі формули для коефіцієнтів ряду:

$$\begin{cases} A_j = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos \omega_j t dt \\ B_j = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin \omega_j t dt \end{cases} \quad (2.10)$$

Якщо коефіцієнти визначені за цими формулами, то при збереженні будь-якого кінцевого числа членів ряду він дає найменше квадратичне

відхилення від точного значення функції $f(t)$. Зі збільшенням числа членів апроксимація покращується, і за $N \rightarrow \infty$ ряд дає точне значення функції.

Ряд Фур'є є розкладання періодичної функції. Це розкладання може бути узагальнено і у разі неперіодичної функції за допомогою граничного переходу до $T \rightarrow \infty$. Справді, неперіодичну функцію можна розглядати як граничний випадок періодичної функції при необмежено зростаючому періоді. Для отримання відповідних формул підставимо вирази (2.10) коефіцієнтів A_j та B_j до ряду (2.7). Тоді отримаємо

$$f(t) = \frac{2}{T} \sum_{j=0}^{\infty} \left(\cos \omega_j t \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos \omega_j t dt + \sin \omega_j t \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin \omega_j t dt \right). \quad (2.11)$$

Тепер зробимо граничний перехід, рахуючи $T \rightarrow \infty$. В цьому випадку сума в останній формулі перейде в інтеграл, частота $\omega_l = 2\pi/T$ стане нескінченно малою величиною, яку позначимо через $d\omega$, а $\omega_l = i\omega_l$, з дискретної перетвориться на безперервну величину (поточну частоту) ω . Таким чином, матимемо

$$f(t) = \int_0^{\infty} (a \sin \omega t + b \sin \omega t) d\omega, \quad (2.12)$$

де

$$\begin{cases} a = \frac{1}{n} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cos \omega t dt \\ b = \frac{1}{n} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \sin \omega t dt \end{cases}, \quad (2.13)$$

враховуючи, що a є парна, а b - непарна функція ω , замість (2.12) можемо написати

$$f(t) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} (a \sin \omega t + b \sin \omega t) d\omega. \quad (2.14)$$

Формула (2.14) являється інтегралом Фур'є. Цей інтеграл є неперіодичною функцією сумою нескінченно великої кількості періодичних складових. Якщо ряд Фур'є представляє періодичну функцію як суму

нескінченно великої кількості періодичних складових з дискретними частотами, то в інтегралі Фур'є частоти утворюють безперервну послідовність. Іншими словами, у розкладанні неперіодичної функції є всі частоти.

Моментом спектра порядку q називається інтеграл

$$m_q = \int_0^{\infty} \sigma_0^q S(\sigma_0) d\sigma_0, \quad (2.15)$$

а шириною спектра – величина

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}}, \quad (2.16)$$

що лежить в межах $0 < \varepsilon < 1$.

Численні записи нерегулярного хвилювання, зроблені океанографами різних країн, показують, що ординати x схвильованої поверхні у фіксованій точці розподіляються за нормальним законом з нульовим математичним очікуванням (середнім значенням). Таким чином, на підставі (2.5) формулу для густини ймовірності ординат нерегулярного хвилювання можна написати у вигляді

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D}} e^{-\frac{x^2}{2D}} \quad (2.17)$$

де D - дисперсія ординат.

У спектральній теорії випадкових процесів розрізняють процеси з вузьким та широким спектрами. У процесів з вузьким спектром майже вся енергія припадає на невеликий інтервал частот $\Delta\sigma_0$, близьких до деякої частоти σ_m (Рис. 2.2, крива 1).

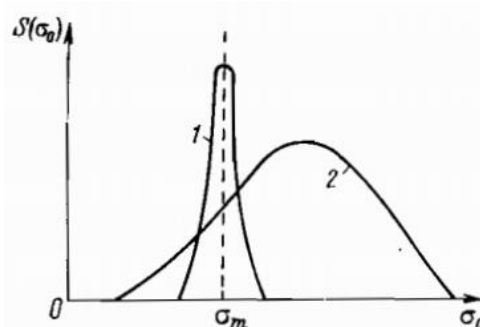


Рис. 2.2 – Вузький та широкий спектри частот згідно з спектральною теорією

Нульовий, другий та четвертий моменти такого спектру можна наближено представити такими виразами:

$$\begin{cases} m_0 = \int_0^{\infty} S(\sigma_0) d\sigma_0 \approx S(\sigma_m) \Delta\sigma_0; \\ m_2 = \int_0^{\infty} \sigma_0^2 S(\sigma_0) d\sigma_0 \approx \sigma_0^2 S(\sigma_m) \Delta\sigma_0; \\ m_4 = \int_0^{\infty} \sigma_0^4 S(\sigma_0) d\sigma_0 \approx \sigma_0^4 S(\sigma_m) \Delta\sigma_0. \end{cases} \quad (2.18)$$

Враховуючи (2.18),

$$\frac{m_2^2}{m_0 m_4} \approx 1. \quad (2.19)$$

і, як видно з формули (2.16), ширина спектра близька до нуля.

Для аналітичного уявлення спектра нерегулярного морського хвилювання можна використовувати два методи. У першому їх параметри спектра розглядають як функції умов хвилеутворення: швидкості і тривалості дії вітру, довжини розгону хвиль і т. д. У другому методі вважають відомими видимі елементи хвиль (наприклад, середню висоту або висоту 3% забезпеченості, середній період) та параметри спектра визначають як функції цих елементів. Перший метод використовують, головним чином, для прогнозів хвилювання, другий — до розрахунку впливу хвиль на різні споруди, зокрема і судна.

Для спектральної щільності хвильових ординат ряд авторів запропонували формули, більшість з яких мають однакову структуру такого вигляду:

$$S_x(\sigma_0) = A \sigma_0^{-k} e^{-B \sigma_0^{-n}}, \quad (2.20)$$

де k і n - цілі числа ($k \geq 5, n \geq 2$), а A та B деякі параметри, що залежать від умов хвилеутворення або статистичних характеристик хвиль. Моменти спектру (2.20) відповідно до (2.15) будуть визначатися формулою

$$m_q = \int_0^{\infty} A \sigma_0^{q-k} e^{-B \sigma_0^{-n}} d\sigma_0, \quad (2.21)$$

де q - порядок моменту.

Значення параметрів спектра (2.21), запропоновані різними авторами повністю розвиненого хвилювання, наведені в табл. 2.1 [156, 157, 145, 78, 79, 144, 139].

Таблиця 2.1. Параметри спектра повністю розвиненого хвилювання

№	Автори	A	B	k	n
1	Нейман	$3,05 \frac{\pi}{2}$	$2 \left(\frac{g}{v_B} \right)^2$	6	2
2	Пірсон і Московіц	$16,2 \cdot 10^{-3} g^2$	$0,74 \left(\frac{g}{v_B} \right)^4$	5	4
3	Другий міжнародний конгрес з конструкції та міцності судно	$0,28 h_{cp}^2 \sigma_{cp}^4$	$0,44 \sigma_{cp}^4$	5	4
4	А. І. Вознесенський та Ю. А. Нецветаєв	$9,43 \frac{m_0}{\sigma_{cp}} \sigma_m^6$	$1,5 \sigma_m^4$	6	4
5	Ю. М. Крилов	$0,0795 \cdot 2\pi h_{cp}^2 \sigma_{cp}^6$	$0,785 \sigma_{cp}^4$	7	4

2.2. Математична модель судна

Система динамічних рівнянь лінійного і кутового руху. Векторні рівнянні лінійного та кутового руху можна записати у вигляді

$$\frac{d\mathbf{P}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{P} = \sum_{j=1}^k \mathbf{F}_j, \quad (2.22)$$

$$\frac{d\mathbf{K}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial t} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{K} + \mathbf{V} \times \mathbf{P} = \sum_{j=1}^k \mathbf{M}_j, \quad (2.23)$$

де $\mathbf{P} = (P_x, P_y, P_z)$ - вектор кількості руху системи “судно-рідина” у проєкціях на осі ЗСК,

$\boldsymbol{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ - вектор кутової швидкості судна у проекціях на осі ЗСК,

$\mathbf{K} = (K_x, K_y, K_z)$ - вектор моменту кількості руху у проекціях на осі ЗСК,

$\mathbf{V} = (V_x, V_y, V_z)$ - вектор лінійної швидкості руху судна у проекціях на осі ЗСК,

$\mathbf{F}_j, j = 1..k$ - вектор збурюючих та керуючих сил у проекціях на осі ЗСК,

$\mathbf{M}_j, j = 1..k$ - вектор збурюючих та керуючих моментів у проекціях на осі ЗСК.

Знаходимо векторні добутки $(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{P})$, $(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{K})$ та $(\mathbf{V} \times \mathbf{P})$

$$\begin{aligned} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{P}) &= \begin{bmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \omega_x & \omega_y & \omega_z \\ P_x & P_y & P_z \end{bmatrix} = \\ &= \mathbf{i}(\omega_y P_z - \omega_z P_y) - \mathbf{j}(\omega_x P_z - \omega_z P_x) + \mathbf{k}(\omega_x P_y - \omega_y P_x) \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$\begin{aligned} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{K}) &= \begin{bmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \omega_x & \omega_y & \omega_z \\ K_x & K_y & K_z \end{bmatrix} = \\ &= \mathbf{i}(\omega_y K_z - \omega_z K_y) - \mathbf{j}(\omega_x K_z - \omega_z K_x) + \mathbf{k}(\omega_x K_y - \omega_y K_x) \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} (\mathbf{V} \times \mathbf{P}) &= \begin{bmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ V_x & V_y & V_z \\ P_x & P_y & 0 \end{bmatrix} = \\ &= \mathbf{i}(V_y P_z - V_z P_y) - \mathbf{j}(V_x P_z - V_z P_x) + \mathbf{k}(V_x P_y - V_y P_x). \end{aligned} \quad (2.26)$$

Враховуючи, що $P_x = (m + \lambda_{11})V_x$, $P_y = (m + \lambda_{22})V_y$, $P_z = (m + \lambda_{33})V_z$, $K_x = (I_x + \lambda_{44})\omega_x$, $K_y = (I_y + \lambda_{55})\omega_y$, $K_z = (I_z + \lambda_{66})\omega_z$, де m - маса судна, I_x, I_y, I_z - головні моменти інерції судна відносно осей ЗСК, $\lambda_{11}, \lambda_{22}, \lambda_{33}$ - приєднані маси води вздовж осей ЗСК, $\lambda_{44}, \lambda_{55}, \lambda_{66}$ - додаткові моменти інерції від приєднаних мас води відносно осей ЗСК, проекції векторів $(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{P})$, $(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{K})$ та $(\mathbf{V} \times \mathbf{P})$, представлені формулами (2.24) - (2.26), можуть бути записані у вигляді

$$\begin{cases} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{P})_x = (m + \lambda_{33})V_z\omega_y - (m + \lambda_{22})V_y\omega_z, \\ (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{P})_y = (m + \lambda_{11})V_x\omega_z - (m + \lambda_{33})V_z\omega_x, \\ (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{P})_z = (m + \lambda_{22})V_y\omega_x - (m + \lambda_{11})V_x\omega_y. \end{cases} \quad (2.27)$$

$$\begin{cases} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{K})_x = (I_z + \lambda_{66})\omega_z\omega_y - (I_y + \lambda_{55})\omega_y\omega_z, \\ (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{K})_y = (I_x + \lambda_{44})\omega_x\omega_z - (I_z + \lambda_{66})\omega_z\omega_x, \\ (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{K})_z = (I_y + \lambda_{55})\omega_y\omega_x - (I_x + \lambda_{44})\omega_x\omega_y. \end{cases} \quad (2.28)$$

$$\begin{cases} (\mathbf{V} \times \mathbf{P})_x = (m + \lambda_{33})V_zV_y - (m + \lambda_{22})V_yV_z = (\lambda_{33} - \lambda_{22})V_yV_z, \\ (\mathbf{V} \times \mathbf{P})_y = (m + \lambda_{11})V_xV_z - (m + \lambda_{33})V_zV_x = (\lambda_{11} - \lambda_{33})V_xV_z, \\ (\mathbf{V} \times \mathbf{P})_z = (m + \lambda_{22})V_yV_x - (m + \lambda_{11})V_xV_y = (\lambda_{22} - \lambda_{11})V_xV_y. \end{cases} \quad (2.29)$$

Після підстановки (2.27) – (2.29) у векторні рівняння (2.22), (2.23) та враховуючи, що

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} &= [(m + \lambda_{11})\frac{\partial V_x}{\partial t}, (m + \lambda_{22})\frac{\partial V_y}{\partial t}, (m + \lambda_{33})\frac{\partial V_z}{\partial t}], \\ \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial t} &= [(I_x + \lambda_{44})\frac{\partial \omega_x}{\partial t}, (I_y + \lambda_{55})\frac{\partial \omega_y}{\partial t}, (I_z + \lambda_{66})\frac{\partial \omega_z}{\partial t}], \end{aligned}$$

отримуємо систему динамічних рівнянь лінійного та кутового руху судна у проекціях на осі ЗСК

$$\begin{cases} (m + \lambda_{11})\frac{\partial V_x}{\partial t} = (m + \lambda_{22})V_y\omega_z - (m + \lambda_{33})V_z\omega_y + \sum_{j=1}^k F_{xj}, \\ (m + \lambda_{22})\frac{\partial V_y}{\partial t} = (m + \lambda_{33})V_z\omega_x - (m + \lambda_{11})V_x\omega_z + \sum_{j=1}^k F_{yj}, \\ (m + \lambda_{33})\frac{\partial V_z}{\partial t} = (m + \lambda_{11})V_x\omega_y - (m + \lambda_{22})V_y\omega_x + \sum_{j=1}^k F_{zj}. \end{cases} \quad (2.30)$$

$$\begin{cases} (I_x + \lambda_{44})\frac{\partial \omega_x}{\partial t} = (I_y + \lambda_{55})\omega_y\omega_z - (I_z + \lambda_{66})\omega_z\omega_y + (\lambda_{22} - \lambda_{33})V_yV_z + \sum_{j=1}^k M_{xj}, \\ (I_y + \lambda_{55})\frac{\partial \omega_y}{\partial t} = (I_z + \lambda_{66})\omega_z\omega_x - (I_x + \lambda_{44})\omega_x\omega_z + (\lambda_{33} - \lambda_{11})V_xV_z + \sum_{j=1}^k M_{yj}, \\ (I_z + \lambda_{66})\frac{\partial \omega_z}{\partial t} = (I_x + \lambda_{44})\omega_x\omega_y - (I_y + \lambda_{55})\omega_y\omega_x + (\lambda_{11} - \lambda_{22})V_xV_y + \sum_{j=1}^k M_{zj}. \end{cases} \quad (2.31)$$

Система кінематичних рівнянь лінійного руху. На рис. 2.3 наведена послідовність поворотів при переході від земної до зв'язаної системи координат для розрахунку направляючих косинусів між осями цих систем координат.

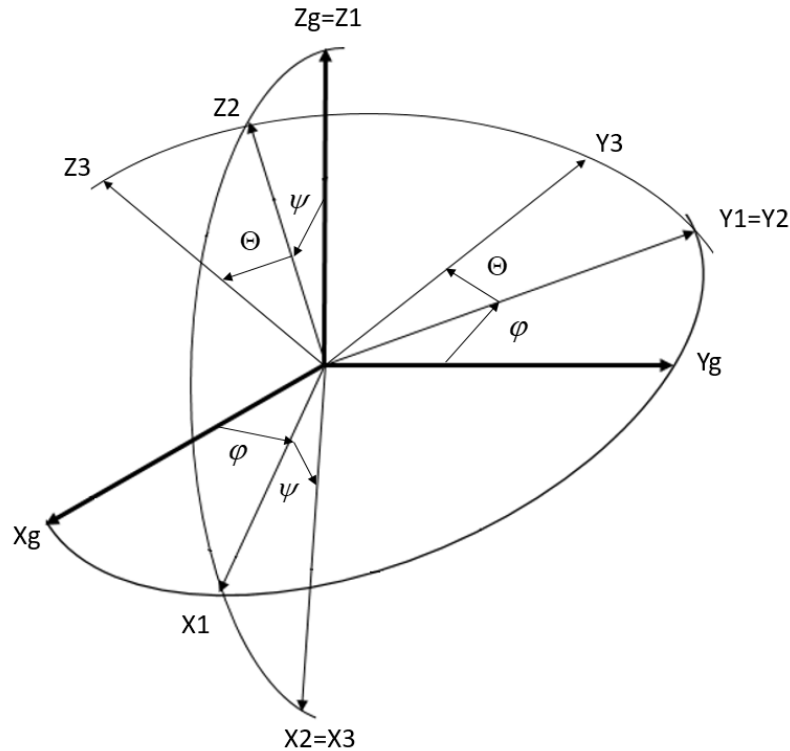


Рис. 2.3 – Послідовність поворотів при переході від земної до зв'язаної системи координат

Перший поворот виконано навколо осі OZ_g на кут рискання φ . Проекції орту $\mathbf{e}_g = (e_{xg}, e_{yg}, e_{zg})$, заданого у географічній системі координат, на осі нової системи координат $OX_1Y_1Z_1$, матимуть вигляд

$$\begin{cases} e_{x1} = e_{xg} \cos \varphi + e_{yg} \sin \varphi, \\ e_{y1} = -e_{xg} \sin \varphi + e_{yg} \cos \varphi, \\ e_{z1} = e_{zg} \end{cases} \quad (2.32)$$

Другий поворот виконано навколо осі OY_1 на кут диференту ψ .

Проекції орту \mathbf{e}_g на осі нової системи координат $OX_2Y_2Z_2$ мають вигляд

$$\begin{cases} e_{x2} = e_{x1} \cos \psi - e_{z1} \sin \psi, \\ e_{y2} = e_{y1}, \\ e_{z2} = e_{x1} \sin \psi + e_{z1} \cos \psi. \end{cases} \quad (2.33)$$

Третій поворот виконано навколо осі OX_2 на кут крену θ .

Проекції орту \mathbf{e}_g на осі нової системи координат $OX_3Y_3Z_3$ мають вигляд

$$\begin{cases} e_{x3} = e_{x2}, \\ e_{y3} = e_{y2} \cos \theta + e_{z2} \sin \theta, \\ e_{z3} = e_{y2} \sin \theta + e_{z2} \cos \theta. \end{cases} \quad (2.34)$$

Після підстановки рівнянь системи (2.32) у рівняння системи (2.33), потім рівнянь системи (2.33) у рівняння системи (2.34), після нескладних перетворень, знаходимо

$$\begin{cases} e_{x3} = e_{xg} \cos \varphi \cos \psi + e_{yg} \sin \varphi \cos \psi - e_{zg} \sin \psi, \\ e_{y3} = e_{xg} (\cos \varphi \sin \psi \sin \theta - \sin \varphi \cos \theta) + \\ + e_{yg} (\cos \varphi \cos \theta + \sin \varphi \sin \psi \sin \theta) + e_{zg} \cos \psi \sin \theta, \\ e_{z3} = e_{xg} (\sin \varphi \sin \theta + \cos \varphi \sin \psi \cos \theta) + \\ + e_{yg} (-\cos \varphi \sin \theta + \sin \varphi \sin \psi \cos \theta) + e_{zg} \cos \psi \cos \theta. \end{cases} \quad (2.35)$$

Систему (2.35) зручніше записати у вигляді таблиці направляючих косинусів між земною та зв'язаною системами координат (Табл. 2.2.).

Таблиця 2.2. Таблиця направляючих косинусів

	e_{xg}	e_{yg}	e_{zg}
e_{x1}	$\cos \varphi \cos \psi$	$\sin \varphi \cos \psi$	$-\sin \psi$
e_{y1}	$\cos \varphi \sin \psi \sin \theta - \sin \varphi \cos \theta$	$\cos \varphi \cos \theta + \sin \varphi \sin \psi \sin \theta$	$\cos \psi \sin \theta$
e_{z1}	$\sin \varphi \sin \theta + \cos \varphi \sin \psi \cos \theta$	$-\cos \varphi \sin \theta + \sin \varphi \sin \psi \cos \theta$	$\cos \psi \cos \theta$

Використовуючи таблицю направляючих косинусів, запишемо систему кінематичних рівнянь, що визначають лінійне переміщення судна у географічній системі координат

$$\begin{cases} \frac{dX_g}{dt} = V_x \cos \varphi \cos \psi + V_y (\cos \varphi \sin \psi \sin \theta - \sin \varphi \cos \theta) + \\ + V_z (\sin \varphi \sin \theta + \cos \varphi \sin \psi \cos \theta), \\ \frac{dY_g}{dt} = V_x \sin \varphi \cos \psi + V_y (\cos \varphi \cos \theta + \sin \varphi \sin \psi \sin \theta) + \\ + V_z (-\cos \varphi \sin \theta + \sin \varphi \sin \psi \cos \theta), \\ \frac{dZ_g}{dt} = -V_x \sin \psi + V_y \cos \psi \sin \theta + V_z \cos \psi \cos \theta. \end{cases} \quad (2.36)$$

Система динамічних рівнянь (2.30), разом із системою кінематичних рівнянь (2.36), описують динаміку лінійного руху зв'язаної із судном системи координат відносно земної системи координат.

Система кінематичних рівнянь кутового руху. На рис. 2.4 наведена схема послідовних поворотів для визначення диференціальних рівнянь кутового руху судна (математичної платформи).

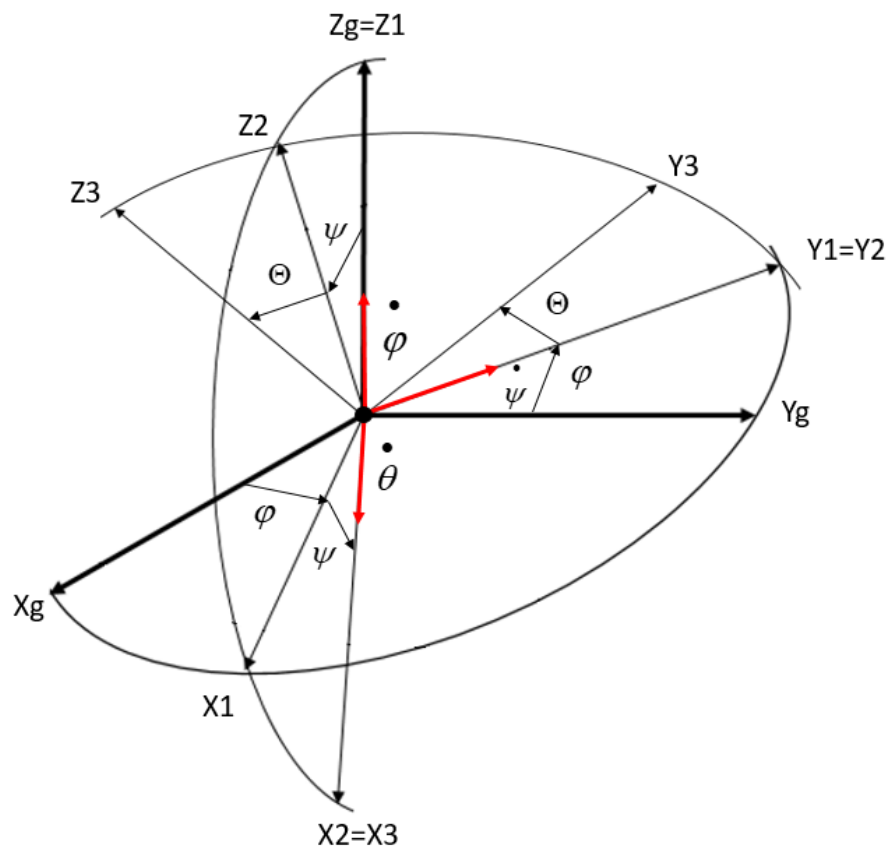


Рис. 2.4 – Схема послідовних поворотів для визначення рівнянь математичної платформи.

Після першого повороту навколо осі OZ_g з миттєвою кутовою швидкістю $\dot{\varphi}$, проекції кутових швидкостей на осях системи координат $OX_1Y_1Z_1$ матимуть вигляд

$$\begin{cases} \omega_{x1} = 0, \\ \omega_{y1} = 0, \\ \omega_{z1} = \dot{\varphi} \end{cases} \quad (2.37)$$

Після другого повороту навколо осі OY_1 з миттєвою кутовою швидкістю $\dot{\psi}$, проекції кутових швидкостей на осях системи координат $OX_2Y_2Z_2$ матимуть вигляд

$$\begin{cases} \omega_{x2} = -\dot{\varphi} \sin \psi, \\ \omega_{y2} = \dot{\psi}, \\ \omega_{z2} = \dot{\varphi} \cos \psi. \end{cases} \quad (2.38)$$

Після третього повороту навколо осі OX_2 з миттєвою кутовою швидкістю $\dot{\theta}$, проекції кутових швидкостей на осях системи координат $OX_3Y_3Z_3$ матимуть вигляд

$$\begin{cases} \omega_{x3} = \omega_{x2} + \dot{\theta} = -\dot{\varphi} \sin \psi + \dot{\theta}, \\ \omega_{y3} = \omega_{y2} \cos \theta + \omega_{z2} \sin \theta = \dot{\psi} \cos \theta + \dot{\varphi} \cos \psi \sin \theta, \\ \omega_{z3} = -\omega_{y2} \sin \theta + \omega_{z2} \cos \theta = -\dot{\psi} \sin \theta + \dot{\varphi} \cos \psi \cos \theta. \end{cases} \quad (2.39)$$

Систему рівнянь (2.39) розв'язуємо відносно $\dot{\varphi}$, $\dot{\psi}$, $\dot{\theta}$ методом Крамера

$$\Delta = \begin{vmatrix} -\sin \psi & 0 & 1 \\ \cos \psi \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ \cos \psi \cos \theta & -\sin \theta & 0 \end{vmatrix} = 1(-\cos \psi \sin^2 \theta - \cos \psi \cos^2 \theta) = -\cos \psi.$$

$$\dot{\Delta \varphi} = \begin{vmatrix} \omega_{x3} & 0 & 1 \\ \omega_{y3} & \cos \theta & 0 \\ \omega_{z3} & -\sin \theta & 0 \end{vmatrix} = 1(-\omega_{y3} \sin \theta - \omega_{z3} \cos \theta),$$

$$\dot{\Delta \psi} = \begin{vmatrix} -\sin \psi & \omega_{x3} & 1 \\ \cos \psi \sin \theta & \omega_{y3} & 0 \\ \cos \psi \cos \theta & \omega_{z3} & 0 \end{vmatrix} = 1(\omega_{z3} \cos \psi \sin^2 \theta - \omega_{y3} \cos \psi \cos \theta),$$

$$\begin{aligned} \dot{\Delta \theta} &= \begin{vmatrix} -\sin \psi & 0 & \omega_{x3} \\ \cos \psi \sin \theta & \cos \theta & \omega_{y3} \\ \cos \psi \cos \theta & -\sin \theta & \omega_{z3} \end{vmatrix} = -\sin \psi (\omega_{z3} \cos \theta + \omega_{y3} \sin \theta) + \\ &+ \omega_{x3} (-\cos \psi \sin^2 \theta - \cos \psi \cos^2 \theta) = -\omega_{x3} \cos \psi - \omega_{y3} \sin \theta \sin \psi - \omega_{z3} \cos \theta \sin \psi. \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \dot{\varphi} = \frac{1}{\cos \psi} (\omega_{y3} \sin \theta + \omega_{z3} \cos \theta), \\ \dot{\psi} = \omega_{y3} \cos \theta - \omega_{z3} \sin \theta, \\ \dot{\theta} = \omega_{x3} + \operatorname{tg} \psi (\omega_{y3} \sin \theta + \omega_{z3} \cos \theta). \end{cases} \quad (2.40)$$

Вектор кутової швидкості $\boldsymbol{\omega}_3 = (\omega_{x3}, \omega_{y3}, \omega_{z3})$, який використовується у системі (2.40), є вектором $\boldsymbol{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$, що знаходиться числовим інтегруванням системи динамічних рівнянь кутового руху (2.31). Система динамічних рівнянь (2.31), разом із системою кінематичних рівнянь (2.40), описують динаміку кутового руху зв'язаної із судном системи координат відносно земної системи координат.

2.3. Зовнішні сили і моменти від хитавиці, що діють на судно

На рис 2.5 зображено судно на хвилюванні.

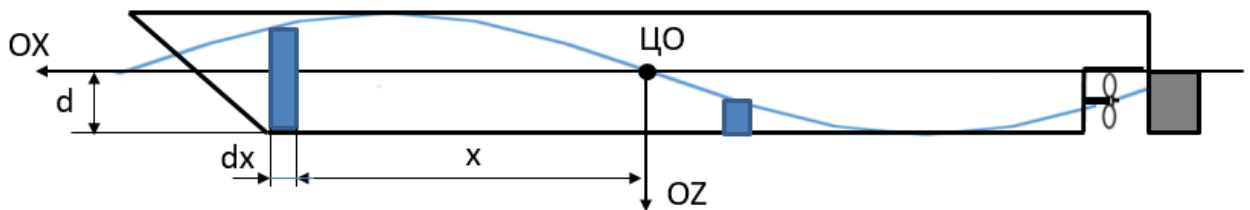


Рис. 2.5 – Судно на хвилюванні.

Глибина занурення елемента корпусу судна dx , який знаходиться на відстані x від центру обертання, дорівнює

$$z = d + xtg\psi + A\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x + \frac{\partial\Delta}{\partial t}t\right), \quad (2.41)$$

де d - осадка судна, ψ - диферент судна, A - амплітуда хвилювання, $\frac{2\pi}{\lambda}$ -

частота хвилі, приведена до довжини судна, λ - довжина хвилі, $\frac{\partial\Delta}{\partial t}$ -

швидкість зміни фази хвилі вздовж судна

$$\frac{\partial\Delta}{\partial t} = \frac{2\pi}{T_E} = \frac{2\pi}{\lambda}(C + V \cos q) \quad (2.42)$$

Після підстановки значення $\frac{\partial\Delta}{\partial t}$ із рівняння (2.42) у рівняння (2.41), отримуємо

$$z = d + xtg\psi + A\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x + \frac{2\pi}{\lambda}(C + V \cos q)t\right) \quad (2.43)$$

Виштовхувальна сила F_{z1} , викликана осадкою судна d , дорівнює

$$F_{z1} = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} (\rho_g g d) dx = (\rho_g g d)x \Big|_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} = \rho_g g d \left(\frac{L}{2} + \frac{L}{2} \right) = \rho_g g d L \quad (2.44)$$

Момент M_{y1} , викликаний осадкою судна d , дорівнює

$$M_{y1} = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} (\rho_g g d) x dx = \frac{1}{2} (\rho_g g d) x^2 \Big|_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} = \frac{1}{2} \rho_g g d \left(\frac{L^2}{4} - \frac{L^2}{4} \right) = 0 \quad (2.45)$$

Виштовхувальна сила F_{z2} , викликана диферентом ψ , дорівнює

$$F_{z2} = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \rho_g g (-xtg\psi) dx = -\frac{1}{2} \rho_g g tg\psi x^2 \Big|_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} = -\frac{1}{2} \rho_g g tg\psi \left(\frac{L^2}{4} - \frac{L^2}{4} \right) = 0 \quad (2.46)$$

Момент M_{y2} , викликаний диферентом ψ , дорівнює

$$\begin{aligned}
M_{y2} &= \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \rho_g g (-x t g \psi) x dx = -\frac{1}{3} \rho_g g t g \psi x^3 \Big|_{-L/2}^{L/2} = -\frac{1}{3} \rho_g g t g \psi \left(\frac{L^3}{8} + \frac{L^3}{8} \right) = \\
&= -\frac{1}{12} \rho_g g t g \psi L^3
\end{aligned} \tag{2.47}$$

Виштовхувальна сила F_{z3} , викликана хвилюванням, дорівнює

$$\begin{aligned}
F_{z3} &= \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \rho_g g A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \frac{2\pi}{\lambda} (C + V \cos q) t\right) dx = \rho_g g A \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) dx, \\
\Delta &= \frac{2\pi}{\lambda} (C + V \cos q) t. \\
\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) dx &= -\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) \frac{\lambda}{2\pi} \Big|_{-L/2}^{L/2} = \\
&= -\frac{\lambda}{2\pi} \left[\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{L}{2}\right) + \Delta\right) - \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \left(-\frac{L}{2}\right) + \Delta\right) \right] = \\
&= -\frac{\lambda}{2\pi} \left(-2 \sin \frac{\pi L}{\lambda} \sin \Delta \right) = \frac{\lambda}{\pi} \sin \frac{\pi L}{\lambda} \sin \Delta, \\
F_{z3} &= \rho_g g A \frac{\lambda}{\pi} \sin \frac{\pi L}{\lambda} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} (C + V \cos q) t\right)
\end{aligned} \tag{2.48}$$

Момент M_{y3} , викликаний хвилюванням, дорівнює

$$\begin{aligned}
M_{y3} &= \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \rho_g g A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \frac{2\pi}{\lambda} (C + V \cos q) t\right) x dx = \rho_g g A \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) x dx, \\
\Delta &= \frac{2\pi}{\lambda} (C + V \cos q) t, \\
\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) x dx &= \left| \begin{array}{l} x = U, dx = dU \\ \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) dx = dV \\ V = -\frac{\lambda}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) \end{array} \right| =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= -\frac{\lambda}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x + \Delta\right) x \Big|_{-L/2}^{L/2} + \int_{-L/2}^{L/2} \frac{\lambda}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x + \Delta\right) dx = \\
&= -\frac{\lambda}{2\pi} \frac{L}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{L}{2} + \Delta\right) + \frac{\lambda}{2\pi} \left(-\frac{L}{2}\right) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \left(-\frac{L}{2}\right) + \Delta\right) + \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x + \Delta\right) \Big|_{-L/2}^{L/2} = \\
&= -\frac{\lambda}{4\pi} L \left(\cos\frac{\pi}{\lambda} L \cos \Delta - \sin\frac{\pi}{\lambda} L \sin \Delta + \cos\left(-\frac{\pi}{\lambda} L\right) \cos \Delta - \sin\left(-\frac{\pi}{\lambda} L\right) \sin \Delta \right) + \\
&+ \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 \left(\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{L}{2} + \Delta\right) - \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \left(-\frac{L}{2}\right) + \Delta\right) \right) = \\
&= -\frac{\lambda}{4\pi} L \left(2 \cos\left(\frac{\pi}{\lambda} L\right) \cos \Delta \right) + \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 \left(2 \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} L\right) \cos \Delta \right) = \\
&= \left(-\frac{\lambda}{2\pi} L \cos\left(\frac{\pi}{\lambda} L\right) + \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 2 \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} L\right) \right) \cos \Delta \\
M_{y3} &= \rho_g g A \left(-\frac{\lambda}{2\pi} L \cos\left(\frac{\pi}{\lambda} L\right) + \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 2 \sin\left(\frac{\pi}{\lambda} L\right) \right) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(C + V \cos q)t\right) \quad (2.49)
\end{aligned}$$

На (Рис. 2.6) зображено вигляд з корми судна.

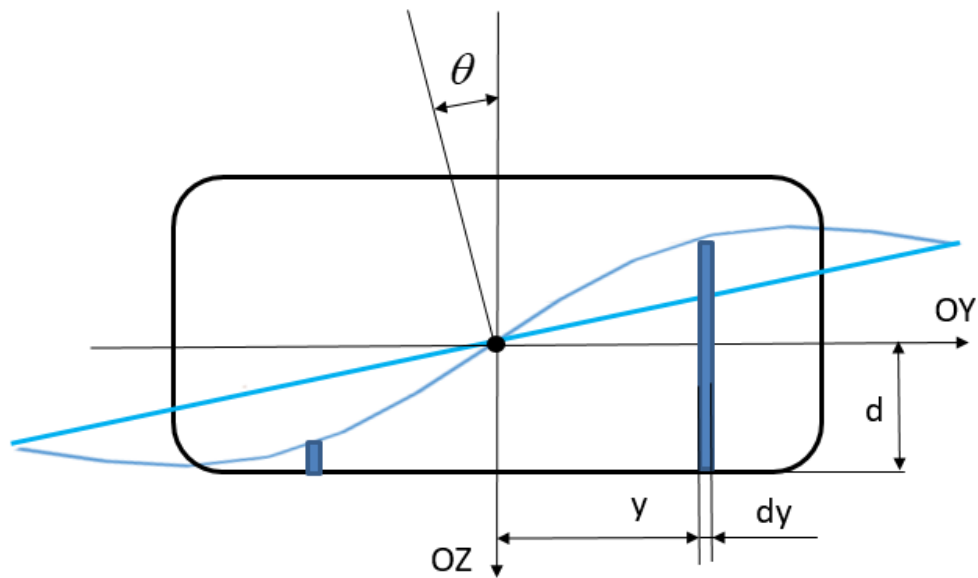


Рис. 2.6 – Вигляд з корми судна.

Глибина занурення елемента корпусу судна dy , який знаходиться на відстані y від центру обертання, дорівнює

$$z = d + y \operatorname{tg} \theta + A \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \frac{\partial \Delta}{\partial t} t \right), \quad (2.50)$$

де d - осадка судна, θ - крен судна, A - амплітуда хвилювання, $\frac{2\pi}{\lambda}$ - частота хвилі, приведена до ширини судна, λ - довжина хвилі, $\frac{\partial \Delta}{\partial t}$ - швидкість зміни фази хвилі поперек судна

$$\frac{\partial \Delta}{\partial t} = \frac{2\pi}{T_E} = \frac{2\pi}{\lambda} (C + V \sin q) \quad (2.51)$$

Після підстановки значення $\frac{\partial \Delta}{\partial t}$ із рівняння (2.51) у рівняння (2.50), отримуємо

$$z = d + y \operatorname{tg} \theta + A \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \frac{2\pi}{\lambda} (C + V \sin q) t \right) \quad (2.52)$$

Момент M_{x1} , викликаний креном судна θ , дорівнює

$$\begin{aligned} M_{x1} &= - \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} (\rho_g g y \operatorname{tg} \theta) y dy = - \frac{1}{3} (\rho_g g \operatorname{tg} \theta) y^3 \Big|_{-B/2}^{B/2} = - \frac{1}{3} \rho_g g \operatorname{tg} \theta \left(\frac{B^3}{8} + \frac{B^3}{8} \right) = \\ &= -12 \rho_g g \operatorname{tg} \theta B^3 \end{aligned} \quad (2.53)$$

2.4. Висновки по розділу 2

1. Проаналізовані дослідження нерегулярного хвилювання. Встановлено, що нерегулярні хвилювання найкраще описуються розкладанням у ряд Фур'є з накладанням випадкового шуму з нормальним законом розподілу. Записані коефіцієнти розкладання у ряд Фур'є, формули моменту спектру та ширини спектру.
2. Отримана система диференціальних динамічних рівнянь лінійного і кутового руху судна в проекціях на осі зв'язаної системи координат для визначення лінійних і кутових швидкостей судна. Використовується для математичного моделювання процесів штормування судна у середовищі MATLAB.

3. Отримана система диференціальних кінематичних рівнянь лінійного і кутового руху судна, яка дозволяє визначати лінійні і кутові переміщення судна відносно базової системи дкоординат. Використовується при моделюванні процесів руху судна у середовищі MATLAB.
4. Отримані залежності сил і моментів у каналах крену і диференту від амплітуди хвилювання, довжини хвилі, швидкості судна та курсового кута хвилі. Використовуються у математичній моделі судна при проведенні моделювання у середовищі MATLAB.

РОЗДІЛ 3. АВТОМАТИЧНЕ ШТОРМУВАННЯ МЕТОДОМ ПЕРЕМІЩЕННЯ ФАЗОВОЇ ТОЧКИ У БЕЗПЕЧНУ ЗОНУ

Математична модель об'єкту керування $f(\bullet)$, вимірювачів і закону керування $F(\bullet)$ представлені системою векторних рівнянь (3.1).

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{X}, \mathbf{U}, \mathbf{W}, T_B, T_L), \\ \mathbf{X}_m = \mathbf{C}\mathbf{X} + \boldsymbol{\varsigma}, \\ \mathbf{U} = \mathbf{F}(\mathbf{X}_m, \mathbf{X}^*), \\ \mathbf{X}^* \subseteq \overline{\Omega} \end{cases} \quad (3.1)$$

де $\mathbf{X} = (V, K, \omega_z)$ - вектор параметрів керування, V - швидкість судна, K - курс судна, $\mathbf{U} = (\Theta, \delta)$ - вектор керувань, Θ - кут переміщення телеграфу, δ - кут переміщення стерна, \mathbf{W} - вектор зовнішніх впливів, T_B, T_L - періоди власних коливань у каналах крену і диференту, \mathbf{X}_m - вектор вимірюваних параметрів, \mathbf{C} - матриця вимірювачів, $\boldsymbol{\varsigma}$ - вектор похибок вимірювання, $\mathbf{X}^* = (V^*, K^*)$ - вектор заданих параметрів руху, $\overline{\Omega}$ - не резонансна зона. Необхідно синтезувати такі керування $|\mathbf{U}| \leq \mathbf{U}^{\max}$, для яких мінімізується функція якості керування $Q(\mathbf{X}_m) \rightarrow \min$ та виміряні параметри знаходяться у позарезонансній зоні $\mathbf{X}_m \subseteq \overline{\Omega}$.

3.1. Структурна схема модуля автоматичного штормування.

Структурна схема модуля автоматичного штормування наведена на (Рис. 3.1). Навігаційні датчики вимірюють вектор кутової швидкості $\boldsymbol{\omega}$ судна, вектор швидкості судна V_m і курс судна K_m , датчики параметрів хвилювання вимірюють курс хвилі K_w , швидкість хвилі C , амплітуду A і довжину хвилі λ . За допомогою блоку швидкого перетворення Фур'є визначаються компоненти спектру зовнішніх впливів. Компоненти спектру подаються до блоку визначення небезпечних складових спектру, після чого небезпечні компоненти передаються в блок визначення параметрів безпечного руху.

Інформація датчиків вимірювання параметрів хвилювання та навігаційних датчиків надходить на блок визначення параметрів безпечного руху для розрахунку безпечної швидкості та курсу судна за несприятливих погодних умов враховуючи лише небезпечні складові спектру зовнішніх впливів. Блок визначення параметрів безпечного руху розраховує резонансну Ω та нерезонансну зону $\bar{\Omega}$, із врахуванням допустимого діапазону швидкостей судна, області гармонійного резонансу, параметричного резонансу, втрати остійності на попутному хвилюванні, брочингу та ударів групових хвиль у корму судна, оптимальним шляхом обирає безпечний курс K^* та безпечну швидкість судна V^* з урахуванням набору обмежень. Безпечна швидкість V^* судна подається на блок формування керувань СЕУ для визначення необхідного кута відхилення телеграфу СЕУ. Безпечний курс K^* разом з навігаційними даними (курс судна K_m , кутова швидкість рискання ω_z) надходить на вхід ПД-регулятора. Розраховане значення відхилення стерна δ подається на автоматику керма для відпрацювання.

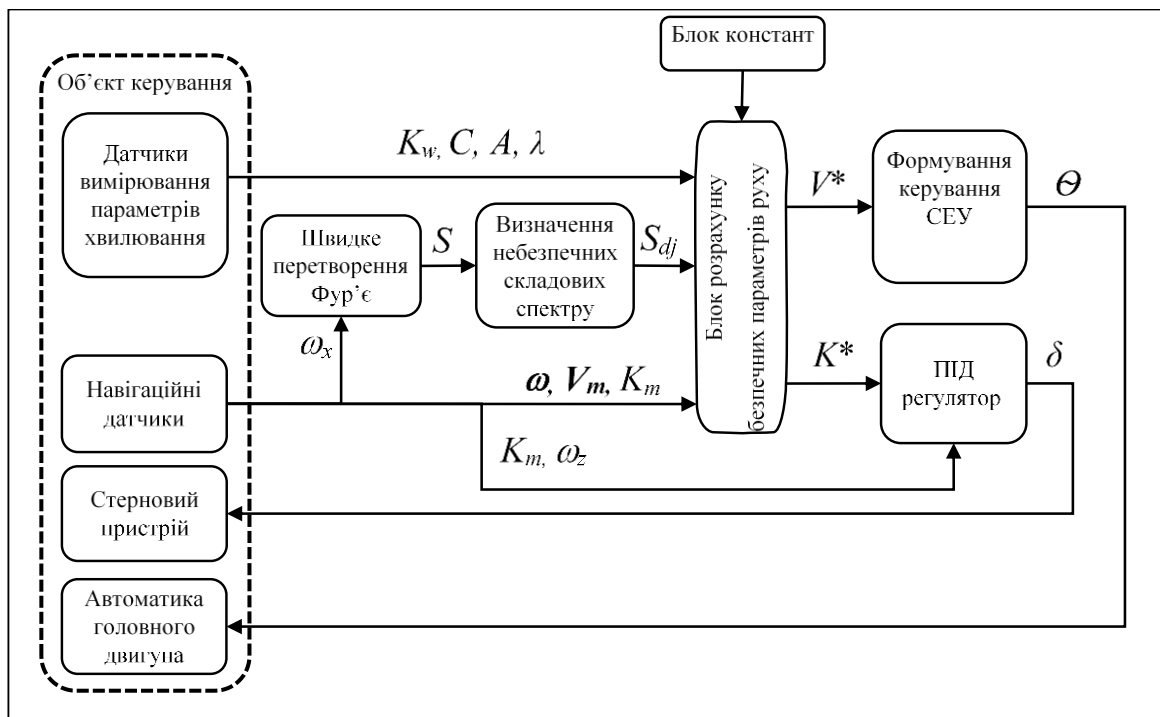


Рис. 3.1 – Структурна схема модуля автоматичного штормування.

Блок розрахунку безпечних параметрів руху, блок формування керування СЕУ, ПД-регулятор реалізовані як програмне забезпечення бортового обчислювача. Запам'ятовуючий пристрій бортового обчислювача використовується для зберігання програмного забезпечення, необхідної для розрахунків інформації та результатів обчислення. Бортовий обчислювач періодично, з періодом 1с, забезпечує отримання вимірюваної датчиками інформації, обробку цієї інформації у відповідності до закладених алгоритмів, формування керувань та передачу сигналів керувань на автоматику виконавчих пристроїв [124].

3.2. Визначення спектру хвилювання та його врахування при побудові небезпечних областей

Використання штормових діаграм Ремеза [156] та штормових діаграм ММО (MSC/Circ. 1228) [33] ускладнюється за наявності нерегулярного хвилювання, коли необхідно розраховувати дію на судно кількох гармонійних складових хвилювання. У цьому випадку необхідно розраховувати та відображати небезпечні щодо перевертання судна області для кожної значимої складової спектру. Для отримання спектру здобувачем запропоновано використовувати швидке перетворення Фур'є (Блок швидкого перетворення Фур'є на структурній схемі модуля автоматичного штормування) [141, 142, 140]. Не всі частоти спектру хвилювання є небезпечними, а лише ті, енергія яких перевищує енергію демпфування [114, 81, 52, 53]. Тому, для розрахунку небезпечних областей потрібно відбирати лише ті складові спектру, енергія яких перевищує енергію демпфування (Блок відбору небезпечних частот спектру на структурній схемі модуля автоматичного штормування).

Диференціальне рівняння кутового руху судна, за наявності гармонійного впливу, можна записати у вигляді

$$\ddot{\varphi} + \varepsilon_g \dot{\varphi} + \omega_0^2 \varphi = k \sin \omega t \quad (3.2)$$

де ε_g – декремент затухання коливань, ω_0 – частота вільних коливань судна, ω – частота зовнішніх впливів, k – амплітуда зовнішніх впливів, φ – кутове відхилення, зазвичай кут крену.

Загальний розв'язок диференційного рівняння (3.2) знаходиться як сума рішень однорідного рівняння і неоднорідного рівняння.

Рішення однорідного рівняння

$$\ddot{\varphi} + \varepsilon_g \dot{\varphi} + \omega_0^2 \varphi = 0 \quad (3.3)$$

розшукуємо у вигляді $\varphi_0 = e^{\lambda t}$.

Після підстановки цього рішення у рівняння (3.3), отримуємо характеристичне рівняння $\lambda^2 + \varepsilon_g \lambda + \omega_0^2 = 0$, коренями якого є

$$\lambda_{1,2} = -\frac{\varepsilon_g}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_g}{2}\right)^2 - \omega_0^2}, \quad (3.4)$$

Рішенням однорідного рівняння буде

$$\varphi_0(t) = e^{-\varepsilon_g/2} (C_1 \cos \Omega_0 t + C_2 \sin \Omega_0 t), \quad (3.5)$$

де C_1, C_2 - постійні коефіцієнти, $\Omega_0 = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_g}{2}\right)^2 - \omega_0^2}$.

Рішення неоднорідного диференційного рівняння записуємо у вигляді

$$\varphi_n(t) = A \cos \omega t + B \sin \omega t. \quad (3.6)$$

Із рівняння (3.6) знаходимо першу та другу похідні від $\varphi_n(t)$ для підстановки у диференційне рівняння (3.2)

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_n(t) &= -A \omega \sin \omega t + B \omega \cos \omega t \\ \ddot{\varphi}_n(t) &= -A \omega^2 \cos \omega t - B \omega^2 \sin \omega t \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$-A\omega^2 \cos \omega t - B\omega^2 \sin \omega t + \varepsilon_q (-A\omega \sin \omega t + B\omega \cos \omega t) + \omega_0^2 (A \cos \omega t + B \sin \omega t) = k \sin \omega t$$

$$(-B\omega^2 - A\varepsilon_q \omega + B\omega_0^2) \sin \omega t + (-A\omega^2 + B\varepsilon_q \omega + A\omega_0^2) \cos \omega t = k \sin \omega t$$

$$\begin{cases} -B\omega^2 - A\varepsilon_q \omega + B\omega_0^2 = k \\ -A\omega^2 + B\varepsilon_q \omega + A\omega_0^2 = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} -A\varepsilon_q \omega + B(-\omega^2 + \omega_0^2) = k \\ A(-\omega^2 + \omega_0^2) + B\varepsilon_q \omega = 0 \end{cases}$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} -\varepsilon_q \omega & \omega_0^2 - \omega^2 \\ \omega_0^2 - \omega^2 & \varepsilon_q \omega \end{vmatrix} = -\varepsilon_q^2 \omega^2 - (\omega_0^2 - \omega^2)^2$$

$$\Delta A = \begin{vmatrix} k & \omega_0^2 - \omega^2 \\ 0 & \varepsilon_q \omega \end{vmatrix} = k\varepsilon_q \omega \rightarrow A = \frac{\Delta A}{\Delta} = \frac{-k\varepsilon_q \omega}{\varepsilon_q^2 \omega^2 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2}$$

$$\Delta B = \begin{vmatrix} -\varepsilon_q \omega & k \\ \omega_0^2 - \omega^2 & 0 \end{vmatrix} = -k(\omega_0^2 - \omega^2) \rightarrow B = \frac{\Delta B}{\Delta} = \frac{-k(\omega_0^2 - \omega^2)}{\varepsilon_q^2 \omega^2 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2}$$

$$\varphi_n(t) = \frac{-k\varepsilon_q \omega}{\varepsilon_q^2 \omega^2 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2} \cos \omega t - \frac{k(\omega_0^2 - \omega^2)}{\varepsilon_q^2 \omega^2 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2} \sin \omega t =$$

$$= \frac{-k}{\varepsilon_q^2 \omega^2 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2} (\varepsilon_q \omega \cos \omega t + (\omega_0^2 - \omega^2) \sin \omega t)$$

Загальний розв'язок диференційного рівняння (3.2) матиме вигляд

$$\varphi(t) = e^{\left(\frac{-\varepsilon_q}{2}\right)t} (C_1 \cos \Omega_0 t + C_2 \sin \Omega_0 t) - \frac{k}{\varepsilon_q^2 \omega^2 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2} (\varepsilon_q \omega \cos \omega t + (\omega_0^2 - \omega^2) \sin \omega t)$$

Коефіцієнти C_1, C_2 визначаються із початкових умов $\varphi_0(0) = \varphi_0$, $\dot{\varphi}_0(0) = \dot{\varphi}_0$.

Як видно із отриманого рівняння, вільні коливання

$\varphi_0(t) = e^{\left(\frac{-\varepsilon_q}{2}\right)t} (C_1 \cos \Omega_0 t + C_2 \sin \Omega_0 t)$ будуть затухати із часом, а вимушені

коливання $\varphi_n = -\frac{k}{\varepsilon_q^2 \omega^2 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2} (\varepsilon_q \omega \cos \omega t + (\omega_0^2 - \omega^2) \sin \omega t)$ будуть постійно

присутніми і визначатися характеристиками власного судна і зовнішнього впливу.

Перепишемо вираз $\varepsilon_q \omega \cos \omega t + (\omega_0^2 - \omega^2) \sin \omega t$ у вигляді

$$\begin{aligned}
\varepsilon_q \omega \cos \omega t + (\omega_0^2 - \omega^2) \sin \omega t &= A \sin(\omega t + \Delta\varphi) \\
A \sin \omega t \cos \Delta\varphi + A \sin \Delta\varphi \cos \omega t &= \varepsilon_q \omega \cos \omega t + (\omega_0^2 - \omega^2) \sin \omega t \\
A \cos \Delta\varphi &= (\omega_0^2 - \omega^2) \\
A \sin \Delta\varphi &= \varepsilon_q \omega \\
A^2 (\cos^2 \Delta\varphi + \sin^2 \Delta\varphi) &= (\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\varepsilon_q \omega)^2 \rightarrow A = \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\varepsilon_q \omega)^2} \\
\frac{A \sin \Delta\varphi}{A \cos \Delta\varphi} &= \frac{\varepsilon_q \omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \rightarrow \Delta\varphi = \arctan\left(\frac{\varepsilon_q \omega}{\omega_0^2 - \omega^2}\right) \\
\varphi_n &= -\frac{k}{\varepsilon_q^2 \omega^2 + (\omega_0^2 - \omega^2)^2} \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\varepsilon_q \omega)^2} \sin(\omega t + \Delta\varphi) \\
\varphi_n &= -\frac{k}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\varepsilon_q \omega)^2}} \sin(\omega t + \Delta\varphi) \tag{3.8}
\end{aligned}$$

Щоб максимальний крен не перевищував φ^{\max} , із рівняння (3.8) знаходимо

$$\begin{aligned}
\frac{k}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\varepsilon_q \omega)^2}} &\leq \varphi^{\max} \\
k &\leq \varphi^{\max} \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\varepsilon_q \omega)^2}, \tag{3.9}
\end{aligned}$$

тобто амплітуда зовнішнього впливу не повинна перевищувати значення максимального крену, помноженого на $\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\varepsilon_q \omega)^2}$.

Із рівняння (3.9) видно, що чим більший коефіцієнт демпфування ε та чим більше відрізняються частоти вільних ω_0 і вимушених ω коливань, тим більша амплітуда зовнішнього впливу може бути. Найменша допустима амплітуда зовнішнього впливу за наявності резонансу $\omega = \omega_0$. У цьому випадку нерівність (3.9) матиме вигляд

$$k \leq \varphi^{\max} \varepsilon_q \omega. \tag{3.10}$$

На (Рис. 3.2) наведено приклад гармонійного процесу з демпфуванням.

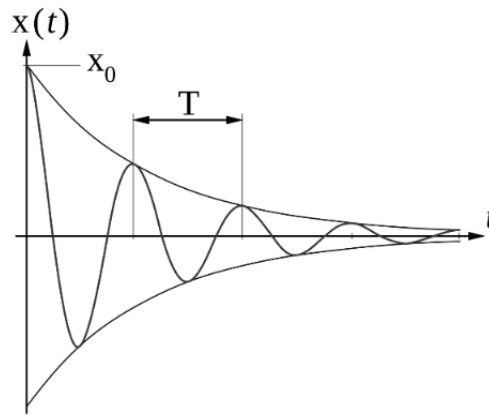


Рис. 3.2 – Приклад гармонійного процесу з демпфуванням

Нерівність (3.10) визначає допустимі амплітуди k гармоніки $\sin \omega t$ хвилювання, які не призведуть до перевищення максимального кута крену, навіть за наявності резонансу. Це означає, що гармоніки спектру, амплітуда коливань яких задовільняє умові (3.10), можуть не враховуватися при побудові небезпечних резонансних областей, що спрощує побудову та розширює безпечні області.

Роботу блоку швидкого перетворення Фур'є та блоку вибору значущих складових спектру перевірено математичним моделюванням у середовищі MATLAB. На рис. 3.16 наведено графік зміни у часі вимірної кутової швидкості судна у каналі крену під час хвилювання, з накладеним випадковим шумом (Рис. 3.3).

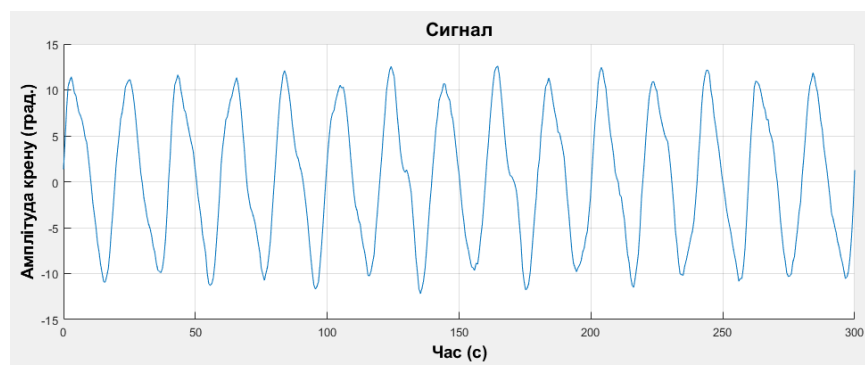


Рис. 3.3 – Графік зміни у часі амплітуди крену судна

Використовуючи функцію швидкого перетворення Фур'є, подібну функції «fft()» середовища MATLAB, отримано спектр сигналу (Рис. 3.4). На

спектрі хвилювання нанесено максимальне значення енергії, перевищення якої однією або кількома компонентами спектру призводить до амплітуди коливань судна, більшої за максимальну. Амплітуди, які не перевищують максимальне значення k , не призводять до перевищення допустимого кутового відхилення у каналі керування через наявність демпфування і тому можуть не враховуватися у подальшому при побудові резонансної зони.

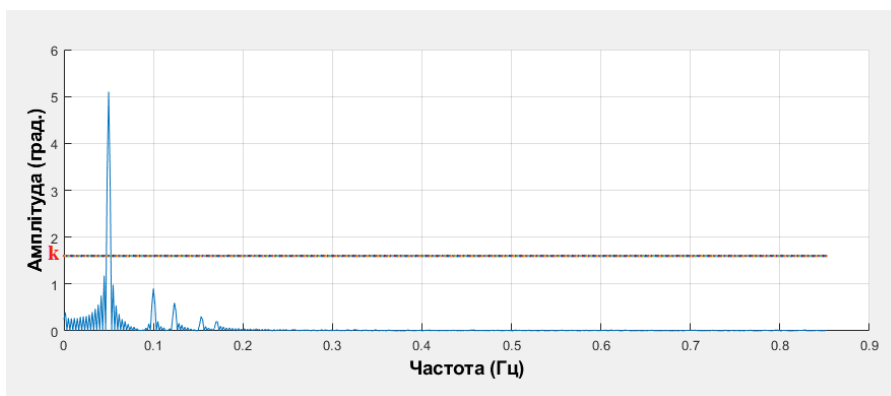


Рис. 3.4 – Спектр сигналу зовнішнього впливу

3.3. Візуалізація небезпечних областей штормування судна

Важливими характеристиками судна, що характеризують його чутливість до частоти зовнішніх впливів, є період власних коливань в каналах крену і диференту.

$$\begin{cases} T_B \approx \frac{kB}{\sqrt{h}} \\ T_L \approx 2,8\sqrt{\chi d} \end{cases}, \quad (3.11)$$

де k - коефіцієнт пропорційності, який дорівнює 0.81 для вантажних суден, B [m] – ширина судна, h [m] – метацентрична висота, χ - відношення коефіцієнту повноти судна до коефіцієнту повноти ватерлінії, d [m] – осадка судна. Коливання у каналі крену і диференту збуджуються вимушеними коливаннями хвиль. За відсутності руху судна, період вимушених коливань співпадає з періодом хвиль. При наявності руху судна, період вимушених коливань відрізняється від періоду хвиль, за рахунок зміни швидкості хвиль відносно судна на величину швидкості судна. Цей період вимушених коливань

називають уявним періодом хвилі. Уявний період хвилі τ залежить від довжини хвилі λ , швидкості судна V і курсового кута набігання хвилі на діаметральну площину q . Цей кут є фактично кутом між курсом поширення хвилі і курсом судна

$$\tau = \frac{\lambda}{C + V \cos q} \quad (3.12)$$

Якщо врахувати, що

$$\lambda \approx \frac{2\pi}{g} C^2 \rightarrow C \approx \sqrt{\frac{g}{2\pi}} \lambda \approx 1,25\sqrt{\lambda}, \quad (3.13)$$

рівняння (3.12) прийме вигляд

$$\tau = \frac{\lambda}{1,25\sqrt{\lambda} + V \cos q}. \quad (3.14)$$

Візуалізація області допустимих швидкостей судна у координатах $e \sin q - e \cos q$. Область допустимих швидкостей судна визначається нерівністю

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max}, \quad (3.15)$$

де V_{\max}, V_{\min} - відповідно максимальна і мінімальна швидкості судна.

Розділимо нерівність (3.15) на V_{\max}

$$e_{\min} \leq e \leq 1, \quad (3.16)$$

де $e = \frac{V}{V_{\max}}$, $e_{\min} = \frac{V_{\min}}{V_{\max}}$ - приведена швидкість та приведена мінімальна швидкість. У шторм максимальна швидкість суттєво зменшується і знаходиться у межах $V_{\min} \leq V \leq V_{\max}^{st}$, або, для приведених швидкостей

$$e_{\min} \leq e \leq e_{\max}^{st} \quad (3.17)$$

У координатах $e \sin q - e \cos q$ нерівності (3.16), (3.17) матимуть вигляд

$$e_{\min} \leq |e| \leq 1 \quad (3.18)$$

$$e_{\min} \leq |e| \leq e_{\max}^{st}, \quad (3.19)$$

на (Рис. 3.5) область (3.18) обмежена колом радіуса $e_{\max}=1$ і колом радіуса e_{\min} а область (3.17) обмежена колом радіуса e_{\max}^{st} і колом радіуса e_{\min} .

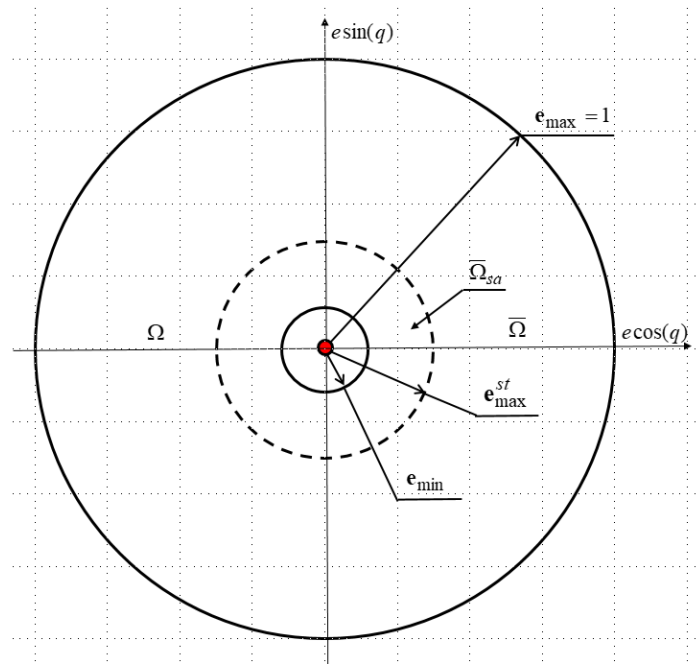


Рис. 3.5 – Области допустимих швидкостей судна

Візуалізація області гармонійного резонансу. Гармонійний резонанс виникає і розвивається, коли період вільних коливань судна у каналах крену співпадає з періодом вимушених коливань або близький до нього [62]. Вважається, що гармонійний резонанс розвивається за умови

$$\begin{cases} 0,7 \leq \frac{T_B}{\tau} \leq 1,3 \\ 0,7 \leq \frac{T_C}{\tau} \leq 1,3 \end{cases} \quad (3.20)$$

де T_C - період вільних коливань у каналі крену або диференту.

Із врахуванням (3.14), нерівність (3.20) може бути переписані у вигляді

$$0,7 \frac{\lambda}{T_C} - 1,25\sqrt{\lambda} \leq V \cos q \leq 1,3 \frac{\lambda}{T_C} - 1,25\sqrt{\lambda}, \quad (3.21)$$

або у приведених координатах

$$\frac{1}{V_{\max}} \left(0,7 \frac{\lambda}{T_C} - 1,25\sqrt{\lambda} \right) \leq e \cos q \leq \frac{1}{V_{\max}} \left(1,3 \frac{\lambda}{T_C} - 1,25\sqrt{\lambda} \right) \quad (3.22)$$

На (Рис. 3.6) показана залежність правої (синім кольором) і лівої (червоним кольором) межі області гармонійного резонансу Ω від довжини хвилі λ для судна із періодом вільних коливань у каналі крену $T_C = T_B = 12,5$ с.

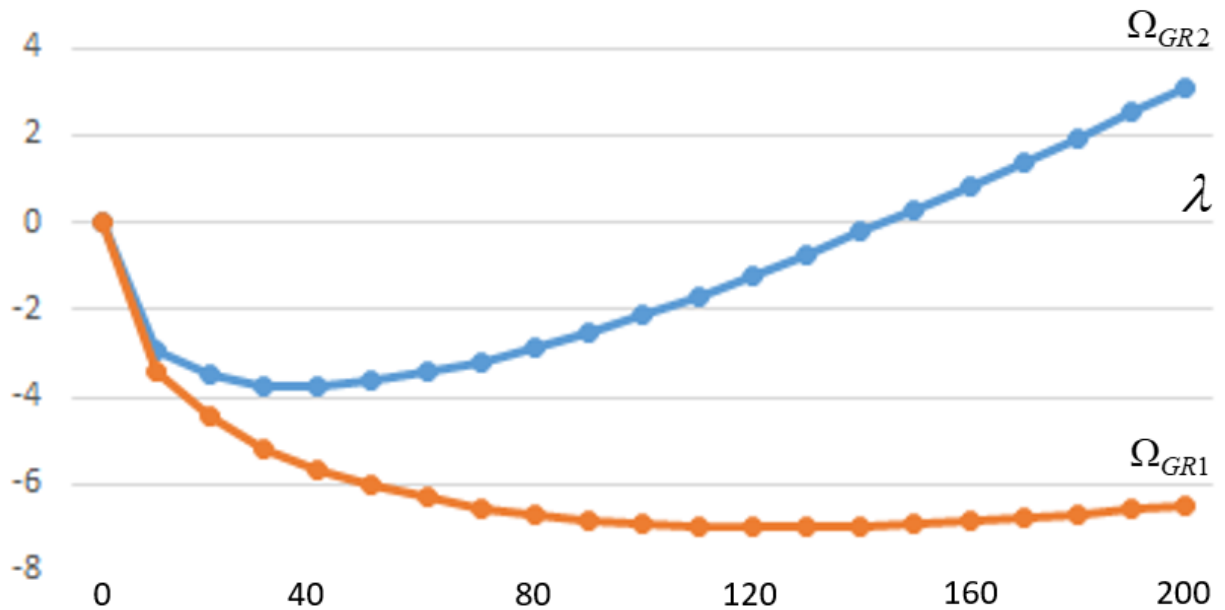


Рис. 3.6 – Залежність правої і лівої межі області гармонійного резонансу від довжини хвилі

На (Рис. 3.7) нанесена область гармонійного резонансу Ω у приведених координатах $e \sin q - e \cos q$ для судна із періодом власних коливань у каналі крену $T_C = T_B = 12,5$ с. та довжини хвилі $\lambda = 120$ м. Як видно із (Рис. 3.7), одиничне коло $e_{\max} = 1$, що обмежує область можливих значень приведеної швидкості і курсу, розділено на дві частини: резонансну зону Ω і нерезонансну зону $\bar{\Omega}$. Також нанесена область можливих значень приведеної швидкості і курсу в шторм $e_{\min} \leq |e^{st}| \leq e_{\max}^{st}$.

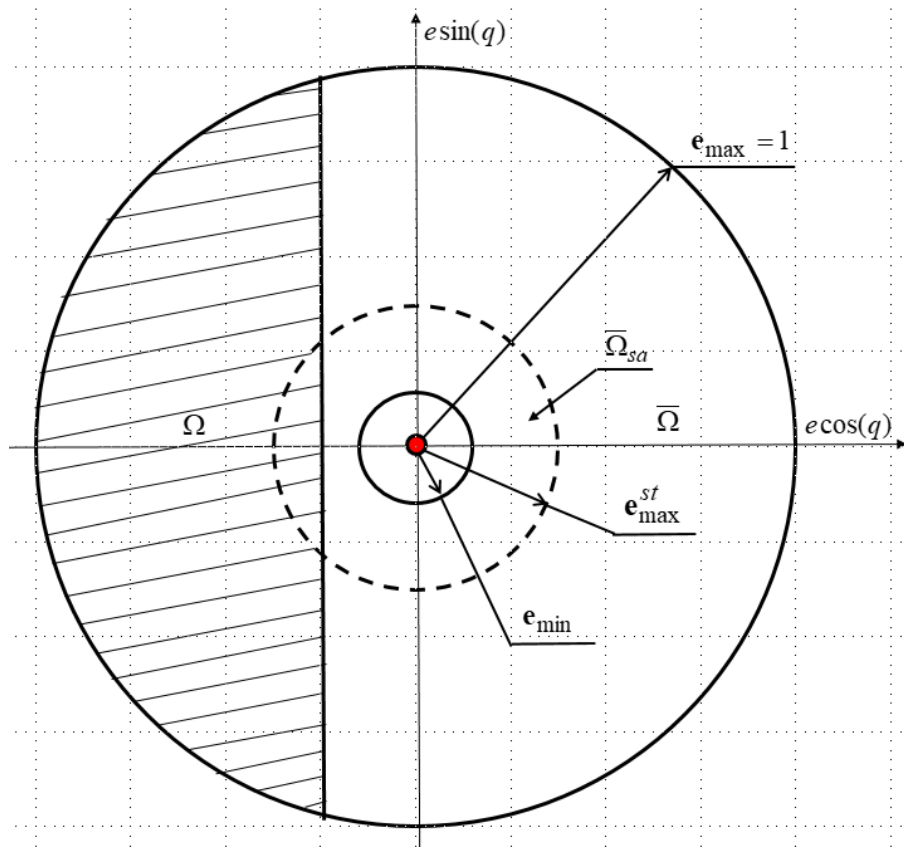


Рис. 3.7 – Область гармонійного резонансу Ω у приведених координатах

Можливі чотири випадки взаємного розміщення резонансної зони Ω і безпечної області штормування $\bar{\Omega}_{sa}$: $e_{\min} \leq |e^{st}| \leq e_{\max}^{st}$: область $\bar{\Omega}_{sa}$ повністю лежить у резонансній зоні. У цьому випадку безпечні параметри штормування відсутні; Область $\bar{\Omega}_{sa}$ повністю лежить поза резонансною зоною Ω . У цьому випадку безпечні параметри штормування лежать в області $\bar{\Omega}_{sa}$; область $\bar{\Omega}_{sa}$ перетинає одну сторону резонансної зони, як показано на (Рис. 3.7). У цьому випадку допустима область параметрів штормування обмежується цією стороною резонансної зони і областю $\bar{\Omega}_{sa}$; область $\bar{\Omega}_{sa}$ перетинає дві межі резонансної зони. У цьому випадку є дві безпечні області параметрів штормування, одна з яких обмежена лівою стороною резонансної зони і областю $\bar{\Omega}_{sa}$, а інша обмежена правою стороною резонансної зони і областю $\bar{\Omega}_{sa}$. Ці області розділені резонансною зоною і перехід з однієї області в іншу неможливий. У всіх розглянутих випадках безпечна область параметрів

штормування $\bar{\Omega}_{sa}$ набагато менша, ніж нерезонансна зона $\bar{\Omega}$, так як її радіус обмежується не максимальною швидкістю судна, а максимальною швидкістю судна в шторм, яка може бути значно меншою максимальної швидкості судна.

Візуалізація областей параметричного резонансу.

Параметричний резонанс призводить до різкого збільшення амплітуди крену через періодичну зміну остійності на вершинах і впадинах хвиль. Найбільш небезпечним є параметричний резонанс, коли період власних коливань судна вдвічі більший періоду хвиль [51]. У цьому випадку остійність судна зменшується до мінімальної два рази за період коливання, ситуація характеризується симетричними коливаннями.

$$\frac{T_C}{\tau} = 2. \quad (3.23)$$

Із врахуванням (3.14), рівняння (3.23) матиме вигляд

$$V \cos q = \left(2 \frac{\lambda}{T_C} - 1,25\sqrt{\lambda} \right), \quad (3.24)$$

або у приведених координатах

$$e \cos q = \frac{1}{V_{\max}} \left(2 \frac{\lambda}{T_C} - 1,25\sqrt{\lambda} \right). \quad (3.25)$$

Можливе також виникнення параметричного резонансу, коли період власних коливань судна збігається з періодом хвиль, остійність судна зменшується до мінімальної один раз за період коливання, ситуація характеризується асиметричними коливаннями, коли амплітуди крену у різні боки відрізняються одна від одної

$$T_C = \tau. \quad (3.26)$$

Із врахуванням (3.14), рівняння (3.26) прийме вигляд

$$V \cos q = \left(\frac{\lambda}{T_C} - 1,25\sqrt{\lambda} \right), \quad (3.27)$$

або у приведених координатах

$$e \cos q = \frac{1}{V_{\max}} \left(\frac{\lambda}{T_C} - 1,25\sqrt{\lambda} \right). \quad (3.28)$$

На (Рис. 3.8) показана залежність (3.24) (червоним кольором) та (3.27) (синім кольором) положення областей параметричного резонансу від довжини хвилі λ для судна із періодом вільних коливань у каналі крену $T_C = T_B = 12,5$ с.

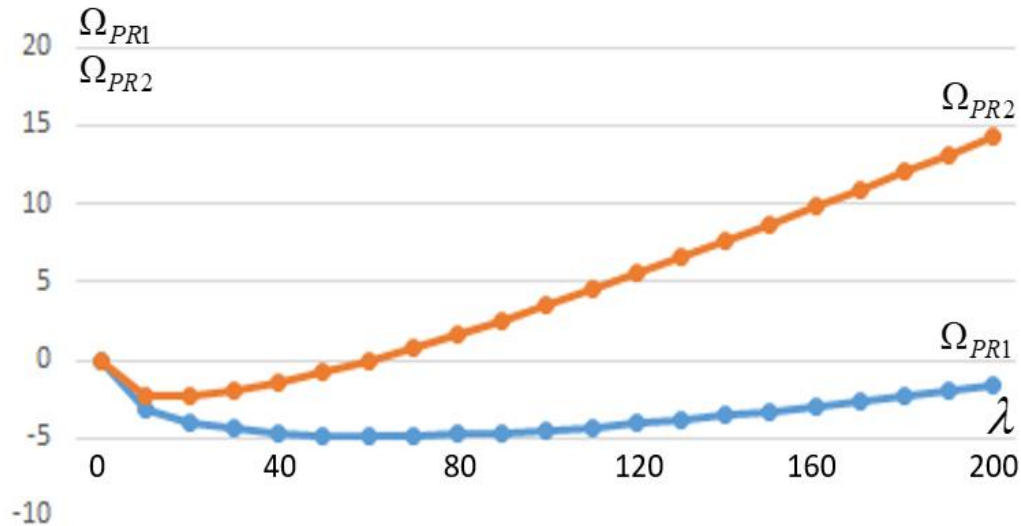


Рис. 3.8 – Залежність положення областей параметричного резонансу від довжини хвилі

На рис.3.8 нанесені області параметричного резонансу у приведених координатах $e \sin q - e \cos q$ для судна із періодом власних коливань $T_B = 12,5$ с. та довжини хвилі $\lambda = 120$ м.

Як видно із (Рис. 3.8), та (Рис. 3.9), для довжини хвилі $\lambda = 120$ м, положення лінії (3.25) $e \cos q = 1,1$ і область Ω_{PR2} параметричного резонансу першого типу знаходиться поза межами області допустимих параметрів руху судна. Положення лінії (3.28) $e \cos q = -0,8$ і область Ω_{PR1} параметричного резонансу другого типу лежить у межах області гармонійного резонансу. При попаданні фазової точки у цю область, гармонійний резонанс може перерости у більш небезпечний параметричний резонанс.

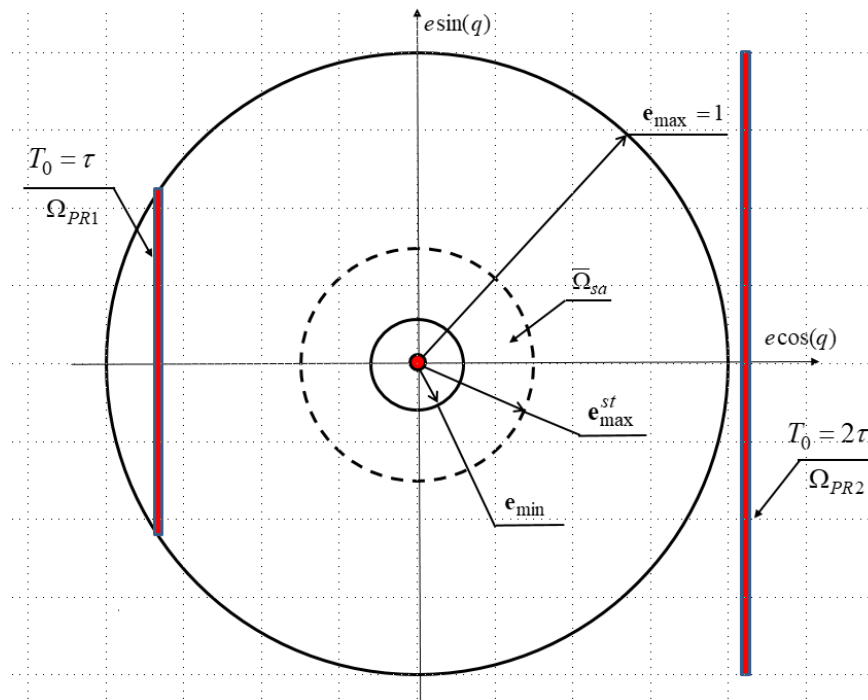


Рис. 3.9 – Области параметричного резонансу у приведених координатах

Візуалізація області втрати остійності на попутному хвилюванні.

Втрата остійності на попутному хвилюванні відбувається через значне зменшення підводного об'єму корпусу судна і відновлюючого моменту. Це може статися за наступних умов: курс судна співпадає із курсом поширення хвилі; швидкість судна співпадає із швидкістю поширення хвилі і довжина судна співпадає із довжиною хвилі. Умову втрати остійності на попутньому хвилюванні можна записати у вигляді наступної системи рівнянь

$$\begin{cases} \lambda = L \\ V = C \\ K = K_w \pm 180^0 \end{cases}, \quad (3.29)$$

із третього рівняння системи (3.29) випливає, що кут набігання хвилі на діаметральну площину судна становить $q = K - K_w = \pm 180^0$. Тоді $V \cos q = V \cos(\pm 180^0) = -V$. Із врахуванням другого рівняння, системи (3.29), отримуємо $V \cos q = -C$. Враховуючи також перше рівняння системи (3.29), небезпечна область втрати остійності на попутньому хвилюванні визначається як

$$V \cos q = -C(\lambda = L), \quad (3.30)$$

або у приведених координатах

$$e \cos q = -\frac{C(\lambda = L)}{V_{\max}} \quad (3.31)$$

де $C(\lambda = L)$ - швидкість хвилі, коли її довжина дорівнює довжині судна.

На (Рис. 3.10) наведено графік залежності (3.13) швидкості поширення хвилі від довжини хвилі λ . Із графіка видно, що для довжини судна і хвилі $L = \lambda = 120\text{м}$, швидкість поширення хвилі $C(\lambda = 120) = 13,9\text{м}$, а приведена

швидкість $\frac{C(\lambda = 120)}{V_{\max}} = 2,75$.

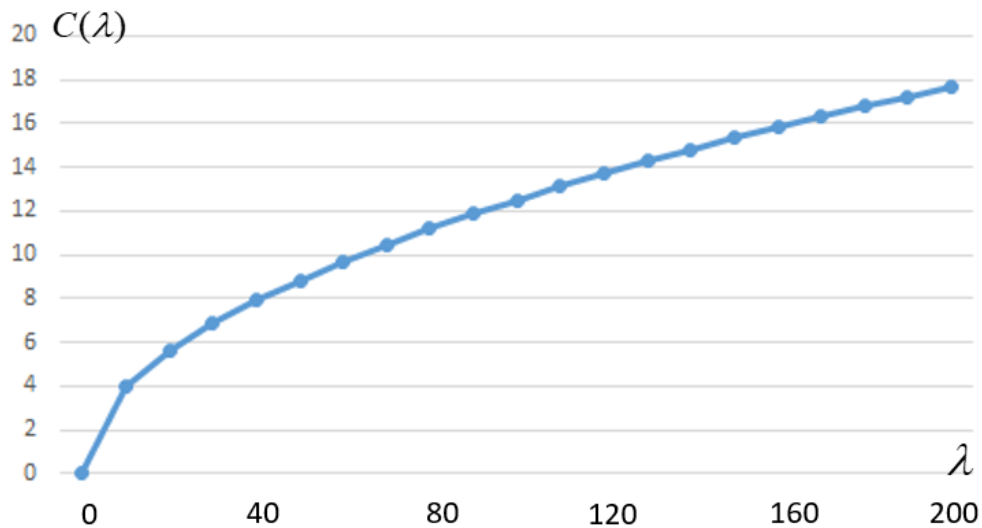


Рис. 3.10 – Залежність швидкості поширення хвилі від довжини хвилі

Із рівняння (3.31) отримуємо положення області Ω_{LS} втрати остійності на попутному хвилюванні

$$e \cos q = -2,75. \quad (3.32)$$

На рис.3.10 нанесена область Ω_{LS} втрати остійності на попутному хвилюванні у приведених координатах $e \sin q - e \cos q$ для судна із періодом власних коливань у каналі крену $T_C = T_B = 12,5$ с. та довжини хвилі $\lambda = 120\text{м}$

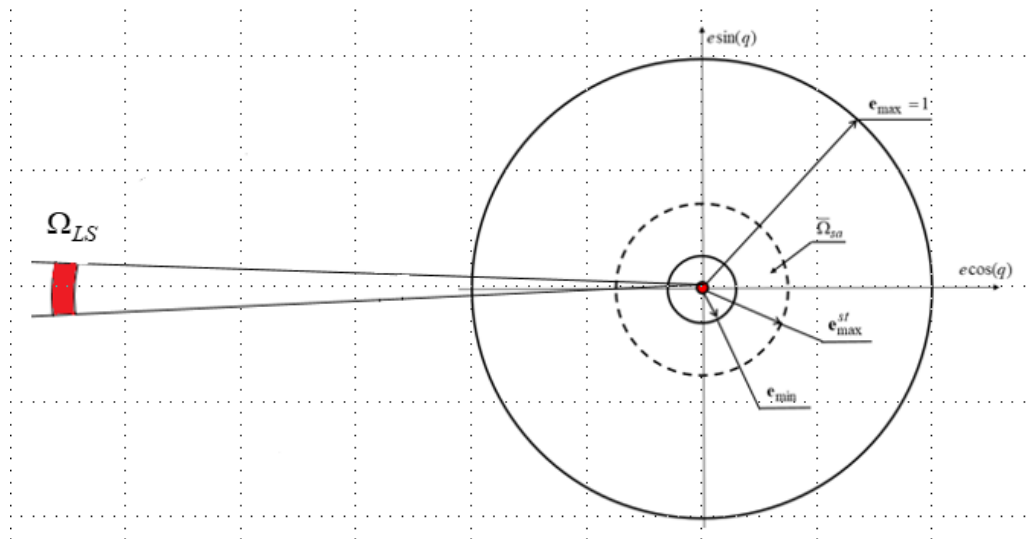


Рис. 3.11 – Область втрати остійності на попутному хвилюванні

Як видно із рівняння (3.32) і (Рис. 3.11), область Ω_{LS} знаходиться далеко поза межами області можливих параметрів руху судна.

Візуалізація області брочингу. Брочинг часто призводить до втрати керування під час прискореного сповзання по крутому передньому краю високої хвилі. Це надзвичайно небезпечне явище, оскільки судно втрачає керованість і різко розвертається з великою кутовою швидкістю, повертаючись бортом до хвилі, що призводить до миттєвого перевертання. Брочинг виникає за умови [31, 33]

$$\begin{cases} \frac{V \cos(180 - q)}{\sqrt{L}} \geq 1,4, \\ 135^\circ \leq q \leq 225^\circ \end{cases}, \quad (3.33)$$

із першого рівняння нерівності (3.33) знаходимо

$$-V \cos q \geq 1,4\sqrt{L} \rightarrow V \cos q \leq -1,4\sqrt{L}, \quad (3.34)$$

або у приведених координатах

$$e \cos q \leq -\frac{1,4\sqrt{L}}{V_{\max}} \quad (3.35)$$

На (Рис. 3.12) нанесена область Ω_{BR} брочингу у приведених координатах $e \sin q - e \cos q$ для судна довжиною $L=114\text{м}$ і максимальною швидкістю $V_{\max} = 5\text{м/с}$

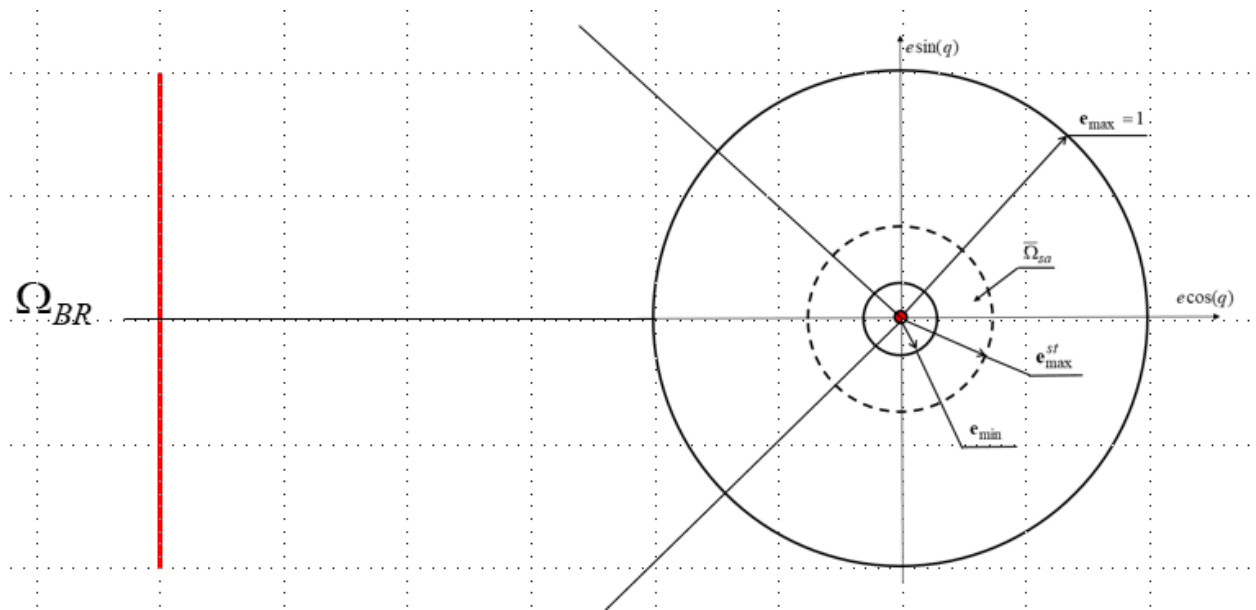


Рис. 3.12 – Область брочингу

Як видно із рівняння (3.35) і рис.3.11, область Ω_{BR} знаходиться далеко поза межами області можливих параметрів руху судна.

Візуалізація області ударів групових хвиль в корму. Коли хвилі набігають на судно з корми і їхня швидкість дещо перевищує швидкість судна, судно зазнає періодичних і сильних ударів хвиль в корму, що може привести до втрати керованості і навіть поломки гвинто-рульових пристроїв системи керування судном. Область Ω_{GW} параметрів руху судна, у якій виникають небезпечні явища ударів групових хвиль в корму, визначається наступною системою нерівностей [33]

$$\begin{cases} 1,3 \leq \frac{V \cos(180 - q)}{T_W} \leq 2 \\ 135^\circ \leq q \leq 225^\circ \end{cases}, \quad (3.36)$$

де V - швидкість судна у вузлах, або

$$\begin{cases} 1,3 \leq \frac{-1,95V \cos q}{T_W} \leq 2 \\ 135^\circ \leq q \leq 225^\circ \end{cases} \rightarrow \begin{cases} -1,02T_W \leq V \cos q \leq -0,67T_W \\ 135^\circ \leq q \leq 225^\circ \end{cases}, \quad (3.37)$$

де V - швидкість судна у м/с.

Із формули $\lambda = CT_W$ знаходимо $T_W = \frac{\lambda}{C}$. Враховуючи, що $C \approx \sqrt{\frac{g}{2\pi}} \lambda$,

$T_W = \sqrt{\frac{2\pi}{g}} \lambda$, із першої нерівності системи (3.36) отримуємо

$$-1,02 \sqrt{\frac{2\pi}{g}} \lambda \leq V \cos q \leq -0,67 \sqrt{\frac{2\pi}{g}} \lambda \rightarrow -0,817 \sqrt{\lambda} \leq V \cos q \leq -0,54 \sqrt{\lambda} \quad (3.38)$$

На (Рис. 3.13) наведені залежності (3.38) верхньої Ω_{GW1} і нижньої Ω_{GW2} межі області ударів групових хвиль в корму від довжини хвилі.

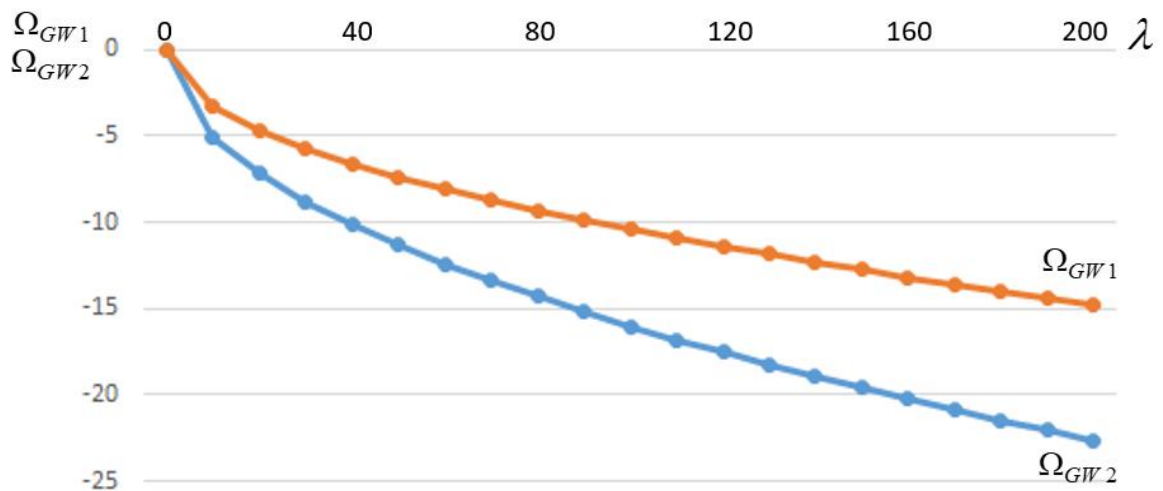


Рис. 3.13 – Залежність верхньої і нижньої межі області ударів групових хвиль в корму від довжини хвилі

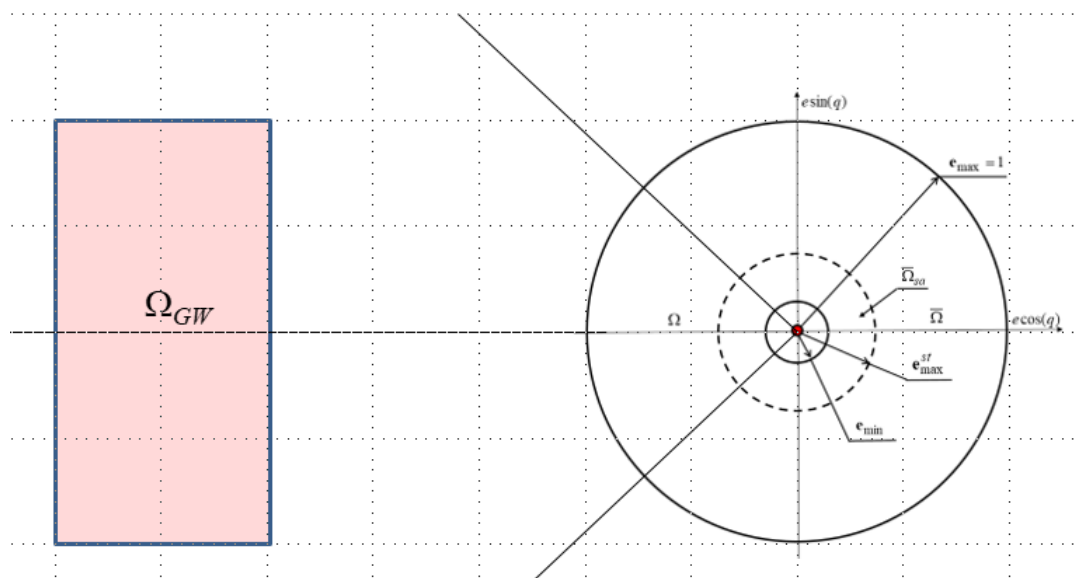


Рис. 3.14 – Область ударів групових хвиль у корму у приведених координатах для довжини хвилі $\lambda = 120\text{м}$

На (Рис. 3.14) нанесена область Ω_{GW} у приведених координатах $e \sin q - e \cos q$ для довжини хвилі $\lambda = 120 \text{ м}$.

3.4. Метод оптимального переміщення фазової точки у безпечну зону

Після розрахунку безпечної швидкості V^* і курсу K^* , судноводій переміщує телеграф і штурвал у нове положення для зміни поточних параметрів руху судна $V(t), K(t)$ на безпечні. При цьому, траєкторія переміщення фазової точки AD із поточного положення $A\{e_1 \cos q_1, e_1 \sin q_1\}$ у кінцеве положення $D\{e_2 \cos q_2, e_2 \sin q_2\}$ не контролюється. Результати моделювання показують, що фазова точка може тривалий час знаходитися у небезпечній зоні Ω , (Рис. 3.15). У розглянутому випадку час переміщення становив 90с.

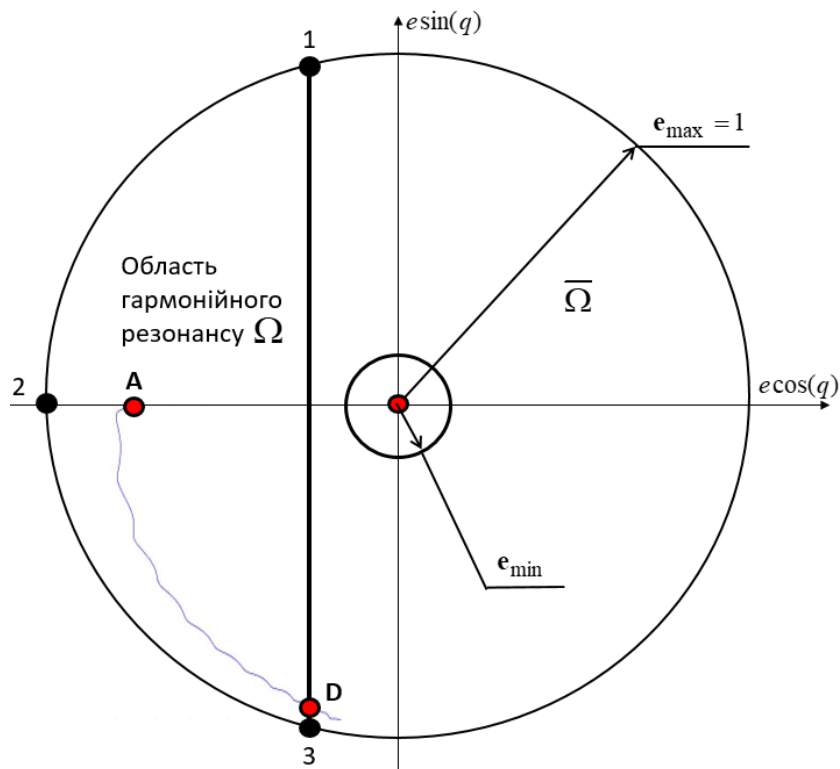


Рис. 3.15 – Переміщення фазової точки по області гармонійного резонансу

На (Рис. 3.16) показано у збільшеному масштабі фактичний шлях виходу фазової точки із резонансної зони і можливий найкоротший шлях, який може бути значно коротшим.

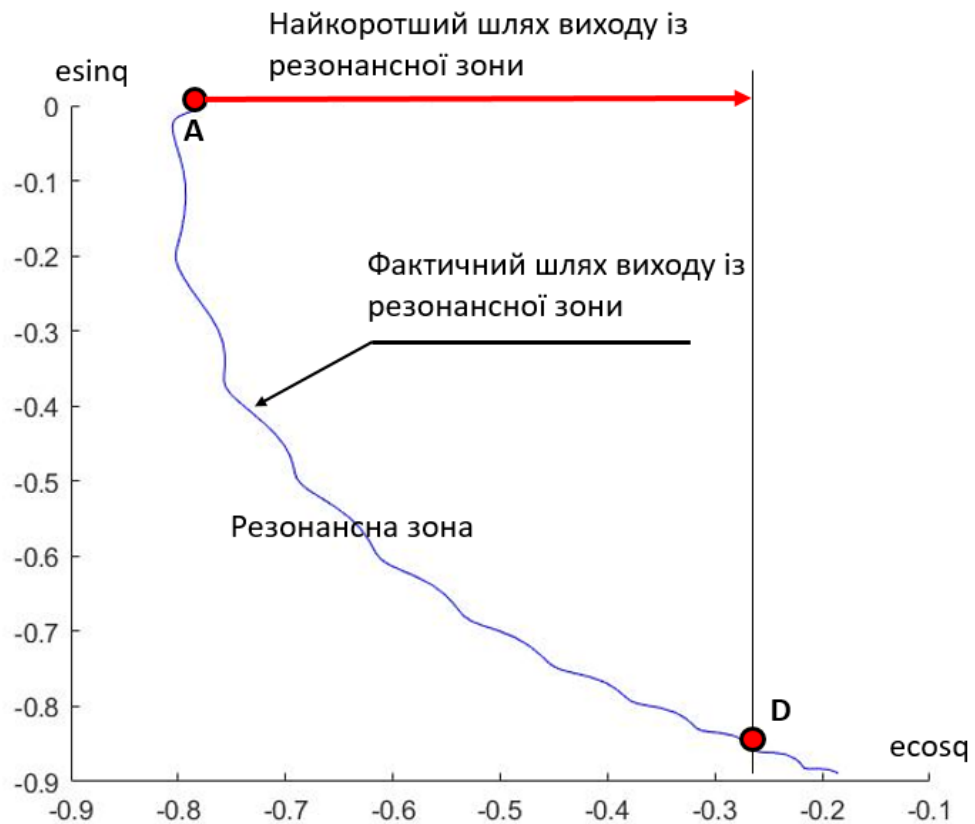


Рис. 3.16 – Фактичний і найкоротший шлях виходу із резонансної зони

Для визначення найкоротшого шляху необхідно вирішити оптимізаційну задачу переводу фазової точки за межі резонансної зони із закріпленим лівим і вільним правим кінцем. Оптимізація траєкторії досягається належним вибором закону керування $f(e(t), q(t))$ рухом фазової точки

$$\begin{aligned}
 S^*({e_1 \cos q_1, e_1 \sin q_1}, {e_2 \cos q_2, e_2 \sin q_2}) = \\
 = \min_{f(e(t), q(t))} S({e_1 \cos q_1, e_1 \sin q_1}, {e \cos q, e \sin q})
 \end{aligned}
 \quad (3.39)$$

У попередньому розділі 3.3 розглянуто випадок, коли період вільних коливань судна у каналі крену становив $T_C = T_B = 12,5 \text{ с.}$, а довжина хвилі $\lambda = 120 \text{ м.}$ При цьому, у області можливих параметрів штормування знаходилася лише частина області гармонійного резонансу (Рис. 3.6). У

загальному випадку, звичайно, можуть бути і інші небезпечні області. Усі вони, як видно із наведеного раніше матеріалу, мають форму прямокутника, більша сторона якого паралельна осі $e \sin q$ приведеної системи координат. Це значно спрощує задачу (3.39), оптимальним рішенням якої буде рух фазової точки перпендикулярно вертикальній границі небезпечної зони. На (Рис. 3.17) зображені можливі фазові переходи із поточної точки 1 у точку 3, що знаходиться у безпечній області $\overline{\Omega}_{sa}$

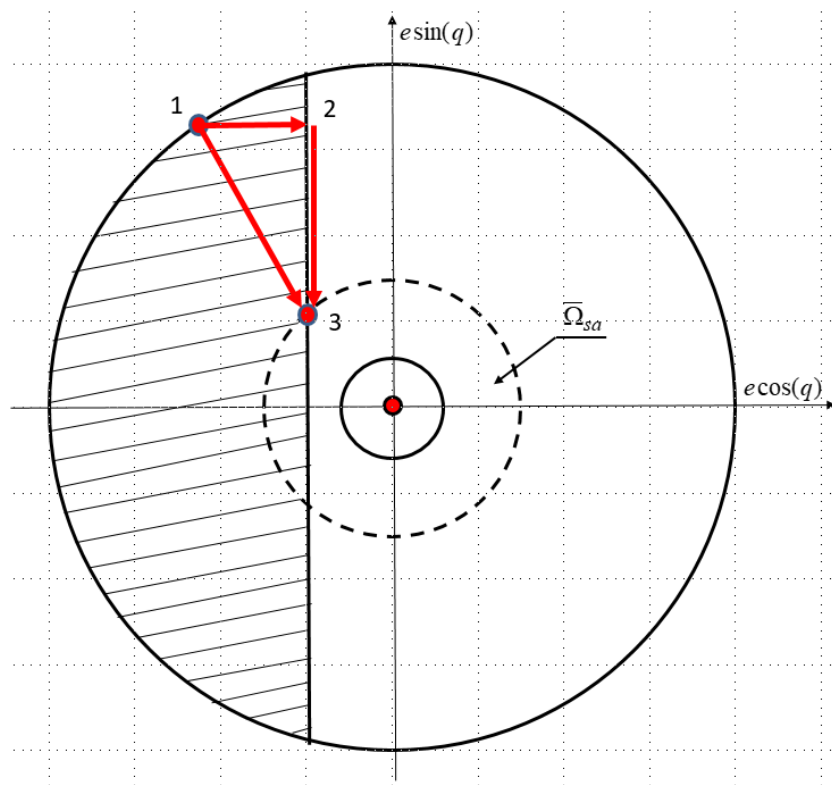


Рис. 3.17 – Можливі фазові переходи у безпечну область

Фазовий перехід 1-3 найкоротший по довжині, але не найкоротший у часі перебування фазової точки в зоні гармонійного резонансу. Перехід 1-2-3 у безпечну область $\overline{\Omega}_{sa}$ більший по довжині, але час перебування в зоні гармонійного резонансу втричі менша. Очевидно що перехід 1-2-3 з точки зору безпеки буде оптимальним, так як забезпечує найменший час перебування фазової точки в небезпечній зоні. Перехід 1-2 відбувається по горизонтальній лінії

$$e(t) \sin q(t) = \text{const} = e_1 \sin q_1, \quad (3.40)$$

де e_1 - приведена швидкість у т.1., q_1 - кут набігання хвилі у т.1.

Із рівняння (3.40) знаходимо залежність приведеної швидкості $e(t)$ від кута набігання хвилі $q(t)$

$$e(t) = \frac{e_1 \sin q_1}{\sin q(t)}. \quad (3.41)$$

Кут набігання хвилі на діаметральну площину судна визначається як різниця курсів судна і хвилі $q(t) = K(t) - K_W \pm 180^0$. Зміна курсу судна для виходу із небезпечної зони викликає зміну кута набігання хвилі $q(t)$. Якщо поточному значенню кута набігання хвилі ставити у відповідність приведену швидкість $e(t)$, розраховану за формулою (3.41), то це забезпечить рух фазової точки по горизонтальній лінії 1-2.

Перехід 2-3 відбувається по вертикальній лінії

$$e(t) \cos q(t) = \text{const} = e_2 \cos q_2, \quad (3.42)$$

де e_2 - приведена швидкість у т.2., q_2 - кут набігання хвилі у т.2.

Із рівняння (3.42) знаходимо залежність приведеної швидкості $e(t)$ від кута набігання хвилі $q(t)$

$$e(t) = \frac{e_2 \cos q_2}{\cos q(t)}, \quad (3.43)$$

значення $e_2 \cos q_2 = GR_2$, тому формула (3.43) прийме вигляд

$$e(t) = \frac{GR_2}{\cos q(t)} \quad (3.44)$$

3.5. Моделювання процесу оптимального переміщення фазової точки у безпечну зону

Моделювання проводилося для тих же умов руху і хвилювання, для яких отримана траєкторія AD, зображена на рис. 3.14, 3.15, а саме: початкова швидкість судна $V(0) = 4,1 \text{ м/с}$, початковий курс судна $K(0) = 0 \text{ град}$ швидкість хвилі $C = 13,7 \text{ м/с}$, курс хвилі $K_W = 0 \text{ град/с}$ (попутне хвилювання), довжина хвилі $\lambda = 120 \text{ м}$, кут набігання хвилі $q(0) = K(0) - K_W + 180^0 = 180^0$. Для даних

умов, область гармонійного резонансу позначена контуром 1-2-3. Фазова точка у початковий момент часу знаходиться у резонансній зоні, положення $A\{e_1 \cos q_1, e_1 \sin q_1\} = A\{-0.8, 0\}$. Для виводу фазової точки за межі резонансної зони $A\{e_2 \cos q_2, e_2 \sin q_2\} = A\{-0.2, 0\}$ використовувався закон керування (3.36). Враховуючи, що для початкових умов т. А $e_1 \sin q_1 = 0$, із (3.36) знаходимо $e(t) \sin q(t) = 0$, звідки $\sin q(t) = 0$, $q(t) = \text{const} = 180$ град. Це означає, що у даному випадку оптимальним є маневр швидкістю (швидкість потрібно зменшити з $e(t) = e_1 = 0.8$ до $e(t) = e_2 = 0.2$), зберігаючи попередній курс. На (Рис. 3.18) наведені результати моделювання у середовищі MATLAB.

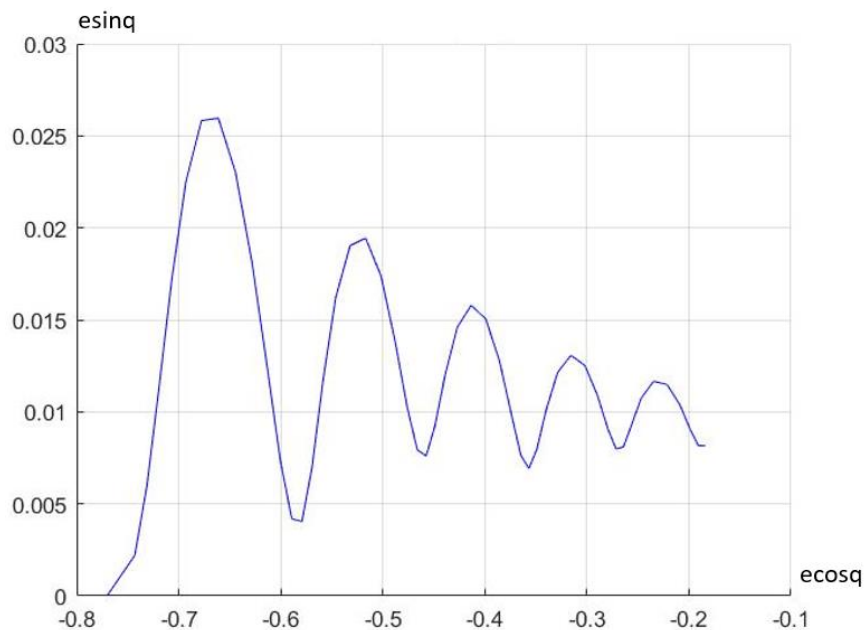


Рис. 3.18 – Результати моделювання у середовищі MATLAB

Як видно із (Рис. 3.18), фазова точка, не враховуючи резонансні коливання, рухається паралельно осі $e \cos q$ і найкоротчим шляхом перетинає межу резонансної зони $e \cos q = -0.2$. Також із (Рис. 3.18) видно, що під час руху фазової точки до межі резонансної зони $e \cos q = -0.2$, амплітуда резонансних коливань згасає. Результати проведеного моделювання також показують, що час виходу фазової точки за межі резонансної зони становить $t = 50$ с., що майже у 2 рази менше часу ($t = 90$ с.) виходу із резонансної зони по траєкторії AD, (Рис. 3.15, Рис. 3.16).

Для перевірки ефективності методу було проведено ряд експериментів на стенді імітаційного моделювання [101, 104, 105] на моделі судна «Ro-Ro passenger ferry 13». Результати експерименту порівнювалися з даними ручного керування, отриманими під час лабораторних занять з курсантами (10 проходжень кожної вправи).

У таблиці 3.1 наведені порівняльні дані, які включають середню амплітуду крену та середню тривалість перебування у небезпечній зоні.

Таблиця 3.1. Порівняльні дані експериментів та дані під час навчальних занять з ручним керуванням курсантів.

Район плавання	Ручне керування		Автоматичне керування		Відносне відхилення	
	Середня амплітуда крену, град.	Середній час знаходження в небезпечній зоні, хв	Середня амплітуда крену, град.	Середній час знаходження в небезпечній зоні, хв	амплітуда крену, %	час знаходження в небезпечній зоні, %
English Channel	20.3	9.6	8.2	4.0	-59.6%	-58.3%
English Channel	26.7	9.1	11.3	3.4	-57.7%	-62.6%
Open Sea	43.4	10.0	25.1	4.1	-42.2%	-59.0%
Середнє значення	30.1	9.6	14.9	3.8	-53.1%	-60.0%

3.6. Висновки по розділу 3

1. Розроблена структурна схема модуля автоматичного штормування.
2. Запропоновано підхід до підвищення безпеки штормування, який полягає у побудові та візуалізації сумарної небезпечної щодо перевертання судна

області, яка включає область гармонійного резонансу, параметричного резонансу, втрати остійності на попутному хвилюванні, брочинга, ударів групових хвиль в корму судна, на відміну від існуючих рішень, розглядає усі небезпеки у комплексі, автоматизує процес побудови, візуалізує сумарну область небезпек, що дозволяє зменшити вплив люського чинника та підвищити безпеку штормового плавання.

3. Розроблено метод оптимального переміщення фазової точки у безпечну область, який полягає в узгодженій зміні курсу та швидкості судна, на відміну від існуючих рішень дає можливість керувати процесом переміщення фазової точки у безпечну область, зменшує час знаходження фазової точки у небезпечній області приблизно на 60%, що дозволяє мінімізувати ризики розвитку небезпечних щодо перекидання судна явищ, автоматизувати процеси штормування, зменшити вплив люського чинника на процеси штормування, підвищити безпеку штормового плавання.

4. Набув подальшого розвитку метод побудови небезпечних областей, який полягає у вимірюванні кутової швидкості кренування; визначенні спектру хвилювання, із використанням швидкого перетворення Фур'є; визначенні значущих гармонік спектру, енергія яких перевищує енергію демпфування судна; побудові небезпечних щодо перевертання судна областей для значущих гармонік спектру; об'єднанні небезпечних областей значущих гармонік спектру у єдину область; візуалізації цієї області, на відміну від існуючих рішень, автоматизує процес побудови небезпечних областей, враховує усі суттєві складові спектру, враховує демпфування судна, що дозволяє зменшити ризики штормового плавання.

5. Сформовано формулу обчислення максимальної амплітуди гармоніки вхідного впливу $k = \varphi^{\max} \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\varepsilon_q \omega)^2}$, яка не призводить до перевищення максимального кута крену із врахуванням демпфування судна.

6. Проведено математичне моделювання у середовищі MATLAB оптимального переміщення фазової точки у безпечну область.

РОЗДІЛ 4. АВТОМАТИЧНЕ ШТОРМУВАННЯ МЕТОДОМ УМОВНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ФУНКЦІЇ ЯКОСТІ КЕРУВАННЯ

4.1. Постановка задачі умовної оптимізації при керуванні судном у шторм

Штормові умови плавання є одними із найбільш складних при плаванні на маршруті [122, 123, 83, 128, 107, 106]. Тривала хитавиця, необхідність постійної концентрації уваги сильно виснажує екіпаж та приводить до прийняття помилкових рішень. Ситуація погіршується також через те, що під час шторму значно частіше виникають такі небезпечні явища, як гармонійний та параметричний резонанси, втрата остійності на попутному хвилюванні, брочинг, удари групових хвиль у корму судна, які можуть привести до перевертання судна, збільшення деформуючих сил і моментів та руйнування корпусу. Існуючі методи ручного штормування мало ефективні, так як мають низьку точність, через застосування візуальних методів оцінювання параметрів хвилювання та ручні графічні побудови, значні затримки у часі між отриманням даних для розрахунку і визначенням безпечних параметрів руху, відсутність постійного вимірювання параметрів хвилювання і уточнення безпечних параметрів руху, складність виявлення домінуючого фактору із системи небезпечних факторів, інтуїтивне оцінювання рівня небезпеки. Система моніторингу морехідності «HULLMOS», системи підтримки прийняття рішень «OCTOPUS-DSS», «IMDSS», система оцінки оптимізації морехідності «VOSS», волоконно-оптична система «SENSFIB» та інші передбачають наявність людини у контурі керування, а разом з тим і значні затримки на прийняття рішення оператором. На думку здобувача, найкращим рішенням у даному випадку є застосування автоматичних модулів штормування у автоматизованих системах. Прикладом такого модуля є автопілот, який був впроваджений ще у позаминулому сторіччі і з успіхом використовується на сучасних суднах.

Задачею дослідження є розробка методів, алгоритмічного та програмного забезпечення модуля штормування, які дозволили б проводити безпечно від перекидання автоматичне і оптимальне штормування, суттєво зменшити вплив людського чинника на процеси штормування та підвищити безпеку судноплавства.

Поставлену задачу будемо вирішувати із застосуванням методів нелінійної оптимізації цільової функції із обмеженнями типу нерівностей

$$\begin{cases} F(V, K) \rightarrow opt \\ f_1(V, K) \leq 0 \\ f_2(V, K) \leq 0 \\ \dots \\ f_n(V, K) \leq 0 \end{cases}, \quad (4.1)$$

де $F(V, K)$ - цільова функція, що підлягає оптимізації, $f_j(V, K) \leq 0, j = 1..n$ - обмеження типу нерівностей, які визначають безпечні області штормового плавання.

Наведена цільова функція і вказані обмеження (4.1) залежать від параметрів руху судна (швидкості V та курсу K), а також від параметрів хвилювання (курсу, швидкості та довжини хвилі). Із усіх названих параметрів лише два доступні для керування – швидкість і курс судна, які і будемо використовувати для умовної оптимізації. Під умовною оптимізацією в даному розділі розуміється оптимізація з обмеженнями у вигляді нерівностей. Інші параметри, на які ми не можемо впливати під час штормового плавання (параметри хвилювання, діапазон допустимих швидкостей і курсів, тощо) використовуються як зовнішні дані при вирішенні оптимізаційної задачі.

4.2. Визначення безпечних областей штормового плавання

Для безпечного плавання потрібно забезпечити: необхідну швидкість судна для підтримування керованості, відсутність умов виникнення таких небезпечних для перекидання судна явищ як: гармонійний та параметричний

резонанси, брочинг, втрата остійності на попутному хвилюванні, удари групових хвиль в корму.

Область безпечних швидкостей судна (перше обмеження). Швидкість судна не може бути менше мінімальної V_{\min} , при якій втрачається керованість, і більше максимальної V_{\max} , яка може бути досягнута в умовах шторму [87, 24, 59]. У попередньому розділі ця область записана системою нерівностей (3.15)

$$V_{\min} \leq V \leq V_{\max}, \quad (4.2)$$

нерівність (4.2) використовується як перше обмеження системи (4.1) при вирішенні оптимізаційної задачі.

Область безпечних параметрів щодо гармонійного резонансу (друге обмеження). У попередньому розділі записана умова виникнення гармонійного резонансу (3.21). Перепишемо умову (3.21) у наступному вигляді $0,7 \leq \frac{T_C}{\lambda} (V \cos q + 1,25\sqrt{\lambda}) \leq 1,3$ [47, 130]. Тоді область безпечних параметрів щодо гармонійного резонансу матиме вигляд

$$1,3 \leq \frac{T_C}{\lambda} (V \cos q + 1,25\sqrt{\lambda}) \leq 0,7 \rightarrow 0,3 \leq \frac{T_C}{\lambda} (V \cos q + 1,25\sqrt{\lambda}) - 1 \leq -0,3$$

або

$$\left| \frac{T_C}{\lambda} (V \cos q + 1,25\sqrt{\lambda}) - 1 \right| > 0,3 \quad (4.3)$$

Курсовий кут хвилі q – кут між діаметральною площиною судна і вектором швидкості хвилі, може бути представлений як різниця курсів власного судна K і хвилі K_W , $q = K - K_W \pm 180^\circ \rightarrow \cos(K - K_W \pm 180^\circ) = -\cos(K - K_W)$.

Тоді, нерівність (4.3) може бути записана у вигляді

$$\left| \frac{T_C}{\lambda} (-V \cos(K - K_W) + 1,25\sqrt{\lambda}) - 1 \right| > 0,3 \quad (4.4)$$

Нерівність (4.4) використовується як друге обмеження системи (4.1) при вирішенні оптимізаційної задачі.

Область безпечних параметрів щодо параметричного резонансу (третє та четверте обмеження). У попередньому розділі записана умова виникнення

параметричного резонансу першого типу $\frac{T_C}{\tau} = 2$ (3.23) та умова виникнення

параметричного резонансу другого типу $\frac{T_C}{\tau} = 1$ (3.26) [129, 134, 49, 50]. Тоді,

область безпечних параметрів щодо параметричного резонансу першого та другого типу можна записати у вигляді наступної системи нерівностей

$$\begin{cases} \left| \frac{T_C}{2} - \tau \right| > \Delta T_2 \\ |T_C - \tau| > \Delta T_1 \end{cases} \quad (4.5)$$

де ΔT_2 - найбільша різниця між напів періодом власних коливань судна і уявним періодам хвиль, при якій виникає параметричний резонанс першого виду, ΔT_1 - найбільша різниця між періодом власних коливань судна і уявним періодам хвиль, при якій виникає параметричний резонанс другого виду.

Із врахуванням рівняння (3.28), область безпечних параметрів щодо параметричного резонансу можна записати у вигляді

$$\begin{cases} \left| \frac{T_C}{2} - \frac{\lambda}{1,25\sqrt{\lambda + V \cos q}} \right| > \Delta T_2 \\ \left| T_C - \frac{\lambda}{1,25\sqrt{\lambda + V \cos q}} \right| > \Delta T_1 \end{cases} \quad (4.6)$$

Система нерівностей (4.6) використовується як третє та четверте обмеження системи (4.1) при вирішенні оптимізаційної задачі.

Область безпечних параметрів щодо втрати остійності на попутному хвилюванні (п'яте обмеження). У попередньому розділі записана умова втрати остійності на попутному хвилюванні $V \cos q = -C(\lambda = L)$ (3.30) [4, 22, 23]. Тоді, область безпечних параметрів щодо втрати остійності на попутному хвилюванні можна записати у вигляді

$$|V \cos q + 1,25\sqrt{L}| > \Delta_{FS}, \quad (4.7)$$

де Δ_{FS} - найбільша різниця між швидкістю судна і швидкістю хвилі, при якій виникає втрата остійності на попутному хвилюванні.

Система нерівностей (4.7) використовується як п'яте обмеження системи (4.1) при вирішенні оптимізаційної задачі.

Область безпечних параметрів щодо брочингу (шосте обмеження). У попередньому розділі область брочинга визначена нерівністю $V \cos q \leq -1,4\sqrt{L}$ (3.34) [17]. Виходячи із цих даних, записуємо область безпечних параметрів руху щодо брочингу

$$\begin{cases} V \cos q > -1,4\sqrt{L} \\ 135 \leq q \leq 225 \end{cases} \quad (4.8)$$

Система нерівностей (4.8) використовується як шосте обмеження системи (4.1) при вирішенні оптимізаційної задачі.

Область безпечних параметрів щодо ударів групових хвиль у корму (сьоме обмеження). У попередньому розділі область небезпечних ударів групових хвиль у корму визначена нерівністю $-0,817\sqrt{\lambda} \leq V \cos q \leq -0,54\sqrt{\lambda}$ (3.38). Виходячи із даної нерівності, записуємо область безпечних параметрів руху щодо ударів групових хвиль у корму

$$\begin{cases} V \cos q < -0,82\sqrt{\lambda} \\ V \cos q > -0,54\sqrt{\lambda} \end{cases} \quad (4.9)$$

Система нерівностей (4.9) використовується як сьоме обмеження системи (4.1) при вирішенні оптимізаційної задачі.

4.3. Вирішення задачі умовної оптимізації.

У якості цільової функції може бути вибрана функція

$$F = (K^* - K_{SET})^2 \rightarrow \min, \quad (4.10)$$

яка забезпечує мінімальне відхилення безпечного курсу від заданого, або функція

$$F = (V^* - V_{SET})^2 \rightarrow \min \quad (4.11)$$

яка забезпечує мінімальне відхилення безпечної швидкості від заданої, або будь-яка інша корисна для керування функція. Екстремум цільової функції (4.10) або (4.11), із врахуванням обмежень (4.2), (4.4), (4.6), (4.7), (4.8), (4.9),

знаходився на кожному кроці бортового обчислювача модуля автоматичного штормування із використанням функції нелінійної оптимізації

Для знаходження параметрів V^* , K^* , які оптимізують цільову функцію (4.10), (4.11) з лінійними та нелінійними обмеженнями (4.2), (4.4), (4.6), (4.7), (4.8), (4.9), застосована процедура умовної нелінійної оптимізації типу *f min con* пакету MATLAB з лінійними та нелінійними обмеженнями у вигляді нерівностей

$$f \text{ min con} (@ \text{ fun}, \mathbf{x0}, \mathbf{A}, \mathbf{b}, \mathbf{Aeq}, \mathbf{beq}, \mathbf{lb}, \mathbf{ub}, @ \text{ nonlcon}), \quad (4.12)$$

де *@ fun* - посилання на файл із цільовою функцією,

$\mathbf{x0} = (V(0), K(0))$ - початковий вектор параметрів, що оптимізуються,

\mathbf{A} - матриця системи лінійних обмежень типу нерівностей, у нашому випадку відсутня,

\mathbf{b} - вектор правих частин системи лінійних обмежень типу нерівностей, у нашому випадку відсутній,

\mathbf{Aeq} - матриця системи лінійних обмежень типу рівностей, у нашому випадку відсутня,

\mathbf{beq} - вектор правих частин системи лінійних обмежень типу рівностей, у нашому випадку відсутній,

$\mathbf{lb} = [-V_{\min}, -\pi]$ - вектор і компоненти, що визначають нижню межу зміни параметрів оптимізації,

$\mathbf{ub} = [V_{\max}, \pi]$ - вектор і компоненти, що визначають верхню межу зміни параметрів оптимізації,

@ nonlcon - посилання на файл із системою нелінійних обмежень на параметри оптимізації.

Процедура умовної оптимізації (4.12) викликається на кожному кроці бортового обчислювача з тактом 1,0 с. Лістинг програмного забезпечення модуля формування безпечних параметрів штормування *sysctrl2.m* із викликом процедури умовної оптимізації наведено у додатку А.

Реалізація руху судна із безпечними оптимальними параметрами. Для реалізації руху судна із знайденими параметрами V^* , K^* використовується наступна система автоматичного регулювання

$$\begin{cases} \Theta = \frac{V^*}{V_{\max}} \Theta_{\max} \\ \delta = k_{\varphi}(K - K^*) + k_{\omega}\omega + k_{\int} \int (K - K^*) dt \end{cases}, \quad (4.13)$$

де Θ - кут відхилення телеграфу силової енергетичної установки,

Θ_{\max} - максимальне відхилення телеграфу,

δ - відхилення стерна,

K - поточний курс,

ω_z - кутова швидкість рискання,

k_{φ} , k_{ω} , k_{\int} - коефіцієнти підсилення ПД – регулятору.

4.4. Математичне моделювання автоматичного штурмування методом умовної оптимізації

Математичне моделювання проводилося у середовищі MATLAB. Програмне забезпечення, яке використовувалося для моделювання, наведене у ДодаткуА.

Перевірка математичної моделі на чутливість до зони гармонійного резонансу. На рис. 4.1. зображена приведена область параметрів руху судна із нанесеною областю гармонійного резонансу, яка детально розглядалася у розділі 3.

На рис. 4.2 – 4.4 наведено результати експериментів у вигляді графіків зміни у часі параметрів судна для початкових точок А,В,С. Перший та другий графіки рис. 4.2 – 4.4 відображають зміну у часі поздовжньої швидкості V_x [м/с] та поздовжнього переміщення X_g [м]. Третій та четвертий графіки відображають зміну у часі бокової швидкості V_y [м/с] та бокового переміщення Y_g [м]. П'ятий та шостий графіки відображають зміну у часі кутової швидкості крену W_x [гр/с] та кута крену [град]. Сьомий та восьмий

графіки відображають зміну у часі кутової швидкості диференту W_y [гр/с] та кута диференту [град]. Дев'ятий та десятий графіки відображають зміну у часі кутової швидкості рискання W_z [гр/с] та кута рискання [град]. Одинадцятий та дванадцятий графіки відображають зміну у часі кута відхилення телеграфу $teta$ [град] та стерна $delta$ [град].

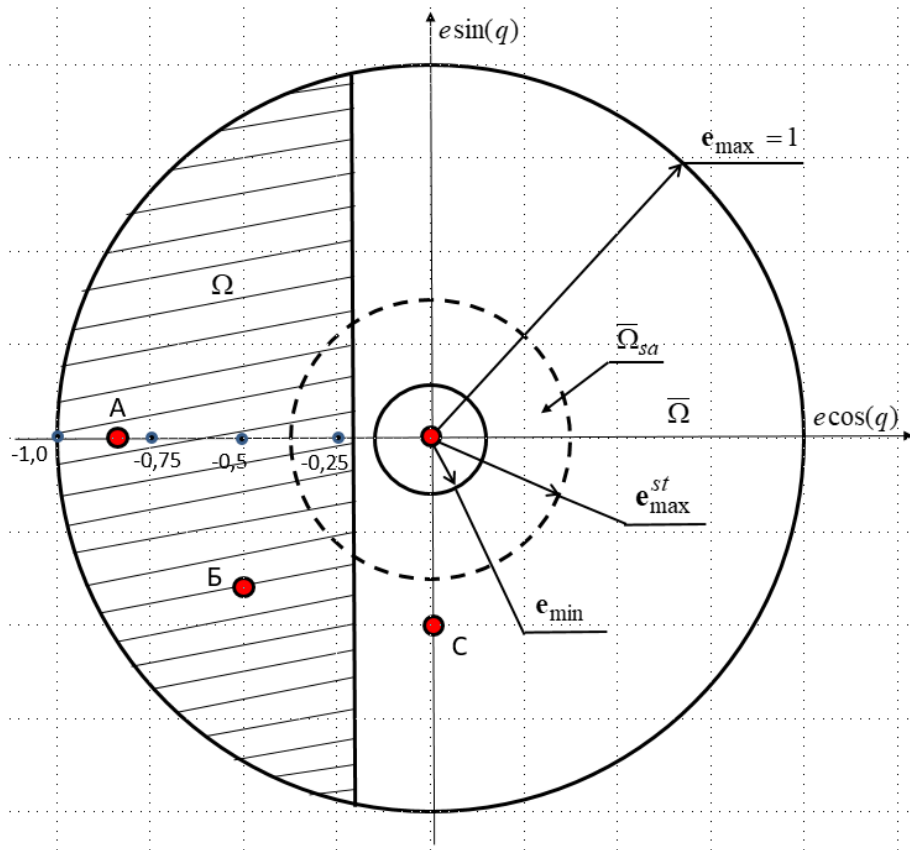


Рис. 4.1 – Приведена область параметрів руху судна і область гармонійного резонансу

Перший експеримент. Початкові параметри руху судна та хвилі відповідають т.А приведеної області параметрів, рис.4.1. Заданий курс судна $K(0) = 180^\circ$, задана швидкість судна $V(0) = 4,1 \text{ м/с}$; курс хвилі $K_w = 0^\circ$, швидкість хвилі $C = 13,7 \text{ м/с}$, довжина хвилі $\lambda = 120 \text{ м}$. Система керування підтримує заданий курс судна. Результати моделювання наведені на рис. 4.2.

Як видно із результатів експерименту, амплітуда коливань у каналі крену становить 30 - 40 град, що пояснюється знаходженням т. А у області гармонійного резонансу.

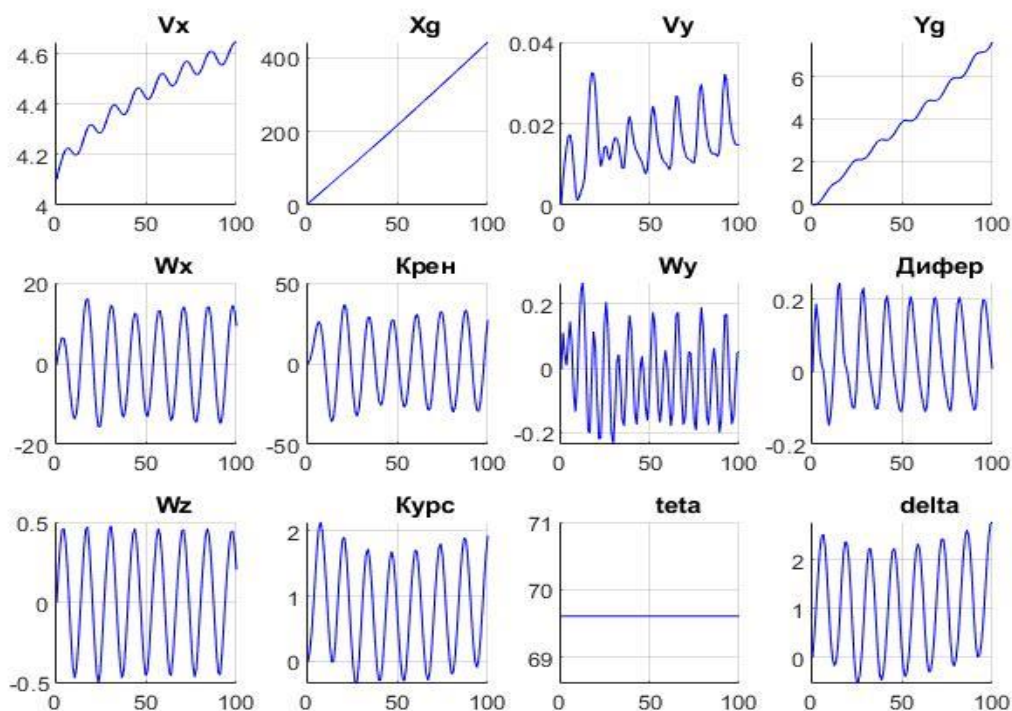


Рис. 4.2 – Результати моделювання процесу штормування в першому експерименті

Другий експеримент. Початкові параметри руху судна та хвилі відповідають т. В приведеної області параметрів, рис. 4.1. Заданий курс судна $K(0) = 135^\circ$, задана швидкість судна $V(0) = 3,6 \text{ м/с}$; курс хвилі $K_w = 0^\circ$, швидкість хвилі $C = 13,7 \text{ м/с}$, довжина хвилі $\lambda = 120 \text{ м}$. Система керування підтримує заданий курс судна. Результати моделювання наведені на рис. 4.3.

Як видно із результатів другого експерименту, амплітуда коливань у каналі крену становить 20 град, що також пояснюється знаходженням т. В у резонансній зоні каналу крену.

Третій експеримент. Початкові параметри руху судна та хвилі знаходяться у т. С приведеної області параметрів, рис. 4.1. Заданий курс судна $K(0) = 90^\circ$, задана швидкість судна $V(0) = 2,5 \text{ м/с}$; курс хвилі $K_w = 0^\circ$, швидкість хвилі $C = 13,7 \text{ м/с}$, довжина хвилі $\lambda = 120 \text{ м}$. Система керування підтримує заданий курс судна. Результати моделювання наведені на рис. 4.4.

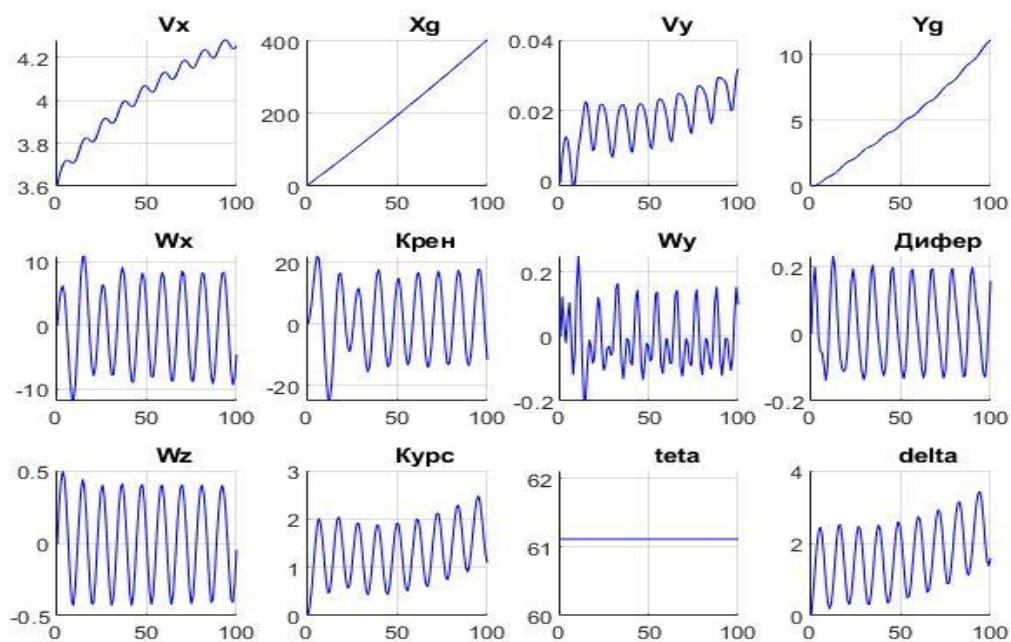


Рис. 4.3 – Результати моделювання процесу штормування в другому експерименті

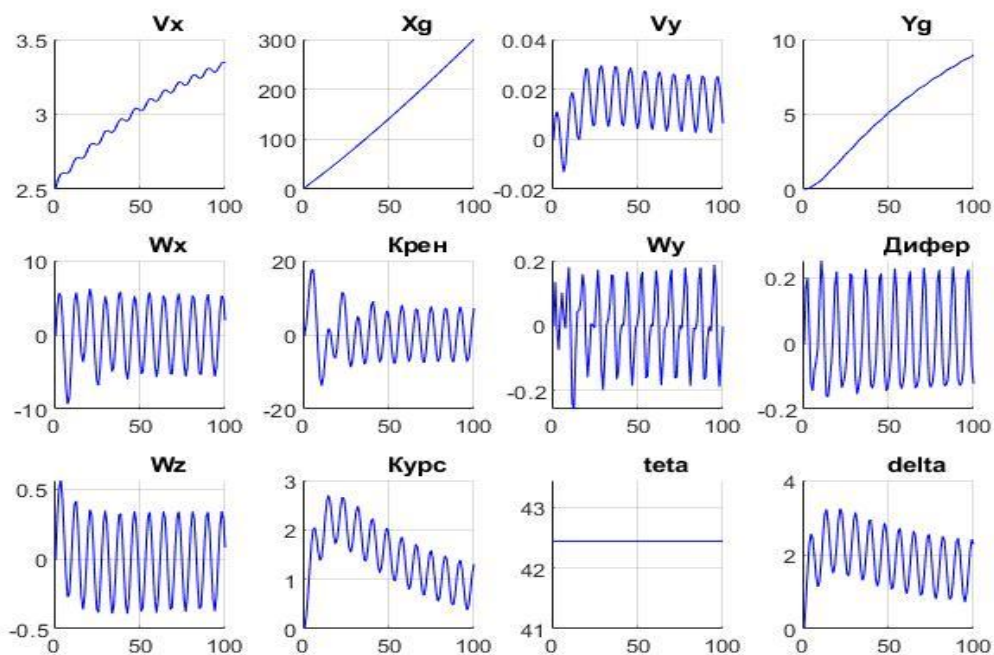


Рис. 4.4 – Результати моделювання процесу штормування в третьому експерименті

Як видно із результатів третього експерименту, амплітуда коливань у каналі крену зменшилася до 5 град, що дорівнює амплітуді вимушених

коливань. Це пояснюється знаходженням т. С у безпечній зоні, поза межами області гармонійного резонансу.

Четвертий експеримент. Як і у першому експерименті, початкові параметри руху судна та хвилі відповідають т. А приведеної області параметрів, рис.4.1.

Заданий курс судна $K(0) = 180^\circ$, задана швидкість судна $V(0) = 4,1 \text{ м/с}$; курс хвилі $K_W = 0^\circ$, швидкість хвилі $C = 13,7 \text{ м/с}$, довжина хвилі $\lambda = 120 \text{ м}$.

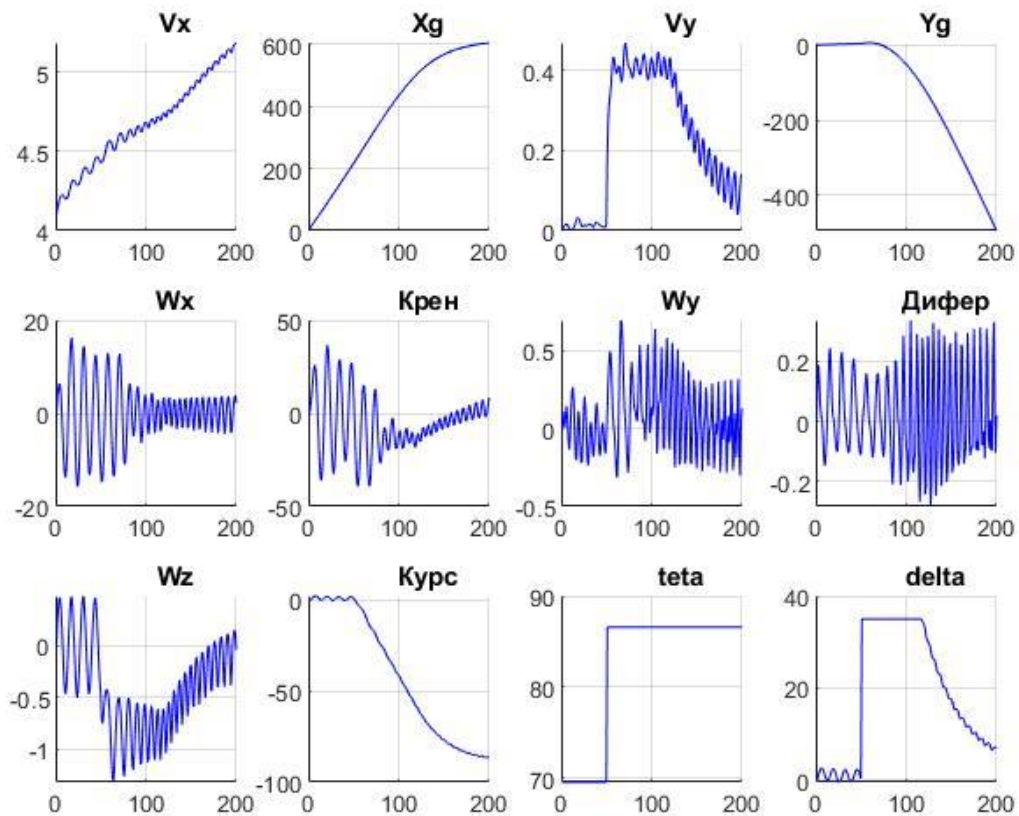


Рис. 4.5 – Результати моделювання процесу штормування в четвертому експерименті

Система керування до 50с. підтримує заданий курс судна. На цій ділянці спостерігається значна амплітуда коливань у каналі крену. На 50с. увімкнено модуль автоматичного штормування, який розраховує безпечний курс і швидкість судна. Як видно із графіків рис. 4.5, курс судна починає змінюватися з 0 град до -77 град., швидкість судна збільшується з 4.1 м/с до

5,2 м/с. Амплітуда коливань у каналі крену різко зменшується до 5 град, що відповідає амплітуді вимушених коливань.

Моделювання параметричного резонансу

Моделювання параметричного резонансу проводилося для судна, період вільних коливань якого становить $T_C = 12,5\text{с}$. На рис. 4.6. зображена приведена область параметрів руху судна із нанесеними областями параметричного резонансу Ω_{PR1} , Ω_{PR2} та гармонійного резонансу Ω_{GR} для довжини хвилі $\lambda = 90\text{м}$.

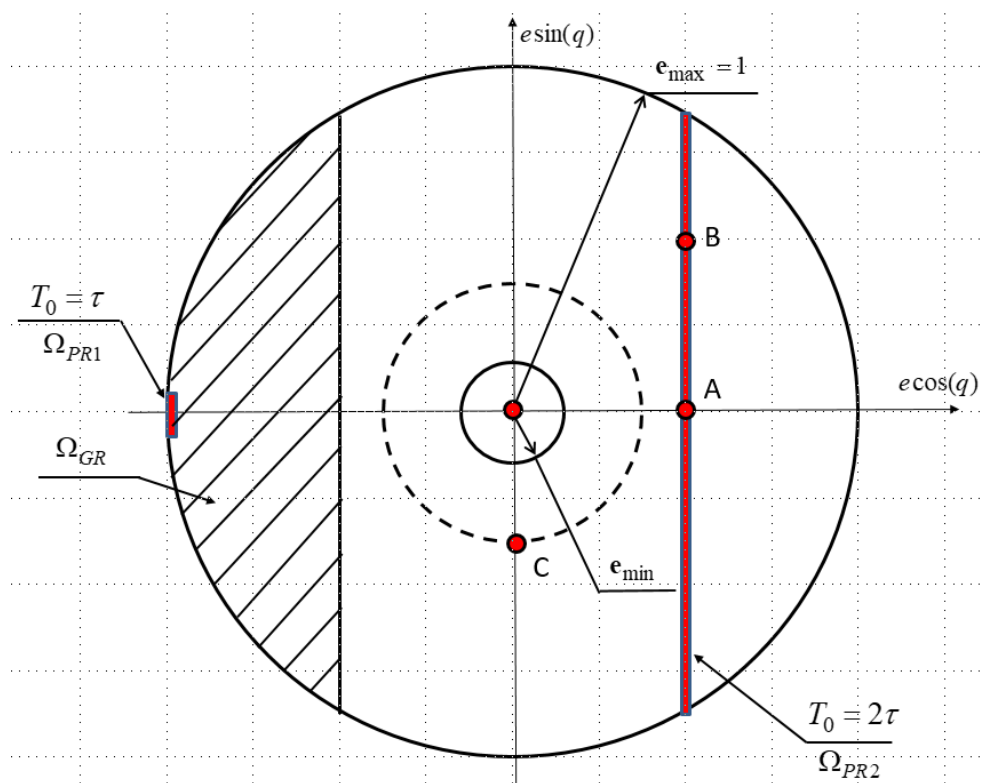


Рис 4.6 – Области резонансів для довжини хвилі $\lambda = 90\text{м}$

На рис. 4.7 – 4.10 наведені результати експериментів у вигляді графіків зміни у часі параметрів руху судна для початкових точок А, В, С. Перший та другий графіки рис. 4.7 – 4.10 відображають зміну у часі поздовжньої швидкості $V_x[\text{м/с}]$ та поздовжнього переміщення $X_g[\text{м}]$. Третій та четвертий графіки відображають зміну у часі бокової швидкості $V_y[\text{м/с}]$ та бокового переміщення $Y_g[\text{м}]$. П'ятий та шостий графіки відображають зміну у часі

кутової швидкості крену $\omega_x[gr/c]$ та кута крену $\theta[gr]$. Сьомий та восьмий графіки відображають зміну у часі кутової швидкості диференту $\omega_y[gr/c]$ та кута диференту $\psi[gr]$. Дев'ятий та десятий графіки відображають зміну у часі кутової швидкості рискання $\omega_z[gr/c]$ та кута рискання $\phi[gr]$. Одинадцятий та дванадцятий графіки відображають зміну у часі вертикальної швидкості $V_z[m/c]$ та осадки $T[m]$.

П'ятий експеримент. Початкові параметри руху судна та хвилі відповідають т. А області параметричного резонансу, рис. 4.6: курс судна $K(0)=0^0$, швидкість судна $V(0)=2,5m/c$, курс хвилі $K_w=180^0$, швидкість хвилі $C=11,9m/c$. Система керування підтримує початковий курс та швидкість судна.

Результати моделювання наведені на рис. 4.7.

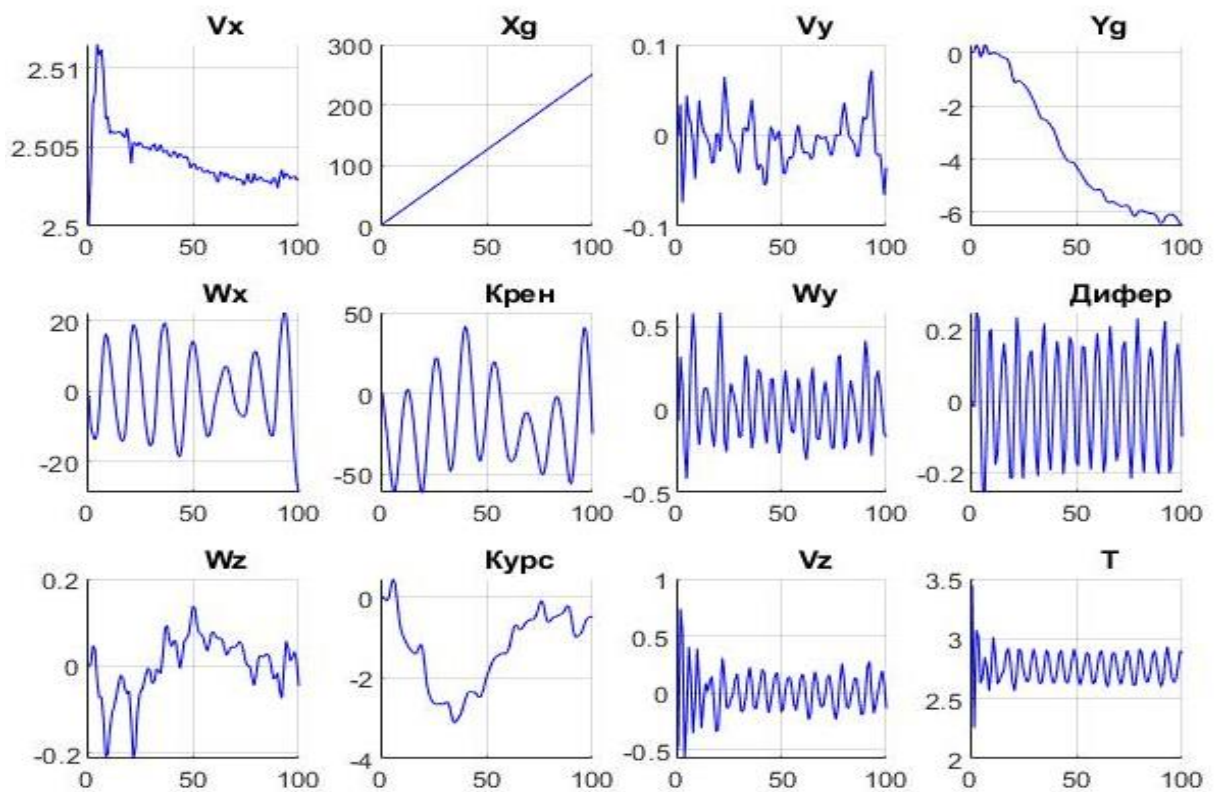


Рис. 4.7 – Результати моделювання процесу штормування в п'ятому експерименті

Як видно із результатів експерименту, період вимушених коливань становить $\sim (6-7)$ с., що видно по періоду коливань вертикальної швидкості V_z , осадки T , кутової швидкості диференту ω_y та кута диференту ψ . Період коливань у каналі крену становить $\sim 12,5$ с, що співпадає із періодом вільних коливань судна у каналі крену $T_C = 12,5$ с та у два рази перевищує період вимушених коливань. У поєднанні із значною амплітудою коливань ~ 50 гр., це свідчить про наявність параметричного резонансу 2-го типу.

Шостий експеримент. Початкові параметри руху судна та хвилі відповідають т. В області параметричного резонансу, рис.4.6: курс судна $K(0) = -45^0$, швидкість судна $V(0) = 3,5$ м/с, курс хвилі $K_W = 180^0$, швидкість хвилі $C = 11,9$ м/с. Система керування підтримує початковий курс та швидкість судна.

Результати моделювання наведені на рис. 4.8.

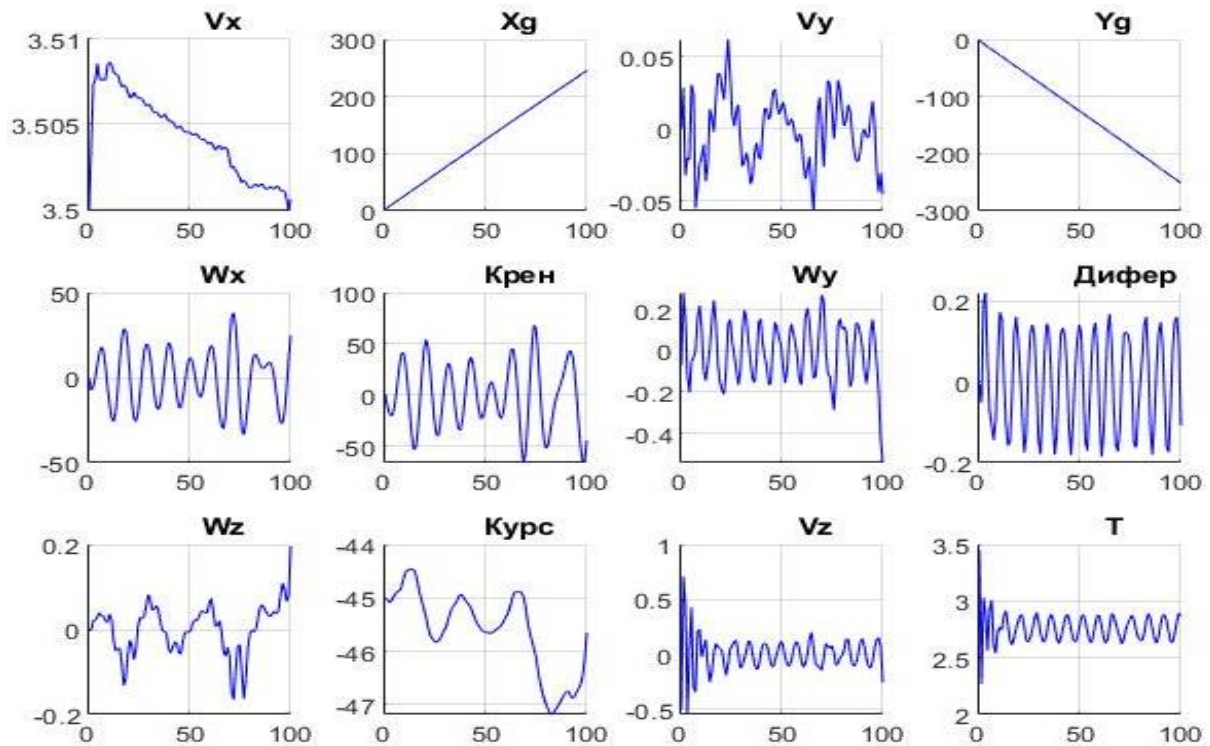


Рис. 4.8 – Результати моделювання процесу штормування в шостому експерименті

Як видно із наведених результатів, період вимушених коливань становить $\sim (6-7)$ с., що видно по періоду коливань вертикальної швидкості V_z , осадки T , кутової швидкості диференту ω_y та кута диференту ψ . Період коливань у каналі крену становить $\sim 12,5$ с, що співпадає із періодом вільних коливань судна у каналі крену $T_C = 12,5$ с та у два рази перевищує період вимушених коливань. У поєднанні із значною амплітудою коливань ~ 50 гр., це також свідчить про наявність параметричного резонансу 2-го типу у т. В.

Сьомий експеримент. Початкові параметри руху судна та хвилі відповідають т. С, яка не належить області параметричного резонансу, рис.4.6: курс судна $K(0) = 90^0$, швидкість судна $V(0) = 1,9$ м/с, курс хвилі $K_W = 180^0$, швидкість хвилі $C = 11,9$ м/с. Система керування підтримує початковий курс та швидкість судна.

Результати моделювання наведені на рис. 4.9.

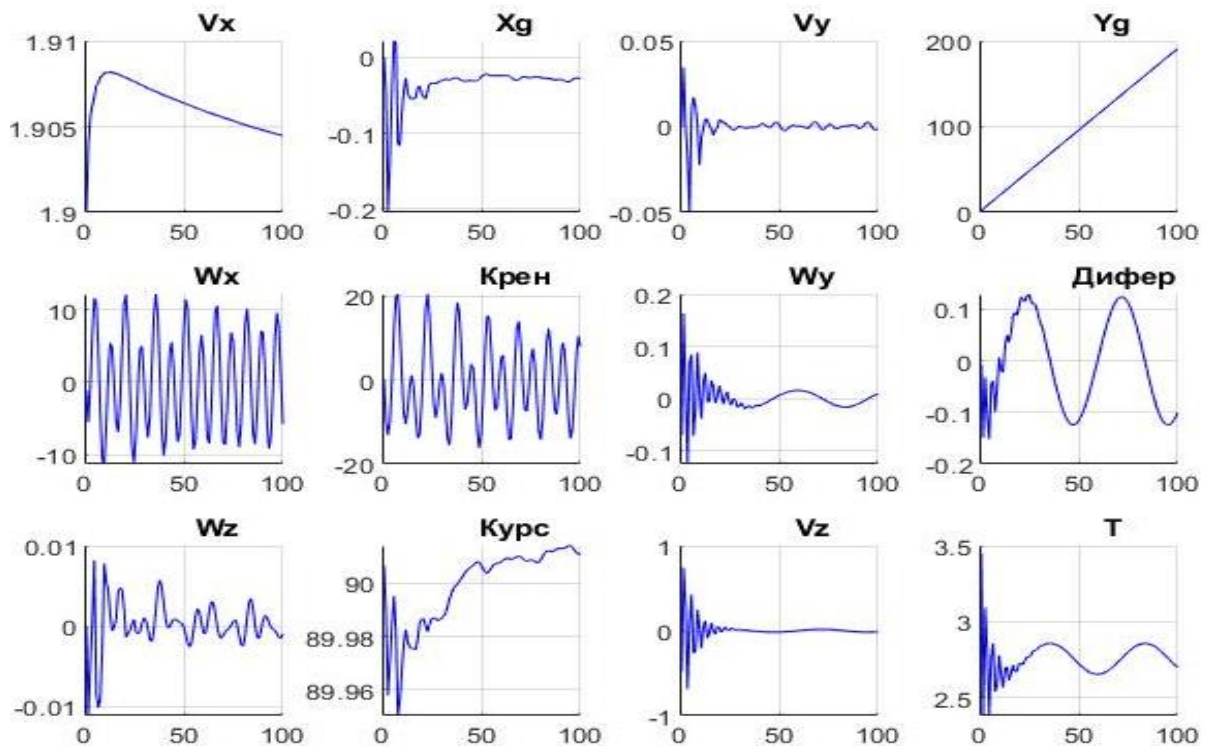


Рис. 4.9 – Результати моделювання процесу штормування в сьомому експерименті.

Як видно із наведених результатів, період вимушених коливань у каналі крену становить $\sim 7,7$ с., що практично збігається із розрахунковим періодом вимушених коливань $\tau = \frac{\lambda}{C+V \cos q} = \frac{90}{11,9+1,9 \cos 90^0} = \frac{90}{11,9} = 7,56$ с. У поєднанні із значно меншою амплітудою коливань $\sim (10 - 20)^0$, це свідчить про відсутність параметричного резонансу у т. С.

Восьмий експеримент. Як і у п'ятому експерименті, початкові параметри руху судна та хвилі відповідають т. А області параметричного резонансу, рис.4.6: курс судна $K(0) = 0^0$, швидкість судна $V(0) = 2,5$ м/с, курс хвилі $K_W = 180^0$, швидкість хвилі $C = 11,9$ м/с. Результати моделювання наведені на рис.4.10.

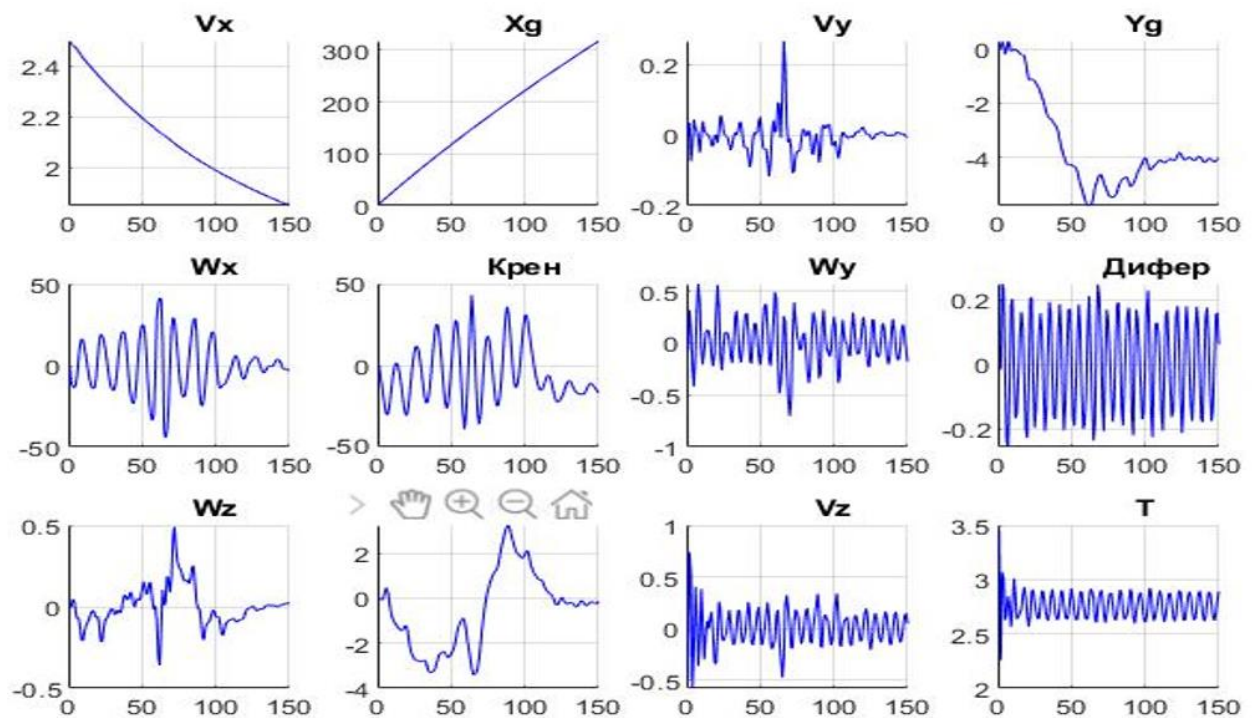


Рис. 4.10 – Результати моделювання процесу штормування в восьмому експерименті

Модуль автоматичного штормування на протязі всього часу розраховує і підтримує оптимальні та безпечні параметри руху судна. Для оптимізації використовувалася цільова функція (4.10), яка забезпечувала мінімальне відхилення безпечного курсу від заданого на кожному кроці бортового

обчислювача. Розраховані оптимальні та безпечні параметри штормування становили $V^* \sim 2,1 м/с$, $K^* \sim 0^0$. Із наведених графіків $V(t), K(t)$ видно, що система керування підтримує безпечний курс з точністю $|K(t)| \leq 2^0$ та одночасно зменшує швидкість руху судна до безпечної. Після досягнення безпечної швидкості приблизно на 100 с, амплітуда коливань у каналі крену різко зменшується до значення вимушених коливань. Аналіз наведених результатів показує, що модуль автоматичного штормування дозволяє ефективно розрахувати оптимальні та безпечні параметри руху судна у випадку параметричного резонансу та підтримувати їх у процесі штормового плавання.

Для перевірки ефективності методу було проведено ряд експериментів на стенді імітаційного моделювання [101, 104, 105] для моделі судна «Ro-Ro passenger ferry 13». Результати експерименту порівнювався з даними ручного керування, отриманими під час навчальних занять з курсантами (10 проходжень кожної вправи).

У таблиці 4.1 наведені порівняльні дані ручного і автоматичного керування по двом параметрам – часу на прийняття рішення та довжині траєкторії руху.

Таблиця 4.1. Порівняльні дані ручного і автоматичного керування

№ вправи	Ручне керування		Автоматичне керування		Відносне відхилення	
	Час необхідний для прийняття рішення, сек.	Довжина траєкторії руху, м	Час необхідний для прийняття рішення, сек.	Довжина траєкторії руху, м	Час необхідний для прийняття рішення, разів	Довжина траєкторії руху, %
English Channel	30.4	6.15	1.0	5.60	-29.4	-9.8%
English Channel	42.5	7.05	1.0	6.09	-41.5	-15.8%
Open Sea	27.7	5.74	1.0	4.81	-26.7	-19.3%
Середнє значення	33.5	6.3	1.0	5.5	-32.5	-15.0%

4.5. Висновки по розділу 4

1. Розроблено метод визначення безпечних та оптимальних параметрів штормового плавання, який полягає у використанні бортового обчислювача для вирішення задачі нелінійної оптимізації з лінійними та нелінійними обмеженнями типу нерівностей, на відміну від існуючих рішень, дозволяє автоматично знаходити безпечні та оптимальні параметри штормового плавання із врахуванням небезпек перекидання судна: гармонійного резонансу, параметричного резонансу першого та другого типу, втрати остійності на попутному хвилюванні, брочингу та ударів групових хвиль у корму судна.
2. Розроблено метод штормування, який полягає в оптимізації цільової функції якості керування, на відміну від існуючих рішень дозволяє автоматично та оптимально керувати судном у штормових умовах плавання.
3. Сформовані нелінійні обмеження для вирішення задачі нелінійної оптимізації, які визначають навігаційні небезпеки, безпечні швидкості та області штормового плавання щодо гармонійного резонансу, параметричного резонансу першого та другого типу, втрати остійності на попутному хвилюванні, брочингу та ударів групових хвиль у корму судна.
4. Проведено математичне моделювання процесів штормового плавання у замкнутому контурі «Система керування – Об'єкт керування» на стенді імітаційного моделювання та у середовищі MATLAB.

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТЕНДУ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ МОДУЛІВ АВТОМАТИЧНОГО ШТОРМУВАННЯ

5.1. Навігаційний тренажер Navi Trainer 5000 ХДМА

Останнім часом для формування навичок ручного управління рухом судна широко застосовуються тренажери. Їх головною особливістю є надійність і реалістичність фізичних процесів, які моделюються в системі. Транзас є одним з провідних виробників навігаційних тренажерів.

Один із таких тренажерів створено, наприклад, у Херсонській державній морській академії - тренажер від компанії Wartsila «Navi-Trainer Professional 5000», що підтверджено сертифікатами на відповідність стандартам навчального обладнання світових реєстрів та класифікаційних організацій (Det Norske Veritas Germanischer Lloyd, Bureau Veritas, Lloyd's Register, American Bureau of Shipping). Даний тренажер дозволяє проводити моделювання навігаційного процесу, наближеного до реальних умов [119, 118]. На тренажері є можливість використовувати різні математичні моделі власного судна, цілей, командних приладів, виконавчих органів, імітувати їх відмови, створювати погодні умови та візуалізувати усі ці дані.

Робоче місце інструктора навігаційного тренажера NTPro 5000 зображено на рис. 5.1.

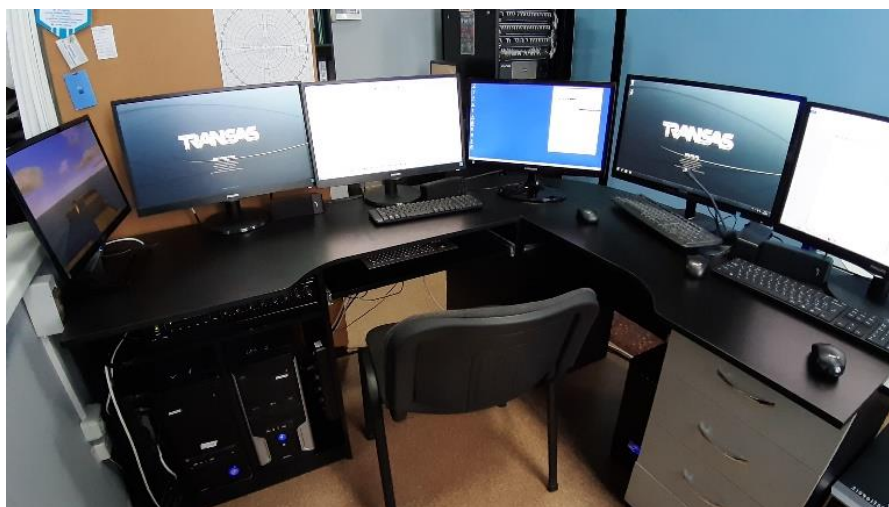


Рис. 5.1 – Робоче місце інструктора навігаційного тренажера NTPro 5000

На рис. 5.2 у лівій частині зображено центральну стійку тренажера, в якій розміщено сервер, моделі, комутаційне обладнання, джерела безперебійного живлення тощо. Лабораторії також мають віртуальні мости з обладнанням візуалізації та керування, один з яких – повноцінний симулятор навігаційного містка, показаний на рис. 2 у правій частині зображення.



Рис. 5.2 – Центральна стійка тренажера (ліва сторона) та симулятор повноцінного ходового містка (права сторона)

Для можливості проведення тестування систем керування рухом суден на інформаційному стенді імітаційного моделювання, створеному на базі навігаційного тренажера необхідно інтегрувати в існуюче навігаційне обладнання тренажера NTPro 5000 компонування систем управління судном (системні блоки та програмне забезпечення), забезпечити обмін інформацією між навігаційним тренажером NTPro 5000 і компонуванням СКРС з метою організації замкнутого контуру навігаційний симулятор - макет СКРС для розробки та тестування математичних, алгоритмічних і програмних засобів СКРС.

5.2. Інтегрування імітатора бортового обчислювача у локальну мережу навігаційного тренажера

На рис. 5.3 наведена структурна схема інформаційного стенду моделювання, що включає існуючий симулятор NTPro 5000, модулі якого

розташовані над локальною обчислювальною мережею (ЛОМ), і доповнення модулями СКРС 14-16. Всі блоки підключені через локальну мережу.

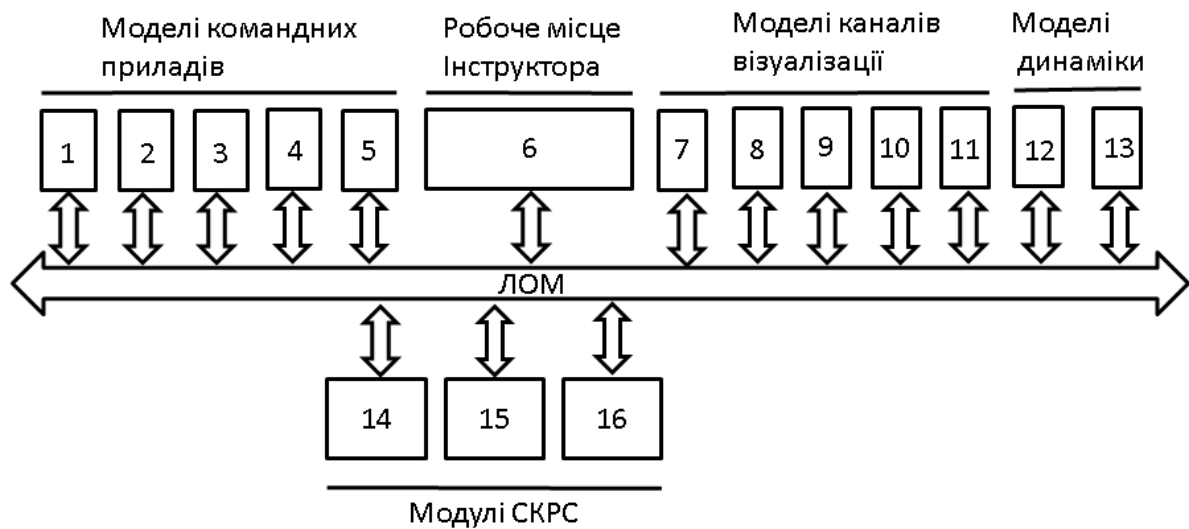


Рис. 5.3 – Схема взаємодії тренажерного обладнання

До складу тренажера NTPro 5000 входять моделі командного пристрою 1-5, робоче місце інструктора 6, моделі каналів візуалізації 7-11, моделі динаміка 12 13. Обмін інформацією між тренажером NTPro 5000 і модулями СКРС здійснюється через локальну мережу за допомогою штатного інтерфейсу. симулятора NMEA. NMEA — це спеціальний протокол для підтримки взаємодії морського навігаційного обладнання від різних виробників, розроблений Національною асоціацією морської електроніки (National Marine Electronics Association). Більшість навігаційного програмного забезпечення, яке підтримує відображення даних у реальному часі, підтримує та розуміє протокол NMEA. Кожне окреме повідомлення не залежить від інших і є повністю «завершеним». Повідомлення NMEA містить заголовок, набір даних, представлений символами ASCII, і поле контрольної суми для перевірки точності переданої інформації. Заголовок стандартного повідомлення NMEA складається з 5 символів, з яких перші два визначають тип повідомлення, а решта три вказують його назву. NMEA також забезпечує передачу інформації з локальної мережі на фізичний або віртуальний COM-порт [150].

Ми можемо надсилати навігаційну інформацію з різних навігаційних пристроїв симулятора навігаційного мосту за допомогою інтерфейсу NMEA. Деякі навігаційні пристрої для надсилання інформації наведені в таблиці 5.1 [120, 119, 118].

Таблиця 5.1. Основні навігаційні прилади

Джерело	Дані
GPS	Широта довгота
Log	Швидкість відносно води
Sounder	Глибина
Gyro	Курс гірокомпаса
Compass	Курс магнітного компаса
Wind	Відносна швидкість вітру
Arpa	Інформація про ціль
IBS	Дані від датчиків рушійної сили та рульового керування, диферент, крен
UAIS	Дані UAIS (Універсальна система автоматичної ідентифікації)
Route	Інформація про маршрут
і т.д..	...

5.3. Обмін даними між навігаційним тренажером і імітатором бортового обчислювача

На рис. 5.4 показано скріншот стандартної програми редактора тренажерної конфігурації. До створеної конфігурації віртуального мосту ALPHA2-DPA додано інтерфейс NMFA_LOG_GYRO_ARPA, який забезпечує обмін інформацією між симулятором NTPro 5000 і модулями СКРС. Фрагмент конфігурації для цього інтерфейсу показано в нижній правій частині вікна редактора конфігурації.

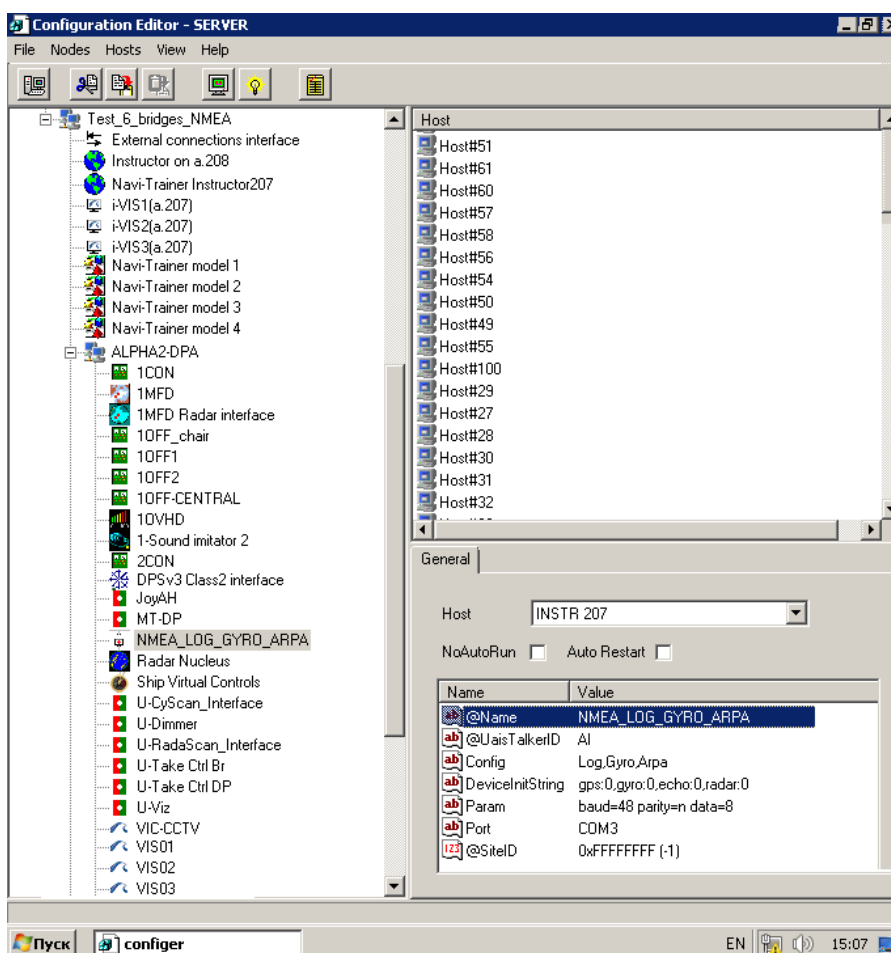


Рис. 5.4 – програма редактора тренажерної конфігурації

Наведений вище фрагмент показує, що NMEA отримує інформацію через порт COM3 від навігаційних пристроїв: LOG (пристрій, який використовується для оцінки швидкості судна відносно води), Gyro (Гірокомпас) і ARPA (Засоби автоматичної радіолокаційної прокладки). Дані через послідовний COM-порт передаються від мережі симулятора до модулів VCS у вигляді повідомлень NMEA, приклад таких повідомлень зображено на рис. 5.5.

Для обміну даними між тренажером і модулями СКРС, виконання допоміжних обчислень, розроблено спеціалізоване програмне забезпечення стенду імітаційного моделювання, інтерфейс якого зображено на рис. 5.6.

```

1 $VDVHW,300.0,T,,7.60,N,,*41
2 $VDVBW,7.60,0.10,A,7.60,0.20,A,1.20,A,1.20,A*52
3 $VDVLW,0.00,N,0.00,N,0.00,N,0.00,N*5F
4 $HEHDT,300.0,T*1B
5 $HEROT,4.6,A*0E
6 $HETHS,300.0,A*19
7 $GPRMC,170630.00,A,0912.381000,N,07954.874000,W,13.7,332.5,300915,,A*79
8 $VDVHW,300.0,T,,7.60,N,,*4F
9 $VDVBW,7.60,0.20,A,7.60,0.10,A,1.20,A,1.10,A*51
10 $VDVLW,0.00,N,0.00,N,0.00,N,0.00,N*5F
11 $HEHDT,300.0,T*15
12 $HEROT,4.6,A*0E
13 $HETHS,300.0,A*17
14 $GPRMC,170630.00,A,4035.443800,N,07401.515000,W,13.7,332.5,300915,,A*79
15 $$VDVHW,300.0,T,,7.60,N,,*4E
16 $VDVBW,7.60,0.20,A,7.60,0.20,A,1.20,A,1.20,A*51
17 $VDVLW,0.00,N,0.00,N,0.00,N,0.00,N*5F
18 $HEHDT,85.6,T*14
19 $HEROT,-9.0,A*0F
20 $HETHS,85.6,A*16
21 $GPRMC,170630.00,A,4035.443800,N,07401.515000,W,13.7,332.5,300915,,A*79

```

Рис. 5.5 – приклад NMEA повідомлень

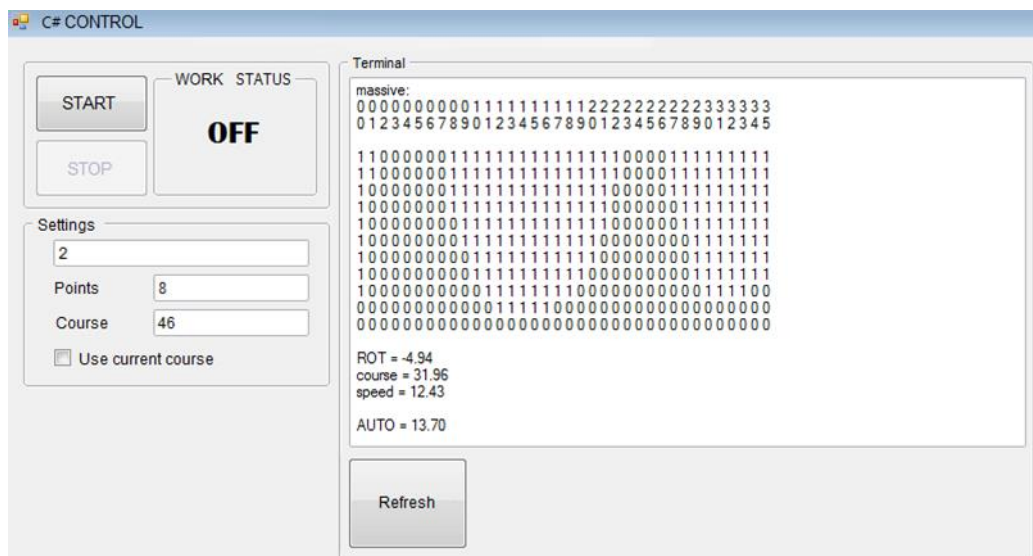


Рис. 5.6 – Інтерфейс програмного забезпечення стенду імітаційного моделювання

Спеціалізоване програмне забезпечення стенду імітаційного моделювання написано на мові програмування C# і використовує стандартні методи бібліотеки C# для організації зв'язку через COM-порт, наприклад, метод ReadExisting() з класу SerialPort для зв'язку через COM-порт і метод Substring() з класу даних для аналізу повідомлень.

Частина коду, що зображена на рис. 5.7, показує процес аналізу повідомлення для отримання даних про швидкість і курс судна.

Більш детальний лістинг програми наведено у Додатку А.

```

142 indexofsearch = mes.IndexOf("$VDVHW");
143 if (mes.IndexOf("$VDVHW") != -1)           //Found message
144                                           //about speed and heading.
145 {
146     string cut = mes.Substring(indexofsearch);
147     string head = cut.Substring(cut.IndexOf(',') + 1);
148     head = head.Substring(0, 5).Trim(new char[] { ',', 'T' });           //Got heading as text.
149     head_double = Convert.ToDouble(head);           //Convert
150                                           //text data to digit data.
151     head_int = Convert.ToInt32(head_double);
152     if (head_int == 360)
153     {
154         head_int = 0;
155     }
156     for (i = 1; i < 6; i++)           //For found information about speed.
157     {
158         cut = cut.Substring(cut.IndexOf(',') + 1);
159     }
160     string speed = cut.Substring(0, 5).Trim(new char[] { ',', 'T' });           //Got speed as text.
161     speed_double = Convert.ToDouble(speed);           //Convert text data to digit data.
162 }

```

Рис. 5.7 – Частина коду для отримання даних про швидкість і курс судна

Стенд імітаційного моделювання функціонує наступним чином. З робочого місця інструктора 6 обирають район плавання, модель власного судна, моделі обладнання кораблів, моделі цілей, моделі навколишньої обстановки, макети погодних умов, макети функціонування командних приладів і засобів керування, моделі відмов командних приладів та засобів керування, створюють вправу, власні судна закріплюють за віртуальними містками та здійснюється запуск вправи. Динамічні моделі 12, 13 імітують рух власного судна, цілей суден, умови навколишнього середовища, погодні умови. Результати моделювання через локальну мережу подаються в канали зображення 7-11 для відображення на екранах і модель 1-5 навігаційного пристрою для моделювання їх роботи та відображення даних моделювання на їх дисплеях. Дані з моделей навігаційних пристроїв 1-5 по локальній мережі подаються в модуль СКРС 14-16 безпосередньо в цифровому вигляді та обробляються там відповідно до алгоритму вирішення функціональної задачі. Розробка та тестування цих алгоритмів є метою створення стенду імітаційного моделювання. Вихідні сигнали модулів СКРС 14-16 передаються по локальній мережі в моделі динаміки 12, 13 навігаційного симулятора Navi Trainer 5000 для врахування їх впливу на рух судна.

Стенд імітаційного моделювання дозволяє розробляти та відпрацьовувати у замкнутій схемі «навігаційний тренажер NTPro 5000 – імітатор бортового обчислювача» методи, алгоритмічне та програмне

забезпечення автоматичних модулів керування рухом суден. У наступному розділі описується експеримент по автоматичному штормуванню судна на стенді імітаційного моделювання.

5.4. Моделювання процесів штормування на стенді імітаційного моделювання

Для моделювання процесів штормування вибрана тренажерна модель судна Ro-Ro passenger ferry 13, характеристики якої наведені у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2. Характеристики судна Ro-Ro passenger ferry 13

Назва параметра	Значення
Водотоннажність, т.	7796,8
Максимальна швидкість, вуз.	20,5
Довжина, м.	125
Ширина, м.	23,4
Осадка, м	5,3

В імітаторі бортового контролеру, крім програм обміну інформацією, використовувалося програмне забезпечення модуля автоматичного штормування sysctr12.m, наведенне у лістингу основних програм, додаток А.

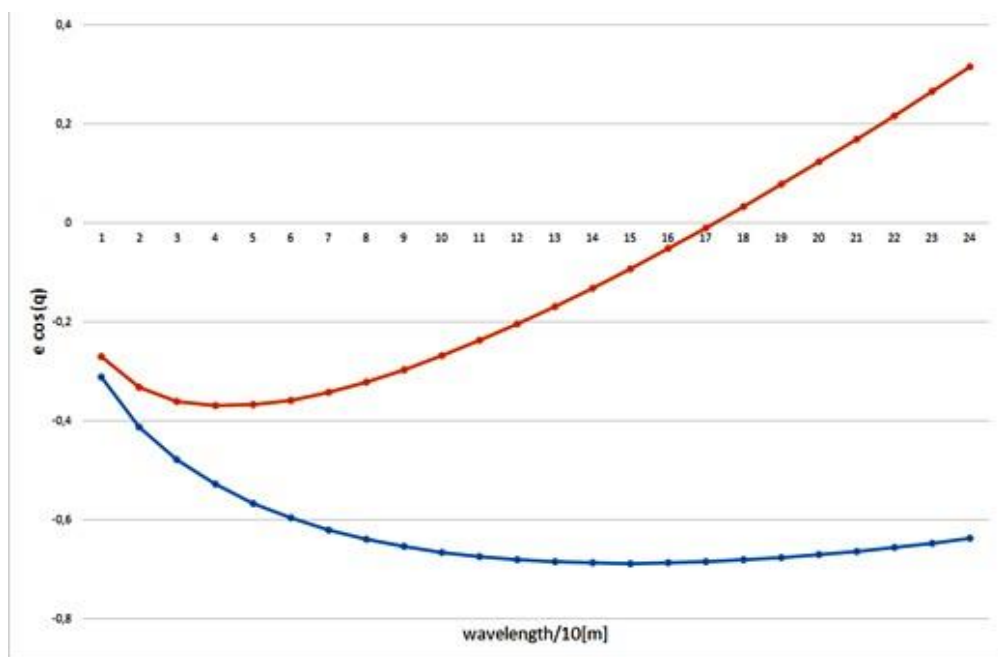


Рис. 5.8 – Залежність ширини резонансної зони від довжини хвилі λ .

На рис. 5.8 наведена залежність приведеної верхньої та нижньої меж резонансної зони від довжини хвилі в каналі крену судна Ro-Ro passenger ferry.

На рис. 5.9 показано резонансну зону Ω та нерезонансну зону $\bar{\Omega}$ каналу крену для довжини хвилі $\lambda = 230m$.

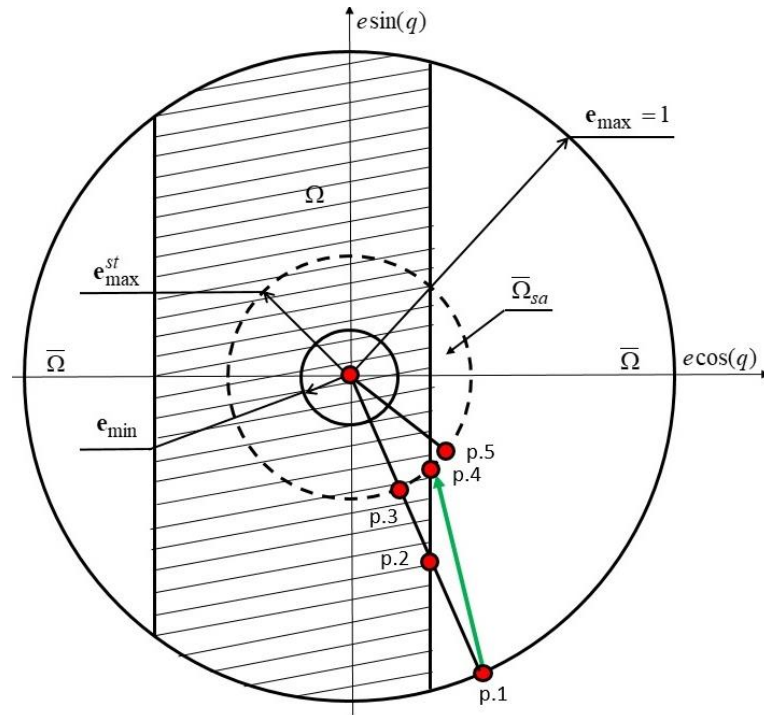


Рис. 5.9 – Резонансна зона в координатах $e \sin q - e \cos q$

Зовнішнє коло e_{\max} відповідає зменшеній максимальній швидкості

судна $|e_{\max}| = \frac{V_{\max}}{V_{\max}} = 1$, внутрішнє коло e_{\min} відповідає мінімальній швидкості

судна $|e_{\min}| = \frac{V_{\min}}{V_{\max}} = 0,1$, пунктирне коло e_{\max}^{st} відповідає максимальній

швидкості судна під час шторму $|e_{\max}^{st}| = \frac{V_{\max}^{st}}{V_{\max}} = 0,35$. Ця швидкість залежить від

хвилювання, чим сильніший шторм, тим менший e_{\max}^{st} . На рис. 5.9 показана зменшена максимальна швидкість судна Ro-Ro passenger ferry 13 для 11-бального шторму.

Нижче наведено результати математичного моделювання штормових процесів пасажирського парому 13 Ро-Ро на стенді імітаційного моделювання.

У всіх експериментах напрямок вітру $K_W(n) = 0^\circ$ (північний вітер),
 $q(n) = K(n) - K_W(n) = K(n)$.

На рис. 5.10 показані графіки зміни кута крену, кута диферента, поздовжньої швидкості та курсу пасажирського порома 13 Ро-Ро під час розгону судна до максимальної швидкості за відсутності хвилювань моря.

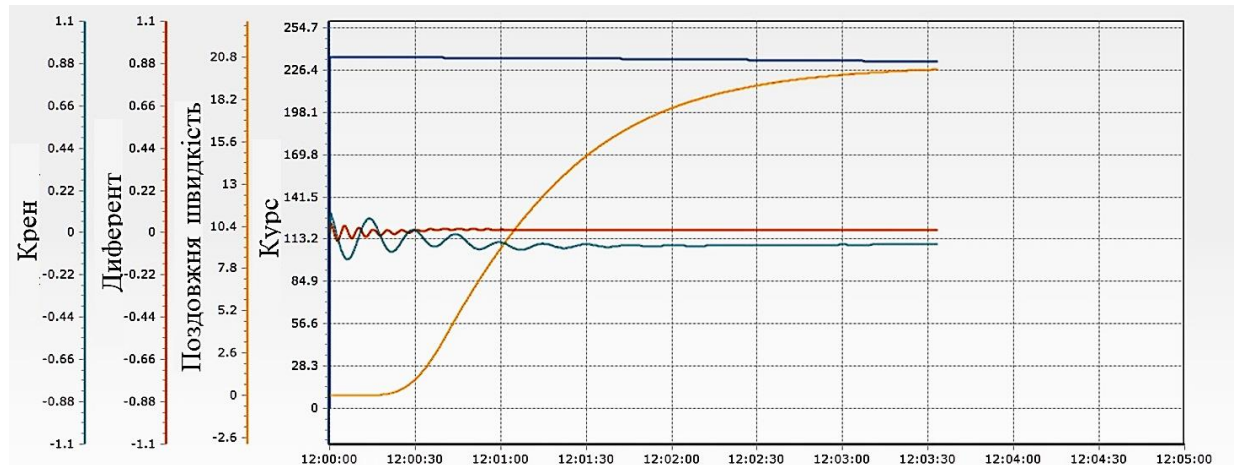


Рис. 5.10 – Розгін судна Ro-Ro passenger ferry за відсутності хвилювання

Як видно з графіків, судно за одну хвилину здійснює чотири повних коливання в каналі крену і дванадцять повних коливань в каналі диференту, тобто період власних коливань судна в каналі крену становить $T_B = 15\text{sec}$. а в каналі диферента $T_L = 5\text{sec}$. Ці періоди власних коливань були використані для знаходження верхньої та нижньої межі резонансної зони, рис. 5.8 і 5.9.

На рис. 5.11 показані графіки зміни кута крену, кута диферента, поздовжньої швидкості та курсу Ro-Ro passenger ferry 13 для початкового курсу $K(0) = 45^\circ$, початкової швидкості $V(0) = 0\text{kn}$, початкового хвилювання моря 2 бали.

Судно, рухаючись за курсом $K(n) = 45^\circ$, розганяється до швидкості $V(n) = 19\text{kn}$, після чого на тренажері встановлюється хвилювання моря 11 балів. Під час хвилювання швидкість судна зменшується до $V(n) = 7,2\text{kn}$, $e(n) = 0,35$, але судно не перекидається. Це пов'язано з тим, що

умови резонансу не виконуються для приведених швидкості $e(n) = 0,35$ та курсу $K(n) = 45^\circ$ (точка 5 на рис. 5.9).

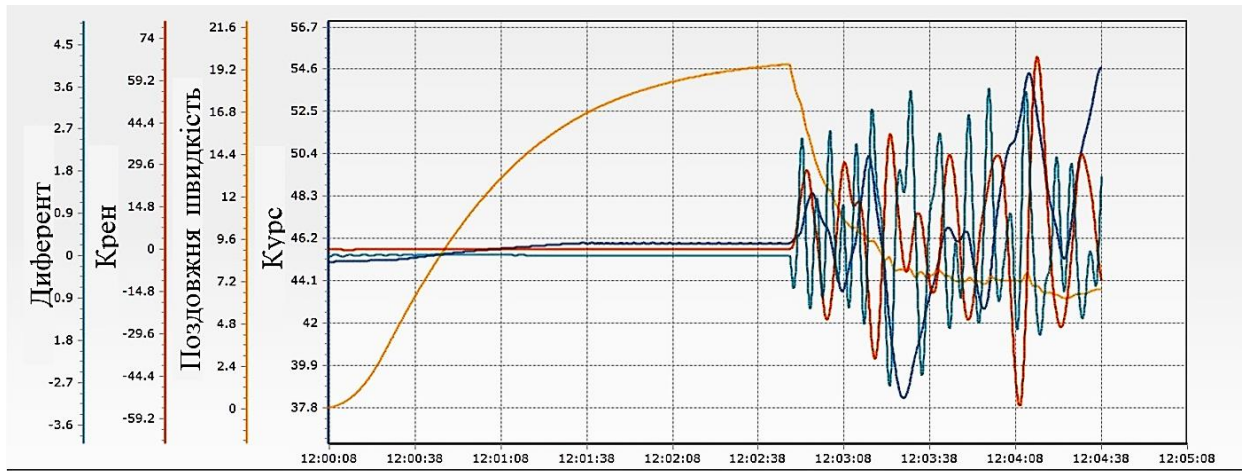


Рис. 5:11 – Параметри руху Ro-Ro passenger ferry 13 для початкового курсу $K=45$

На рис. 5.12 показані графіки зміни кута крену, кута диферента, поздовжньої швидкості та курсу Ro-Ro passenger ferry 13 для початкового курсу $K(0) = 75^\circ$, початкової швидкості $V(0) = 0 \text{ kn.}$, початкового хвилювання моря 2 бали.

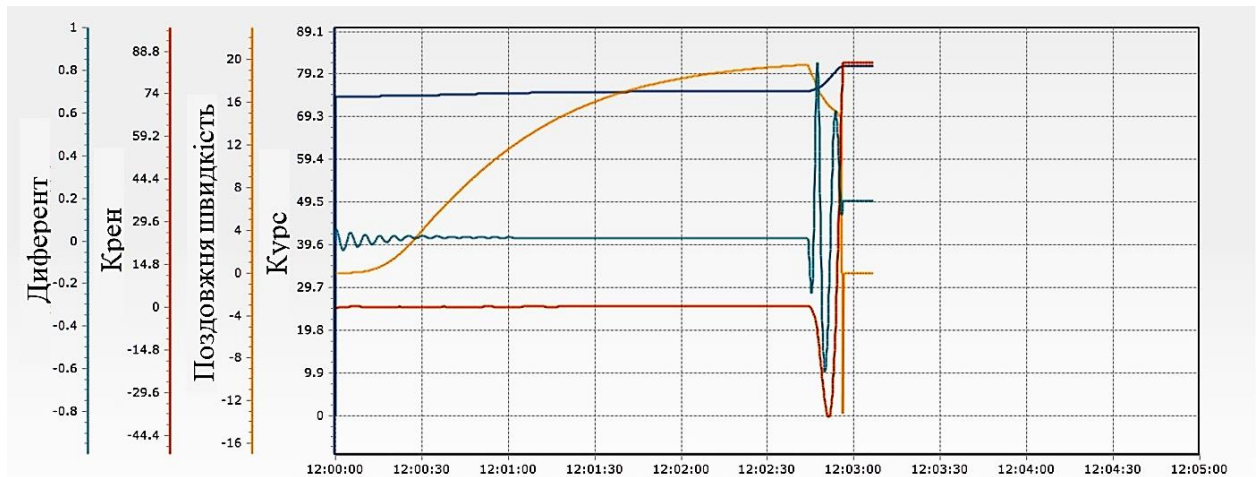


Рис. 5:12 – Параметри руху Ro-Ro passenger ferry 13 за курсом $K(n) = 75^\circ$

Судно, рухаючись за курсом $K(n) = 75^\circ$, розганяється до швидкості $V(n) = 19 \text{ kn.}$, після чого на тренажері встановлюється хвилювання моря 11 балів. Під час хвилювання моря швидкість судна зменшується до

$V(n) = 7,2kn$, $e(n) = 0,35$, виникає резонанс в каналі крену, кути крену виходять за межі допустимих значень і судно перекидається (горизонтальні лінії на графіках). Це пов'язано з тим, що умови резонансу виконуються для приведених швидкостей $e(n) = 0,35$ та курсу $K(n) = 75^\circ$ (точка 3 на рис. 5.9).

На рис. 5.13 наведено графіки зміни кута крену, кута диферента, поздовжньої швидкості та курсу судна з автоматичним керуванням судна Ro-Ro passenger ferry 13 у шторм. Початковий курс судна $K(0) = 75^\circ$, початкова швидкість $V(0) = 18,5kn$, початкове хвилювання моря 2 бали. Судно, рухаючись курсом $K(n) = 75^\circ$, розганяється до швидкості $V = 19kn$, після чого на тренажері встановлюється хвилювання моря 11 балів. Як видно з графіків, під час шторму швидкість судна починає зменшуватися до $V(n) = 7kn$, $e(n) = 0,35$. Одночасно модуль автоматичного штормування починає змінювати курс з $K(n) = 75^\circ$ до безпечного $K(n) = 45^\circ$ для виходу із зони резонансу. На рис. 5.9 це відповідає переміщенню від точки 1 до точки 4.

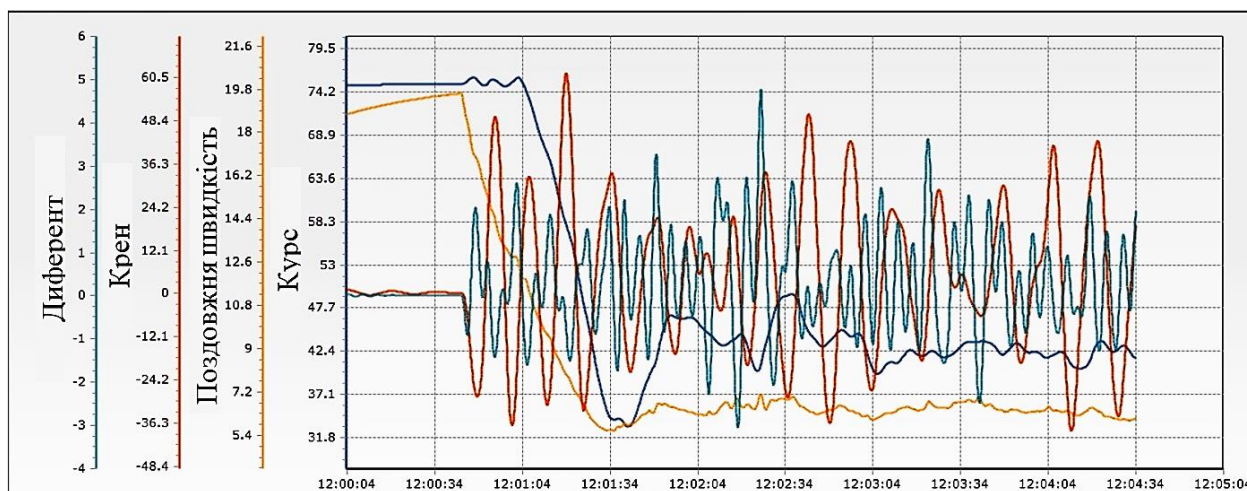


Рис. 5.13 – Автоматичне керування судном Ro-Ro passenger ferry 13 у шторм

5.5. Висновки по розділу 5

1. Удосконалено підхід до розробки і тестування автоматичних модулів керування, який полягає у використанні сертифікованого навігаційного тренажеру для проведення моделювання у замкнутій схемі «Імітатор бортового обчислювача – Математична модель судна навігаційного

тренажеру», на відміну від існуючих рішень, дозволяє використовувати усі переваги навігаційного тренажеру (математичні моделі суден, навігаційні та погодні умови, райони плавання, тощо) для розробки і тестування модулів автоматичного керування, універсальний, дозволяє легко змінювати конфігурацію обладнання, безпечний при проведенні тестування.

2. Створено стенд імітаційного моделювання шляхом інтегрування імітатора бортового обчислювача у локальну обчислювальну мережу навігаційного тренажеру Navi Trainer 5000.

3. Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення обміну інформацією між імітатором бортового обчислювача і навігаційним тренажером Navi Trainer 5000.

4. Створено та налаштовано конфігурацію тренажера Navi Trainer 5000 для стенду імітаційного моделювання.

5. Проведено моделювання процесів автоматичного штормування у замкнутому контурі «Система автоматичного штормування – Тренажерна модель судна» для різних районів плавання, навігаційних і погодних умов.

ВИСНОВКИ

1. Набув подальшого розвитку метод підвищення безпеки штормування, який полягає у побудові та візуалізації сумарної небезпечної щодо перевертання судна області, яка включає область гармонійного резонансу, параметричного резонансу, втрати остійності на попутному хвилюванні, брочинга, ударів групових хвиль в корму судна, на відміну від існуючих рішень, розглядає усі небезпеки у комплексі, автоматизує процес побудови, візуалізує сумарну область небезпек, що дозволяє зменшити вплив люського чинника та підвищити безпеку штормового плавання.
2. Розроблено метод оптимального переміщення фазової точки у безпечну область, який полягає в узгодженій зміні курсу та швидкості судна, на відміну від існуючих рішень, мінімізує час знаходження фазової точки у небезпечній області приблизно на 60%, що дозволяє зменшити ризики перекидання судна, автоматизувати процеси штормування, зменшити вплив люського чинника на процеси штормування, підвищити безпеку штормового плавання.
3. Набув подальшого розвитку метод побудови небезпечних областей, який полягає у вимірюванні кутової швидкості кренування; визначенні спектру хвилювання, із використанням швидкого перетворення Фур'є; визначенні значущих гармонік спектру, енергія яких перевищує енергію демпфування судна; побудові небезпечних щодо перевертання судна областей для значущих гармонік спектру; об'єднанні небезпечних областей значущих гармонік спектру у єдину область; візуалізації цієї області, на відміну від існуючих рішень, автоматизує процес побудови небезпечних областей, враховує усі суттєві складові спектру, враховує демпфування судна, що дозволяє зменшити ризики штормового плавання.
4. Розроблено метод визначення безпечних та оптимальних параметрів штормового плавання, який полягає у вирішенні задачі нелінійної оптимізації з лінійними та нелінійними обмеженнями типу нерівностей у бортовому обчислювачі, на відміну від існуючих рішень, дозволяє автоматично знаходити безпечні та оптимальні параметри штормового плавання, із

врахуванням небезпек перекидання судна: гармонійного резонансу, параметричного резонансу першого та другого типу, втрати остійності на попутному хвилюванні, брочингу та ударів групових хвиль у корму судна, що дозволяє автоматизувати процеси штормування, зменшити затримки на прийняття рішень в процесі штормування приблизно в 30 разів, зменшити вплив людського чинника на процеси штормування, підвищити безпеку штормового плавання.

5. Розроблено метод автоматичного та оптимального штормування, який полягає у оптимізації цільової функції якості керування у бортовому обчислювачі, на відміну від існуючих рішень автоматизує та оптимізує рух судна в штормових умовах плавання, що дозволяє зменшити відхилення від заданого курсу та довжину траєкторії приблизно на 15 %.

6. Удосконалено підхід до розробки і тестування автоматичних модулів керування, який полягає у використанні сертифікованого навігаційного тренажеру для проведення моделювання у замкнутій схемі «Імітатор бортового обчислювача – Математична модель судна навігаційного тренажеру», на відміну від існуючих рішень, дозволяє використовувати усі переваги навігаційного тренажеру (математичні моделі суден, навігаційні та погодні умови, райони плавання, тощо) для розробки і тестування модулів автоматичного керування, що дозволяє легко змінювати конфігурацію обладнання, зменшити витрати на розробку і тестування автоматичних модулів керування, підвищити якість відпрацювання автоматичних модулів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. A. Bakdi et al. Fullest COLREGs evaluation using fuzzy logic for collaborative decision-making analysis of autonomous ships in complex situations. IEEE Trans. Intell. Transport. Syst. (2022).
2. A. Bereznitsky. Local hydroelastic response of ship structures under impact loads from water (slamming). PhD Thesis / – SIECA REPRO, Delft, 2003 – 150 p.
3. A. D. Pipchenko, D. S. Zhukov On risk assessment and decision-making while controlling the ship in adverse weather conditions // Proceedings of the 9th AGA, IAMU, California Maritime Academy, 2008. – pp. 208 – 214.
4. A. D. Pipchenko. On the method of calculation of ship's transverse stability in regular waves // Ships and offshore structures journal. Vol.4 <http://www.informaworld.com/>, Issue 1, Mar 2009. – pp. 9 – 18.
5. A. Eremenko and Y. Zhukov, Smart onboard seafaring safety assurancesystem. Electrical and computer systems, vol. 22, no. 98, pp. 293–300,2016. <https://doi.org/10.15276/eltecs.22.98.2016>
6. A. Sh. Gotman. Study Of Michell's Integral And Influence Of Viscosity And Ship Hull Form On Wave Resistance. Oceanic Engineering International, Vol. 6, No. 2, 2002, pp. 74-115.
7. Alujević, Neven, Ćatipović, Ivan, Malenica, Sime, Senjanović, Vladimir, Nikola. (2019). Ship roll control and power absorption using a U-tube anti-roll tank. Ocean Engineering. 172. 857-870. 10.1016/j.oceaneng.2018.12.007.
8. Bulian, Gabriele and Cercos-Pita, Jose. (2018). Co-simulation of ship motions and sloshing in tanks. Ocean Engineering. 152. 353-376. 10.1016/j.oceaneng.2018.01.028.
9. Chinmaya Prasad Padhy, Debabrata Sen, Prasad Kumar Bhaskaran. Application of wave model for weather routing of ships in the North Indian Ocean // Nat Hazards 44, 2008. - pp. 373–385.
10. D. Zhang et al. Data mining approach for automatic ship-route design for coastal seas using AIS trajectory clustering analysis. Ocean Eng. (2021).
11. Dirk Jürgens, Michael Palm, Voith Schneider Propeller - An Efficient

Propulsion System for DP Controlled Vessels, DYNAMIC POSITIONING CONFERENCE, pp. 1–16, October 13-14, 2009.

12. E. M. Bitner-Gregerse., C. G. Soares, M. Vantorre. Adverse weather conditions for ship manoeuvrability. *Transportation Research Procedia*, 2016, 14:1631-1640

13. E. Tu, G. Zhang, L. Rachmawati et al., Exploiting AIS data for intelligent maritime navigation: A comprehensive survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation System*, vol. 19, no. 5, pp. 1559–1582, May 2016. <https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2724551>

14. E.M. Bitner-Gregersen, K.C. Ewans, M.C. Johnson. (2014). Some uncertainties associated with wind and wave description and their importance for engineering applications. *Ocean Engineering*, 86 (2014), 11–25.

15. F. Baillod. Ship handling in heavy weather // *Seaways: The International Journal of the NI.*, Feb 2004 – pp. 12-13.

16. Guide to wave analysis and forecasting. WMO, 1998 – 168 p.

17. H. Kapps Broaching to or lying abeam // *Seaways: The International Journal of the NI.*, May 2005. – pp. 26-29.

18. H. Shen, H. Hashimoto, A. Matsuda et al. Automatic collision avoidance of multiple ships based on deep Q-learning. *Applied Ocean Research Journal*, vol. 86, pp. 268–288, May 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.02.020>

19. Haghighi, Hamed and Jahedmotlagh, Mohammad-Reza. Ship roll stabilization via sliding mode control and gyrostabilizer.

20. Heavy Weather Damage. MARS Rep. No161, 200610. *Seaways: The International Journal of the NI.*, Mar 2006. – pp. 17-18.

21. Heavy Weather Damage. MARS Rep. No170, 200661. *Seaways: The International Journal of the NI.*, Dec 2006. – pp. 17-19.

22. I. Clark. Stability: Ship's Motion in a Seaway // *Seaways: The International Journal of the NI.*, Aug 2002 – pp. 6-10.

23. I. Clark. Stability: The Parametric Effect of Waves on a Ship's Stability // *Seaways: The International Journal of the NI.*, Feb 2008 – pp. 27-30.

24. I. Clark. Wave encounters and a ship's motion // Seaways: The International Journal of the NI., Feb 2005 – pp. 21-24.
25. I. Dand. High-speed Craft and Bad Weather // Seaways: The International Journal of the NI., Apr 2007 – p. 12-14.
26. I. Popovych, O. Blynova, J. Álvarez, P. Nosov, and S. Zinchenko, “A historical dimension of the research on social expectations of an individual,” *Revista Notas Históricas y Geográficas*, vol. 27, pp. 190–217, Jul.-Dec. 2021. https://www.researchgate.net/publication/353588439_A_historical_dimension_of_the_research_on_social_expectations_of_an_individual
27. I. Popovych, V. Cherniavskyi, S. Dudchenko et al., “Experimental research of effective “The Ship's Captain and the Pilot” interaction formation by means of training technologies,” *Revista Espacios*, vol. 41, no. 11, pp. 30, 2020. <http://www.revistaespacios.com/a20v41n11/20411130.html>
28. IMO. 1999. Model Loading and Stability Manual (MSC/Circ.920).
29. IMO. A.749(18) «IS Code - Intact Stability for All Types of Ships Covered by IMO Instruments».
30. Integrated Decision Support System «IMDSS» Інтегрована морська система підтримки рішень / розробник Oceanweather Inc. www.oceanweather.com.
31. International Maritime Organization, “Guidance to the master for avoiding dangerous situations in following and quartering seas,” IMO MSC/Circ.707., Ref. T1/2.04/, 1995. Available: <https://docplayer.net/8648247-Imo-msc-circ-707-19-october-1995-reft1-2-04-guidance-to-the-master-for-avoiding-dangerous-situations-infollowing-and-quartering-seas.html>
32. International Maritime Organization, “Recommendation on a severe wind and rolling criterion (weather criterion) for the intact stability of passenger and cargo ships of 24 meters in length and over, IMO Resolution A.562(14), Nov. 1985. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.562\(14\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.562(14).pdf)
33. International Maritime Organization, “Revised guidance to the master for avoiding dangerous situations in adverse weather and sea conditions,” IMO

- MSC.1/Circ.1228, 2007. Available: <https://www.lisr.com/revised-guidance-master-avoiding-dangeroussituations-adverse-weather-and-sea-conditions>
34. Irkal, Mohsin, Seeninaidu, Nallayarasu, Bhattacharya, Subrata. (2016). CFD approach to roll damping of ship with bilge keel with experimental validation. *Applied Ocean Research*. 55. 1-17. 10.1016/j.apor.2015.11.008.
 35. Irkal, Mohsin, Seeninaidu, Nallayarasu, Bhattacharya, Subrata. (2016). CFD Simulation of Roll Damping Characteristics of a Ship Mid-Section With Bilge Keel. V002T08A050. 10.1115/OMAE2016-54342.
 36. Irkal, Mohsin, Seeninaidu, Nallayarasu, Bhattacharya, Subrata. (2016). CFD Simulation of Roll Damping Characteristics of a Ship Mid-Section With Bilge Keel. V002T08A050. 10.1115/OMAE2016-54342.
 37. J. Bélanger, P. Venne, and J.-N. Paquin. The What, Where and Why of Real-Time Simulation. *Opal-RT Technologies*, 1751 Richardson, suite 2525, Montréal, Canada. P 37-49.
 38. J. Journee, J. M. Verification and Validation of ship motions program SEAWAY. 2001, <http://www.shipmotions.nl/>
 39. J. K. Panigrahi, J. K. Tripathy, P. A. Umesh. Optimum tracking of ship routes in 3g-WAM simulated rough weather using IRS-P4 (MSMR) analyzed wind fields // *J. Indian Soc. Remote Sens.* (June 2008) 36 – pp. 149-158
 40. J. Lisowski, Mohamed-Seghir M., Safe ship control methods based on fuzzy set theory. *Polish Journal of Environmental Studies*. 17(3C), pp. 55-58, 2008.
 41. J. Lisowski. (2019). Multi-criteria Optimization of Multi-step Matrix Game in Collision Avoidance of Ships. *TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 13(1):125-131. DOI: 10.12716/1001.13.01.12
 42. J. Lisowski. Cooperative and non-cooperative game control strategies of the ship in collision situation. *TransNav: Int. J. Marine Nav. Safe. Sea Transport*. 12(1) (2018), 83-91. DOI: 10.12716/1001.12.01.09
 43. J. Lisowski. Game Control Methods Comparison when Avoiding Collisions with Multiple Objects Using Radar Remote Sensing. *Remote Sens.* 2020, 12(10), 1573;

<https://doi.org/10.3390/rs12101573>

44. J. Lisowski. Game control methods in navigator decision support system. *Journal of Archives of Transport*, 17, pp. 133-147, 2005.
45. J. Lisowski. Sensitivity of Safe Trajectory in a Game Environment on Inaccuracy of Radar Data in Autonomous Navigation. *Sensors* 2019, 19(8), 1816; <https://doi.org/10.3390/s19081816>
46. J. Park, J. Choi, and H.T. Choi, COLREGS-compliant path planning considering time-varying trajectory uncertainty of autonomous surface vehicle. *Electronics Letters*, vol. 55, no. 4, pp. 222–224, Feb. 2019. <https://doi.org/10.1049/el.2018.6680>
47. K. Buckens. Ship dynamics and rolling // *Seaways: The International Journal of the NI.*, Apr 2005 – pp. 13-14.
48. K.A. McTaggart. SHIPMO7: An Updated Strip Theory Program for Predicting Ship Motions and Sea Loads in Waves - (DREA TM 96/243). Defence Research Establishment Atlantic Dartmouth, 1997. – 128 p.
49. K.J. Spyrou. Designing against parametric instability in following seas / K.J. Spyrou– *Ocean Engineering* 27, 2000. – pp. 625–653.
50. K.J. Spyrou. Prediction potential of the parametric rolling behavior of a postpanamax containership / *Ocean Engineering*, 2008. – 10 p.
51. Katsutoshi Takeda, Masanori Akagi, Kinya Ishibashi. Introduction of "Guidelines on Preventive Measures against Parametric Rolling". *ClassNK Technical Journal* No. 7, 2023 (I).
52. Kianejad, Sadra, Enshaei, Hossein, Duffy, Jonathan, Ansarifard, Nazanin, Ranmuthugala, Dev. (2019). Ship Roll Damping Coefficient Prediction Using CFD. *Journal of Ship Research*. 63. 10.5957/JOSR.09180061.
53. Kianejad, Sadra, Lee, Jaesuk, Liu, Yi, Enshaei, Hossein. (2018). Numerical Assessment of Roll Motion Characteristics and Damping Coefficient of a Ship. 6. 101.
54. Kumar, Ranjan, Mitra, Ranjan. (2023). Controlling period-doubling route to chaos phenomena of roll oscillations of a biased ship in regular sea waves. 10.21203/rs.3.rs-2506716/v1.

55. L. Ferranti et al. Coordination of multiple vessels via distributed nonlinear model predictive control. European control conference ECC (2018).
56. L. Yishan, G. Zhiqiang, Y. Jie et al., Prediction of ship collision risk based on CART. IET Intelligent Transport Systems, vol. 12, no. 10, pp. 1345–1350, Oct. 2018. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2018.5281>
57. Lian, Jijian, Wang, Haijun, Guo, Yaohua, Pengwen, Wang. (2023). Effects of damping plate on the motion response of transport ships under waves. Applied Ocean Research. 134. 10.1016/j.apor.2023.103507.
58. M. Rossister. Panamax ‘beam-on’ in heavy weather // Seaways: The International Journal of the NI., May 2009. – pp. 3.
59. M. Tsujimoto, K. Shibata, M. Kuroda, K. Takagi. A Practical Correction Method for Added Resistance in Waves // Conference Proceedings of The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol.6, 2008. - pp.27-30.
60. M.C. Tsou. Multi-target collision avoidance route planning under an ECDIS framework. Ocean Eng. (2016).
61. M.K. Ochi, L.E. Motte. Prediction of slamming characteristics and hull responses for ship design / Trans SNAME 81, 1973. - pp. 144–190188
62. MAIB: Report on the investigation into the loss of 137 containers from the container ship CMA CGM G.Washington in the North Pacific Ocean on 20 January 2018, 2020.
63. Maritime Consultative Organization, “Recommendation on intact stability for passenger and cargo ships under 100 meters in length, IMCO Resolution A.167, Nov. 1968.
[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.167\(ES.IV\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.167(ES.IV).pdf)
64. Marzouk, Osama, Nayfeh, Ali. (2009). Control of ship roll using passive and active anti-roll tanks. Ocean Engineering - OCEAN ENG. 36. 661-671. 10.1016/j.oceaneng.2009.03.005.
65. MEPC 62/5/19, 2011. Reduction of GHG emissions from ships – Consideration of the Energy Efficiency Design Index for New Ships. Minimum propulsion power

to ensure safe manoeuvring in adverse conditions, Sub. by IACS, BIMCO, CESA, INTERCARGO, INTERTANKO, WSC.

66. MEPC 67/INF.22, 2014. Japanese activity on "Minimum propulsion power to maintain the manoeuvrability of ships in adverse conditions". Sub. by Japan.

67. MEPC.232(65), 2013. Interim guidelines for determining minimum propulsion power to maintain the Manoeuvrability in adverse conditions.

68. N. Kalra et al. Driving to safety: how many miles of driving would it take to demonstrate autonomous vehicle reliability? *Transport. Res. Part A Policy Pract.* (2016).

69. North Sails News, "How to a sail safety in a storm", 2016. Available: <https://www.northsails.com/sailing/en/2016/09/how-to-sailsafely-through-a-storm>

70. P P, Vijith, Rajendran, Suresh. (2022). Estimation of Vertical, Horizontal and Torsional Rigid Body Loads of an Ultra-Large Container Ship (ULCS) in Regular Waves. 10.1115/OMAE2022-78474.

71. P. K. Minne, "Automatic testing of maritime collision avoidance algorithms", Master thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2017.

72. P. Kaplan, I. Raff. Evaluation and Verification of Computer Calculations of Waveinduced Ship Structural Loads. Ship Structure Comitee SSC 229. Final Report on Project SR-174, 1972. – 64 p.

73. P. Nosov, A. Ben, S. Zinchenko, I. Popovych, V. Mateichuk, H. Nosova. Formal approaches to identify cadet fatigue factors by means of marine navigation simulators // 16th International Conference on ICT in Research, Education and Industrial Applications (ICTERI-2020), 06-10 Oktober 2020, Kharkiv, Ukraine <http://ceur-ws.org/Vol-2732/20200823.pdf>

74. P. Nosov, V. Cherniavskiy, S. Zinchenko, I. Popovych, Yu. Prokopchuk, and M. Safonov, "Identification of distortion of the navigator's time in model experiment," *Bulletin of University of Karaganda. Instrument and experimental techniques*, vol. 4, no. 100, pp. 57–70, 2020. <https://doi.org/10.31489/2020Ph4/57-70>

75. P. S. Nosov, I. S. Popovych, V. V. Cherniavskiy, S. M. Zinchenko, Yu. A. Prokopchuk, and D. V. Makarchuk, "Automated identification of an operator

- anticipation on marine transport,” *Radio Electronics, Computer Science, Control*, vol. 3, pp. 158–172, 2020. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-3-15>
76. Perez, Tristan. (2005). *Ship Motion Control Course Keeping and Roll Stabilisation Using Rudder and Fins*.
77. Perez, Tristan. (2009). *Analysis of Ship Roll Gyrostabiliser Control*. 310-315. 10.3182/20090916-3-BR-3001.00050.
78. Pierson, W. J., and L. Moskowitz, 1964: A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of A. A. Kitaigorodskii. *J. Geophys. Res.*, **69**, 5181–5190.
79. Pierson, W. J., G. Neumann, and R. James, 1955: *Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics*. H.O. Publ. 603, U. S. Navy Hydrographic Office, 284 pp.
80. Pongduang, Sathit, C, Chatchapol, Iamraksa, Phansak. (2021). *Non-linearity Analysis of Ship Roll Gyro-stabilizer Control System*. *Sustainable Marine Structures*. 3. 10.36956/sms.v3i1.316.
81. Pongduang, Sathit, Chungchoo, Chatchapol, Iamraksa, Phansak. (2020). *Nonparametric Identification of Nonlinear Added Mass Moment of Inertia and Damping Moment Characteristics of Large-Amplitude Ship Roll Motion*. *Journal of Marine Science and Application*. 19. 10.1007/s11804-020-00129-3.
82. R. Isermann, J. Schaffnit, and S. Sinsel. *Hardware-in-the-loop simulation for the design and testing of engine-control systems*. *IFAC Algorithms and Architectures for Real-Time Control*, Vol. 31, no 4, pp. 1-10, Apr. 1998. Doi:10.1016/S1474-6670(17)42125-2.
83. R. Miratsu, K. Sasmal, T. Kodaira, T. Fukui, T. Zhu, T. Waseda, 2022. *Evaluation of ship operational effect based on long-term encountered sea states using wave hindcast combined with storm avoidance model*. *Mar. Struct.* 86, 103293.
84. R. Shevchenko, V. Cherniavskyi, S. Zinchenko, M. Palchynska, S. Bondarevich, P. Nosov, and I. Popovych. *Research of psychophysiological features of response to*

- stress situations by future sailors. *Revista Inclusiones*, vol. 7, no. Especial, Oct.-Dec., pp. 566–579, 2020. <http://ekhsuir.kspu.edu/handle/123456789/12273>
85. R. Skjetne, and O. Egeland. Hardware-in-the-loop testing of marine control system. *Modeling, Identification and Control*, Vol. 27, no. 4, pp. 239–258, Apr. 2006. Doi:10.4173/mic.2006.4.3.
86. R. Szlapczynski et al. Determining and visualizing safe motion parameters of a ship navigating in severe weather conditions. *Ocean Eng.* (2018).
87. R.M. Isherwood. Wind resistance of merchant ships // *Transactions of Royal Institution of Naval Architects*, Vol. 115, 1973. – pp. 327-338.
88. R.W. James Application of wave forecasts to Marine Navigation / U.S. Navy Hydrographic office, 1959. – pp. 85.
89. RESOLUTION MSC.267(85) ADOPTION OF THE INTERNATIONAL CODE ON INTACT STABILITY, 2008, adopted on 4 December 2008.
90. RESOLUTION MSC.319(89) – Adoption of Amendments to Part B of the International Code on Intact Stability, 2008, Adopted on 20 May 2011.
91. RESOLUTION MSC.398(95) – Amendments to Part B of the International Code on Intact Stability, 2008, Adopted on 5 June 2015.
92. RESOLUTION MSC.414(97) – Amendments to the Introduction and Part A of the International Code on Intact Stability, 2008, Adopted on 25 November 2016.
93. RESOLUTION MSC.444(99) - Amendments to Part A of the International Code on Intact Stability, 2008, adopted on 24 May 2018.
94. RESOLUTION MSC.75(69) ADOPTION OF AMENDMENTS TO THE CODE ON INTACT STABILITY FOR ALL TYPES OF SHIPS COVERED BY IMO INSTRUMENTS (RESOLUTION A.749(18)), adopted on 14 May 1998.
95. Riding out a Storm. *MARS Rep. No173*, 200716. *Seaways: The International Journal of the NI.*, Mar 2007 – p. 12-14.
96. S. A. Baniela. Roll motion of a ship and the roll stabilizing effect of bilge keels // *The Journal of Navigation*. Vol.61 No4, Oct 2008 – pp. 667- 686.
97. S. Henriksen. Automatic Testing of Maritime Collision Avoidance Methods with Sensor Fusion. (2018). Waymo.

98. S. M. Zinchenko, A. P. Ben, P. S. Nosov, I. S. Popovych, P. P. Mamenko, and V. M. Mateichuk. Improving the accuracy and reliability of automatic vessel motion control system. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, vol. 2, pp. 183–195, 2020. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-2-19>
99. S. Pouria, and S. Yousefpour. State of the art: hardware in the loop modeling and simulation with its applications in design, development and implementation of system and control software. *International Journal of Dynamics and Control*, Vol. 3, pp. 470–479, 2015. DOI: 10.1007/s40435-014-0108-3.
100. S. Stevens, M. Parsons. Effects of Motion at Sea on Crew Performance: A Survey // *Marine Technology*, Vol. 39, N1, Jan 2002 – pp.29-47.
101. S. Zinchenko, P. Nosov, V. Mateichuk, P. Mamenko, and O. Grosheva. Use of navigations simulators for development and testing ship control systems. in: *Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia, prysviachena pamiati profesoriv Fomina Y.Y. i Semenova V.S.*, Odessa-Istanbul-Odessa, 24-28 apr. 2019. Odessa: National University "Odessa Maritime Academy", pp. 350-355.
102. S. Zinchenko, P. Nosov, V. Mateichuk, P. Mamenko, I. Popovych, and O. Grosheva. Automatic collision avoidance system with many targets, ncluding maneuvering ones. *Bulletin of University of Karaganda, Technical Physics*, vol. 4, no. 96, pp. 69–79, 2019.
103. S. Zinchenko, V. Lyashenko and V. Mateichuk. Sposib rozkhodzhennya z nebezpechnymy tsilyamy. *Ministerstvo ekonomichnoho rozvytku i torhivli Ukrainy. Promyslova vlasnist. Vynakhody. Korysni modeli. Topohrafiyi intehralnykh mikroskhem*, vol. 21, no. 1, p. 4.49. 2018.
104. S. Zinchenko, V. Mateichuk, V. Lyashenko, A. Ben, O. Tovstokoryi and O. Grosheva. Sposib vykorystannya trenazhernoho obladnannya dlya rozrobky ta testuvannya system keruvannya rukhom suden. *Ministerstvo ekonomichnoho rozvytku i torhivli Ukrainy. Promyslova vlasnist. Vynakhody. Korysni modeli. Topohrafiyi intehralnykh mikroskhem*, vol. 8, no. 1, p. 4.126. 2019.
105. S.Zinchenko, O.Tovstokoryi, V.Mateichuk, P.Nosov, I.Popovych, I.Gritsuk. Automatic vessel steering in a storm // *Electrical, Control and Communication*

Engineering, September, vol. 18, no. 1, pp. 66–74, 2022, <https://doi.org/10.2478/ecce-2022-0009>"

106. Sasmal, Kaushik, Miratsu, Rei, Kodaira, Tsubasa, Fukui, Tsutomu, Zhu, Tingyao, Waseda, Takuji. (2021). Statistical model representing storm avoidance by merchant ships in the North Atlantic Ocean. *Ocean Engineering*. 235. 109163. 10.1016/j.oceaneng.2021.109163.

107. Semedo, Alvaro, Vettor, Roberto, Breivik, Oyvind, Sterl, Andreas, Guedes Soares, Carlos, Reistad, Magnar. (2013). Wind sea and swell waves in the Northeast Atlantic Ocean. 10.1201/b15813-129.

108. Ships Business. Ships navigation in heavy weather and recommended action by master. 2015. <http://shipsbusiness.com/navigation-in-heavy-weather.html>

109. Sui, Congbiao. (2021). Energy Effectiveness and Operational Safety of Low-Powered Ocean-going Cargo Ship in Various (Heavy) Operating Conditions. 10.4233/uuid:2f965fc6-c8df-4f4c-af20-702067901c91.

110. T. Hwang et al. Navigation situation clustering model of human-operated ships for maritime autonomous surface ship collision avoidance tests. *J. Mar. Sci. Eng.* (2021)

111. T. Johansen, T. Fossen, and B. Vik, “Hardware-in-the-loop testing of DP systems,” in: *Dynamic Positioning Conference*, 15-16 Nov. 2005, Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, pp. 1-16, 2005.

112. T. Okada, “Marine weather ship handling in rough sea,” *Japan P&I Club. P&I Loss Prevention Bulletin*, vol. 45, Apr. 2019. Available: <chromeextension://efaidnbmninnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.piclub.or.jp/wp-content/uploads/2019/04/Loss-Prevention-Bulletin-Vol.45-Full.pdf>

113. T.A. Johansen et al. Ship collision avoidance and COLREGS compliance using simulation-based control behavior selection with predictive hazard assessment. *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.* (2016)

114. Tasai F. On Damping Force and added Mass of Ships Heaving and Pitching // *Soc. N. A. Japan*, 105, 1959. – pp. 47-56.

115. Taskar, Bhushan, Dasgupta, Debabrata, Nagarajan, Vishwanath, Chakraborty, Suman, Chatterjee, Anindya, Sha, O.. (2014). CFD aided modelling of anti-rolling tanks towards more accurate ship dynamics. *Ocean Engineering*. 92. 10.1016/j.oceaneng.2014.09.035.
116. The fiber optic hull stress monitoring system «SENSFIB» / Компанія з розробки волоконно-оптичних автоматизованих систем контролю мореплавності Light Structures AS (Норвегія). — URL: <http://lightstructures.no/>.
117. Townsend, Nicholas, Murphy, A.J., Shenoi, R.. (2007). A new active gyro-stabiliser system for ride control of marine vehicles. *Ocean Engineering*. 34. 1607-1617. 10.1016/j.oceaneng.2006.11.004.
118. Transas MIP Ltd, Navi-Trainer Professional 5000 v5.35 Bridge Manual. 2014.
119. Transas MIP Ltd, Navi-Trainer Professional 5000 v5.35 Instructor Manual, 2014.
120. Transas MIP Ltd, Navi-Trainer Professional 5000 v5.35 Technical Description And Installation Manual, 2014.
121. V. Bolbot et al. Automatic traffic scenarios generation for autonomous ships collision avoidance system testing. *Ocean Eng.* (2022).
122. V. Khramushin (2003). Prediscovery for storm seakeeping of ship. Vladivostok, “Dalnauka” FEB RAS Publishing.
123. V. Khramushin, S. Antonenko, A. Komaritsyn, et al. (2004) History of storm seakeeping from antique and our days (with multimedia application). Sakhalin Books Publishing (MS to the press).
124. V.M. Mateichuk, S.M. Zinchenko, O.M. Tovstokoryi, K.V. Kyrychenko, P.P. Mamenko. Method of automatic storming by movement of phase point to the safe zone // Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми сталого розвитку морської галузі» (PSDMI-2023), 22 листопада, 2023.
125. Van Gorp, Merel, Goyens, Jana, Alfaro, Michael, Wassenbergh, Sam. (2022). Keels of boxfish carapaces strongly improve stabilization against roll. *Journal of The Royal Society Interface*. 19. 10.1098/rsif.2021.0942.
126. Vasily Khramushin. Stormy Seakeeping and Navigation Safety Researches for

Hull Form Design. 2nd Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics - APHydro-2004. At: Sangnam International House, Pusan National University, Busan, Korea.

127. Vessel Optimization and Safety System «VOSS» / Компанія розробник системи VOSS, Ocean Systems, Inc (CIIA). — URL: <http://www.oceansystemsinc.com/>.

128. Vettor, Roberto, Guedes Soares, Carlos. (2015). Assessment of the Storm Avoidance Effect on the Wave Climate along the Main North Atlantic Routes. *Journal of Navigation*. -1. 1-18. 10.1017/S037346331500048X.

129. W. France, M. Levadou, T.W. Treacle et al. An investigation of head-sea parametric rolling and its influence on container lashing systems // *Marine Technology*, Vol 40, No 1, pp1-19, January 2003.

130. W. Froude. On the rolling of ships / W. Froude— TINA, 1861.186

131. Wu, Hao, Rao, Runze, Guo, Hengyu, Zhang, Dan, Li, Xiaowei, Zhao, Li, Li, Zhongjie, Peng, Yan. (2024). Research on performance of solid-liquid triboelectric nanogenerators based on anti-rolling tank. *Applied Energy*. 353. 122153. 10.1016/j.apenergy.2023.122153.

132. Y. Huang et al. Generalized velocity obstacle algorithm for preventing ship collisions at sea *Ocean Eng.* (2019).

133. Y.A. Ahmed et al. COLREGs compliant Fuzzy-Based collision avoidance system for multiple ship encounters.*J. Mar. Sci. Eng.* (2021).

134. Y.S. Shin, V.L. Belenky, J.R. Paulling et al. Criteria for Parametric Roll of Large Containerships in Longitudinal Seas. – *SNAME*, 2004 – 24 p.185

135. Y.S. Shin, V.L. Belenky, W.M. Lin et al. Nonlinear Time Domain Simulation Technology for Seakeeping and WaveLoad Analysis for Modern Ship Design / *ABS Technical Papers*, 2003. <http://www.eagle.org>

136. Zheng Yuemin et al. Soft Actor–Critic based active disturbance rejection path following control for unmanned surface vessel under wind and wave disturbances *Ocean Eng.* (2022)

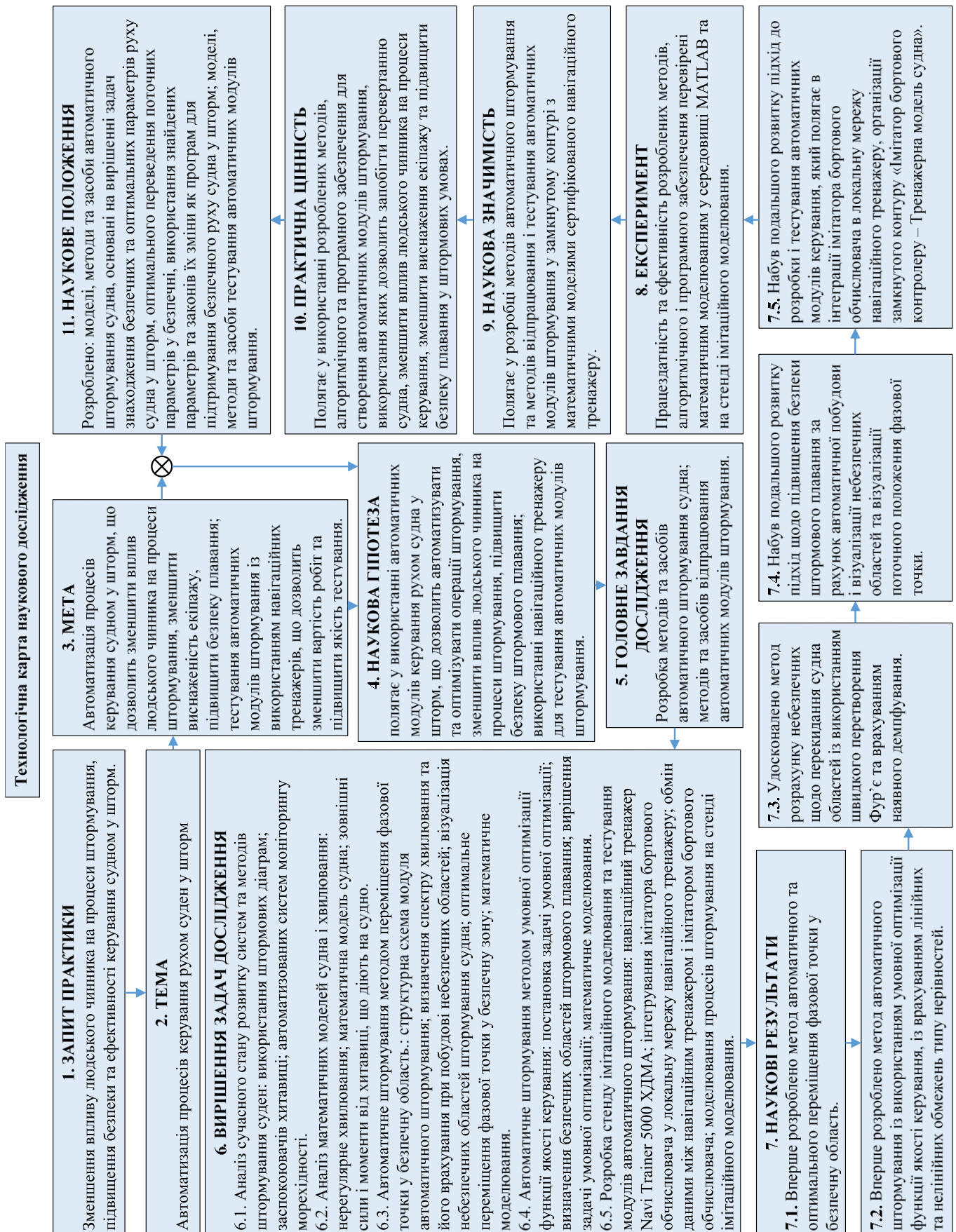
137. Zhengyu Zhou, Yingjun Zhang. A system for the validation of collision avoidance algorithm performance of autonomous ships. *Ocean Engineering*. Vol. 280, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114600>.
138. Zhou Chang et al. Obstacle avoidance strategy for an autonomous surface vessel based on modified deep deterministic policy gradient. *Ocean Eng.* (2022)
139. Бородай И.К., Нецветаев Ю.А. Мореходность судов. Методы, оценки. Л. Судостроение. 1982г. 288с.
140. В.М. Матейчук, С.М. Зінченко, П.П. Маменко, К.В. Кириченко. Врахування наявного демпфування та спектру зовнішніх впливів у задачі автоматичного штормування // Матеріали XIV Міжнародної науково - практичної конференції "Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті" (MINTT-2022), Херсон, 25-27 травня 2022р.
141. В.М. Матейчук, С.М. Зінченко, П.С. Носов, П.П. Маменко, К.В. Кириченко. Автоматичне штормування із врахуванням наявного демпфування // Матеріали II Міжнародної науково - практичної конференції "Проблеми сталого розвитку морської галузі", Херсон, 7 грудня 2022 року
142. В.М. Матейчук, С.М. Зінченко, П.С. Носов, П.П. Маменко, К.В. Кириченко. Врахування амплітудно-частотної характеристики хвильового впливу на судно під час шторму // Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології і автоматизація", Одеський національний технологічний університет, 20-21 жовтня 2022, м.Одеса
143. В.О. Діордієв. Проблеми та перспективи суднобудівної галузі України у глобальному контексті. http://www.economy.nauka.com.ua/pdf/10_2018/155.pdf
144. Ветер и волны в океанах и морях: Справочные данные. М., Транспорт, с.360, 1974. (Регистр СССР). Вознесенский А.И. Теоретические и методологические основы исследования особенностей поведения корабля на морском волнении. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора техн. наук. ЛКИ, 1969.
145. И. К. Бородай, Ю. А. Нецветаев. Мореходность судов. Л., Судостроение, 1982.

146. Л.Л. Вагущенко, А.Л. Вагущенко, С.И. Заичко. Бортовые автоматизированные системы мореходности / Одесса, Феникс, 2005. – 274 с.
147. Морська доктрина України на період до 2035 року. Затверджена постановою КМУ від 07.10.2009 № 1307 (із змінами, внесеними згідно з постановою КМУ від 18.12.2018 № 1108).
148. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року. Схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р.
149. С. Д. Чижиумов Основи динаміки суден на хвилюванні. Навчальний посібник. Комсомольск на Амуре. 2010.
150. С. М. Зінченко, В. М. Матейчук, В. Г. Ляшенко. Використання інформаційних систем моделювання для розробки та тестування систем автоматичного керування рухом судна // Матеріали V МНПК «Безпека життєдіяльності на транспорті а виробництві: освіта, наука, практика», Херсон, 13-15 вересня 2018р., с.27-29
151. С.Н. Благовещенский А.Н. Холодилин. Справочник по статике и динамике корабля. Том 2. - Л.: Судостроение, 1975.
152. Система моніторингу параметрів мореплавства «HULLMOS» / розробник фірма SIREHNA. <http://www.hullmos.com/>.
153. Система підтримки прийняття рішень «OCTOPUS-DSS» / розробник фірма AMARCON BV (ABB Group). <https://new.abb.com/marine/systems-and-solutions/digital/ABB-Ability-OCTOPUS-Marine-Advisory-System>.
154. Справочник по теории корабля. Том 2. Статика судов. Качка судов. / Под ред. Я.И. Войткунского. - Л.: Судостроение, 1985. – 440 с.
155. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони. Ратифіковано Законом № 1678-VII від 16.09.2014.
156. Ю. В. Ремез. Качка корабля. Суднобудування, 1983. 328с.
157. Ю.М. Крылов. Спектральные методы исследования и расчета ветровых волн. Гидромет, 1966. 258с.

ДОДАТКИ

Додаток А.

Технологічна карта наукового дослідження



Додаток Б.

Лістинги основних програм

Диспетчер задачі

```

%disp диспетчер задачі
%Тема. АВТОМАТИЧНЕ ШТОРМУВАННЯ
%Модель судна. Сормовський, 1 гвинт + 1 стерно
clear;
format long
global t wv
tmax=50;           %час інтегрування
dt=0.2;           %крок інтегрування
nt=0;             %лічильник тактів
t=nt*dt;
%параметри печати
dp=1;             %крок друку
jp=1;
tp=t;
%Основні константи
g=9.8;           %прискорення вільного падіння
cc(1)=g;
rowd=1.184;       %густина повітря при t=25 град С (кг/м3)
cc(2)=rowd;
rosm=1025;        %густина морської води при t=25 град С (кг/м3)
cc(3)=rosm;

vessel=1;         %вибір судна (1-Сормовський, 2-ESNAAD-224 Platform Supply
Vessel)
%Характеристики судна Сормовський
if vessel==1
Vmax=10.3*1853/3600; %максимальна швидкість
cc(4)=Vmax;
Wmax=2*640*1000;    %максимальна потужність СЕУ, вт
cc(5)=Wmax;
Pmax=Wmax/Vmax;     %максимальна сила упору гвинта
cc(6)=Pmax;
k=Pmax/Vmax^2;      %коефіцієнт лобового опору
cc(7)=k;
L=119.2;           %довжина
cc(8)=L;
B=13.4;            %ширина
cc(9)=B;
T=3.5;             %осадка
cc(10)=T;
lam=2*T/L;         %видовження корпусу
cc(11)=lam;
sigmad=0.95;       %коефіцієнт повноти форми корпусу
cc(12)=sigmad;
Fd=L*T*sigmad;     %площа діаметрального батоксу

```

```

cc(13)=Fd;
Fa=1300; %площа парусності м2
cc(14)=Fa;
m=4514*1000; %маса судна кг
cc(15)=m;
Ix=m*B^2/12; %моменти інерції судна ix=6,75^10^7
cc(16)=Ix;
Iy=m*L^2/12; %Iy=5,3*10^9
cc(17)=Iy;
Iz=m*(L^2+B^2)/12; %Iz=5,4*10^9
cc(18)=Iz;
k11=T/(2*L); %коефіцієнти приєднаних мас води
cc(19)=k11;
k22=2*T*(1-B/(2*L))/B;
cc(20)=k22;
k33=0.03;
cc(21)=k33;
k44=0.2;
cc(22)=k44;
k55=0.2;
cc(23)=k55;
k66=2*T*(1-1.6*B/L)/B;
cc(24)=k66;
mul1=m*(1+k11); % маса судна із врахуванням приєднаних мас води
cc(25)=mul1;
mu22=m*(1+k22);
cc(26)=mu22;
mu33=m*(1+k33);
cc(27)=mu33;
mu44=Ix*(1+k44);
cc(28)=mu44;
mu55=Iy*(1+k55);
cc(29)=mu55;
mu66=Iz*(1+k66);
cc(30)=mu66;
nubsm=50; %nubsm впливає на крок спіралі =10
cc(31)=nubsm;
nubwd=10; %nubwd
cc(32)=nubwd;
nuw=50; %коефіцієнт впливу кутової швидкості на бокову силу
cc(33)=nuw;
mub=5; %mub коефіцієнт впливу кута дрейфу на момент рискання
cc(34)=mub;
muw=300; %muw коефіцієнт демпфування=350
cc(35)=muw;
nd=0.8*sqrt(3*T/B); %nd вплив осадки на момент рискання
cc(36)=nd;
kwd=0.0263; %kwd частина аеродинамічного опору
cc(37)=kwd;
xwd=-L/8; %xwd координати центру вітрильності(від ЦВ)
cc(38)=xwd;
ywd=0; %ywd

```

```

cc(39)=ywd;
zwd=-T; %zwd
cc(40)=zwd;
hr=1; %hr(м) висота керма
cc(41)=hr;
br=0.5; %br(м) ширина керма
cc(42)=br;
sr=hr*br; %sr(м) площа керма
cc(43)=sr;
lamr=hr^2/sr; %lamr видовження керма
cc(44)=lamr;
gle=140/(735.5*3600); %gle(г/(вт*сек) питомі витрати палива
cc(45)=gle;
end
%Характеристики судна ESNAAD-224 (Supply vessel)
if vessel==2
Vmax=11.0*1853/3600; %максимальна швидкість,м/с
cc(4)=Vmax;
Wmax=1250*1000; %максимальна потужність ОДНОГО АСД, вт (всього
два)
cc(5)=Wmax;
Pmax=Wmax/Vmax; %максимальна сила упору гвинта
cc(6)=Pmax;
k=Pmax/Vmax^2; %коефіцієнт лобового опору
cc(7)=k;
L=70.4; %довжина
cc(8)=L;
B=15.77; %ширина
cc(9)=B;
T=4.85; %осадка (максимальна)
cc(10)=T;
lam=2*T/L; %видовження корпусу
cc(11)=lam;
sigmad=0.95; %коефіцієнт повноти форми
cc(12)=sigmad;
Fd=L*T*sigmad; %площа діаметрального батоксу
cc(13)=Fd;
Fa=1300; %площа парусності м2
cc(14)=Fa;
m=4020*1000; %маса судна (максимальна), кг
cc(15)=m;
Ix=m*B^2/12; %моменти інерції судна
cc(16)=Ix;
Iy=m*L^2/12;
cc(17)=Iy;
Iz=m*(L^2+B^2)/12;
cc(18)=Iz;
k11=T/(2*L); %коефіцієнти приєднаних мас води
cc(19)=k11;
k22=2*T*(1-B/(2*L))/B;
cc(20)=k22;
k33=0.03;

```

```

cc(21)=k33;
k44=0.1;
cc(22)=k44;
k55=0.2;
cc(23)=k55;
k66=2*T*(1-1.6*B/L)/B;
cc(24)=k66;
mul1=m*(1+k11);
cc(25)=mul1;
mu22=m*(1+k22);
cc(26)=mu22;
mu33=m*(1+k33);
cc(27)=mu33;
mu44=Ix*(1+k44);
cc(28)=mu44;
mu55=Iy*(1+k55);
cc(29)=mu55;
mu66=Iz*(1+k66);
cc(30)=mu66;
nubsm=10;
cc(31)=nubsm;
nubwd=10;
cc(32)=nubwd;
nuw=50;
cc(33)=nuw;
mub=5;
cc(34)=mub;
muw=300;
cc(35)=muw;
nd=0.8*sqrt(3*T/B);
cc(36)=nd;
kwd=0.0263;
cc(37)=kwd;
xwd=-L/8;
cc(38)=xwd;
ywd=0;
cc(39)=ywd;
zwd=-T;
cc(40)=zwd;
hr=1;
cc(41)=hr;
br=0.5;
cc(42)=br;
sr=hr*br;
cc(43)=sr;
lamr=hr^2/sr;
cc(44)=lamr;
gle=140/(735.5*3600);
cc(45)=gle;
end

```

%маса судна із врахуванням приєднаних мас води
 %момент інерції судна із врахуванням приєднаних мас води
 %nubsm впливає на шаг спирали =10
 %nubwd
 %коефіцієнт впливу кутової швидкості на бокову силу
 %mub коефіцієнт впливу кута ковзання на момент
 %muw коефіцієнт демпфування
 %nd вплив осадки на момент ристання
 %kwd частина вітрового опору
 %xwd координати центру парусності (від Центру Ваги)
 %ywd
 %zwd
 %hr(м) висота керма
 %br(м) ширина керма
 %sr(м) площа керма
 %lamr видовження керма
 %gle(г/(вт*сек)) питома витрата палива
 %вектор стану

```

xt(1:12)=0;
xn(1)=0;
xn(2)=0.0;
xn(3)=0;
xn(4)=0.0;
xn(5)=0.0;
xn(6)=0;
xn(7)=0;
xn(8)=0;
xn(9)=0*pi/180;
xn(10)=0;
xn(11)=0;
xn(12)=0;
%задані параметри руху
xz(1)=5.14;
cc(46)=xz(1);
xz(2)=0;
cc(47)=xz(2);
xz(3)=0;
cc(48)=xz(3);
xz(4)=0;
cc(49)=xz(4);
xz(5)=0;
cc(50)=xz(5);
xz(6)=0;
cc(51)=xz(6);
xz(7)=0;
cc(52)=xz(7);
xz(8)=0;
cc(53)=xz(8);
xz(9)=0*pi/180;
cc(54)=xz(9);
xz(10)=0;
cc(55)=xz(10);
xz(11)=0;
cc(56)=xz(11);
xz(12)=0;
cc(57)=xz(12);
%початкові значення системи керування
intDpsi=0;
відхилення
intDy=0;
%налаштування графіків
grtype=1;
clc;

while t<=tmax
    [wd,sm]=meteo(t);
    %xm=sensor(xn,wd,sm,t);
    [teta,delta,intDpsi,intDy]=sysctr12(xn,intDpsi,intDy,cc);
    xt=runge12( xn,teta,delta,wd,sm,cc,dt );
    xn=xn+xt*dt;

```

%vx м/с -початкова поздовжня швидкість
 %vy
 %Vz
 %Wx 1/с -початкова кутова швидкість крену
 %Wy
 %Wz
 %рад.,крен
 %рад.,диферент
 %рад.,курс
 %м,початкове положення на OXg
 %м,початкове положення на OYg
 %м,початкове положення на OZg
 %м/с
 %початкові значення інтегралів кутового і бокового
 %1-графіки від часу, 2-на фазовій площині
 %очистка командного рядка

```

    if t>=tp
        xp(1:12,jp)=xn(1:12);
        xp(13,jp)=teta;
        xp(14,jp)=delta;
        jp=jp+1;
        tp=jp*dp;
    end
    nt=nt+1;
    t=nt*dt;
end

```

```

if grtype==1
    subplot(3,4,1);
    hold on;
    plot(xp(1,:), 'b');
    grid on;
    title('    Vx');
    hold off;

    subplot(3,4,2);
    hold on;
    plot(xp(10,:), 'b');
    grid on;
    title('    Xg');
    hold off;

    subplot(3,4,3);
    hold on;
    plot(xp(2,:), 'b');
    grid on;
    title('    Vy');
    hold off;

    subplot(3,4,4);
    hold on;
    plot(xp(11,:), 'b');
    grid on;
    title('    Yg');
    hold off;

    subplot(3,4,5);
    hold on;
    plot(xp(4,:)*57.3, 'b');
    grid on;
    title('    Wx');
    hold off;

    subplot(3,4,6);
    hold on;
    plot(xp(7,:)*57.3, 'b');
    grid on;
    title('    Крен');

```

%матриця виводу 3x3, перший графік

```

hold off;

subplot(3,4,7);
hold on;
plot(xp(5,:)*57.3,'b');
grid on;
title('    Wy');
hold off;

subplot(3,4,8);
hold on;
plot(xp(8,:)*57.3,'b');
grid on;
title('    Дифер');
hold off;

subplot(3,4,9);
hold on;
plot(xp(6,:)*57.3,'b');
grid on;
title('    Wz');
hold off;

subplot(3,4,10);
hold on;
plot(xp(9,:)*57.3,'b');
grid on;
title('    Kypc');
hold off;

subplot(3,4,11);
hold on;
plot(xp(13,:)*57.3,'b');
grid on;
title('    teta');
hold off;

subplot(3,4,12);
hold on;
plot(xp(14,:)*57.3,'b');
grid on;
title('    delta');
hold off;

end

if grtype==2
hold on;
%load xp xp;
%load xp3,xp3;
plot(xp(11,:),xp(10,:),'b');
%plot(xp(16,:),xp(15,:),'r');

```



```

grid on;
title('vessel circulation');
hold off;
end

```

Повна математична модель судна

```

function [ xt ] = ship12( x,teta,delta,wd,sm,cc )
%повна модель судна Сормовський 1гвинт + 1стерно
%Зв'язана система координат
%ОХ-вздовж судна, ОУ-вправо, ОZ-вниз
%x(1)          %vx
%x(2)          %vy
%x(3)          %vz
%x(4)          %wx
%x(5)          %wy
%x(6)          %wz
%x(7)          %крен
%x(8)          %дифферент
%x(9)          %курс
%x(10)         %xg
%x(11)         %yg
%x(12)         %zg
%teta          відхилення телеграфу
%delta         відхилення стерна
%wv(1)         швидкість хвилі
%wv(2)         курс хвилі
%wv(3)         амплітуда хвилі
%
%параметри середовища
global t wv
pi=3.1415926;
g=cc(1);
rowd=cc(2);          %густина повітря при t=25 град С (кг/м3)
rosm=cc(3);          %густина морської води при t=25 град С (кг/м3)
Vxgwd=wd(1)*cos(wd(2)); %швидкість вітру в земній СК
Vygd=wd(1)*sin(wd(2));
Vxwd=Vxgwd*cos(x(9))+Vygd*sin(x(9)); %швидкість вітру в зв'язаній СК
Vywd=-Vxgwd*sin(x(9))+Vygd*cos(x(9));
dVxwd=x(1)+Vxwd; %швидкість відносного вітру в ЗСК
dVywd=x(2)+Vywd; %вектор швидкості вітру задавався із знаком "-"
dVwd=sqrt(dVxwd^2+dVywd^2);
%betawd=acos(dVxwd/(dVwd+0.000001)); %кут набігання вітрового потоку
betawd=atan(-dVywd/(dVxwd+0.000001));
Vxgsm=sm(1)*cos(sm(2)); %швидкість течії у земній СК
Vygs=sm(1)*sin(sm(2));
Vxsm=Vxgsm*cos(x(9))+Vygs*sin(x(9)); %швидкість течії у зв'язаній СК
Vysm=-Vxgsm*sin(x(9))+Vygs*cos(x(9));
dVxsm=x(1)+Vxsm; %швидкість відносно течії в зв'язаній СК
dVysm=x(2)+Vysm;
dVsm=sqrt(dVxsm^2+dVysm^2);
%betasm=acos(dVxsm/(dVsm+0.000001)); %кут дрейфу
betasm=atan(-dVysm/(dVxsm+0.000001));

```

```

Vxgwv=wav(1)*cos(wv(2)); %швидкість хвиль в земній СК
Vygwv=wav(1)*sin(wv(2));
Vxwv=Vxgwv*cos(x(9))+Vygwv*sin(x(9)); %швидкість хвиль в зв'язаній СК
Vywv=-Vxgwv*sin(x(9))+Vygwv*cos(x(9));
dVxwv=x(1)+Vxwv; %відносна швидкість в зв'язаній СК
dVywv=x(2)+Vywv; %Вектор швидкості хвилі задавався із знаком "-"
dVwv=sqrt(dVxwv^2+dVywv^2);
betawv=acos(dVxwv/(dVwv+0.000001));

Vg=sqrt(x(1)^2+x(2)^2); %швидкість відносно ґрунту

%Сормовский
%Характеристики судна
Vmax=cc(4); %м/с
Wmax=cc(5); %вт
Pmax=cc(6); %н
k=cc(7); %коефіцієнт лобового опору
L=cc(8); %довжина, м
B=cc(9); %ширина, м
T=cc(10); %осадка, м
lam=cc(11); %видовження корпусу
sigmad=cc(12); %коефіцієнт повноти форми
Fd=cc(13); %площа діаметрального батоксу
Fa=cc(14); %площа парусності
m=cc(15); %маса, кг
Ix=cc(16); %моменти інерції судна
Iy=cc(17);
Iz=cc(18);

k11=cc(19); %коефіцієнти приєднаних мас води
k22=cc(20);
k33=cc(21);
k44=cc(22);
k55=cc(23);
k66=cc(24);
mu11=cc(25); %маса судна із врахуванням приєднаних мас води
mu22=cc(26);
mu33=cc(27);
mu44=cc(28); %моменти інерції судна із врахуванням приєднаних моментів інерції води
mu55=cc(29);
mu66=cc(30);

nubsm=cc(31); %впливає на крок спіралі
nubwd=cc(32);
nuw=cc(33);
mub=cc(34);
muw=cc(35); %коефіцієнт демпфування
nd=cc(36);

%гідродинамічні сили і моменти
kwd=cc(37); %відношення повного аеро до гідро динамічного опору
cx0sm=2*Pmax/((1+kwd)*rosm*Vmax^2*Fd);

```

```

cxksm=-[cx0sm+0.25*(L/B-2)*abs(betasm)^3];
cyksm=pi*lam*(nubsm*betasm/2+nuw*x(6)/4)+nd*(0.6+0.34*x(8)/lam)*abs(betasm*x(6));
czksm=0;
%mxksm=-B^2/(12*T)*tan(x(7))-0.1*B^2/(12*T)*x(4); %коефіцієнт моменту в каналі крена
%myksm=-L^2/(12*T)*tan(x(8))-0.1*L^2/(12*T)*x(5); %коефіцієнт моменту в каналі
диференту
%mzksm=pi*lam*(mub*betasm/4-muw*x(6)/8)-nd*(1/6+0.13*x(8)/lam)*abs(betasm*x(6));
mxksm=-0.05*B^2/(12*T)*tan(x(7))-0.05*B^2/(12*T)*x(4); %коефіцієнт моменту в каналі
крена
myksm=-L^2/(12*T)*tan(x(8))-0.1*L^2/(12*T)*x(5); %коефіцієнт моменту в каналі
диференту
mzksm=pi*lam*(mub*betasm/4-muw*x(6)/8)-nd*(1/6+0.13*x(8)/lam)*abs(betasm*x(6));

%проекції гідродинамічних сил і моментів на осі ЗСК
Fxksm=0.5*cxksm*rosm*dVsm^2*Fd*sign(dVxsm);
Fyksm=0.5*cyksm*rosm*dVsm^2*Fd;
Fzksm=0.5*czksm*rosm*dVsm^2*Fd;
Mxksm=m*g*mxksm;
Myksm=m*g*myksm;
Mzksm=0.5*mzksm*rosm*dVsm^2*Fd*L;

%сили і моменти від хвилювання
cx0wv=-2*Pmax/((1+kwd)*rosm*Vmax^2*Fd);
cxkwv=cx0wv-0.25*(L/B-2)*sin(abs(2*betawv))^3;
cykwv=pi*lam*(0.05*nubsm*sin(betawv)/2+nuw*x(6)/4)+nd*(0.6+0.34*x(8)/lam)*abs(betawv
*x(6));
czkwv=0;
mxkwv=-0.05*B^2/(12*T)*tan(x(7))-0.05*B^2/(12*T)*x(4); %коефіцієнт моменту в каналі
крена
mykwv=-L^2/(12*T)*tan(x(8))-0.1*L^2/(12*T)*x(5); %коефіцієнт моменту в каналі
диференту
mzkvw=pi*lam*(mub*betawv/4-muw*x(6)/8)-nd*(1/6+0.13*x(8)/lam)*abs(betawv*x(6));
Fkwv(1)=0.5*cxkwv*rosm*dVwv^2*Fd*sign(dVxwv);
Fkwv(2)=0.5*cykwv*rosm*dVwv^2*Fd;
Fkwv(3)=0.5*czkwv*rosm*dVwv^2*Fd;
Mkwv(1)=m*g*mxkwv;
Mkwv(2)=m*g*mykwv;
Mkwv(3)=0.5*mzkvw*rosm*dVwv^2*Fd*L;
%lwv=(0.5-abs(betawv)/pi)*L; %плече гідродинамічної сили
%Mkwv(3)=cykwv*lwv;
tauwv=(2*pi/g)*dVwv; %уявний період хвилі
Fkwv(1)=0*Fkwv(1)+0.1*pi^2*m*wv(3)*sin(2*pi*t/(tauwv+0.01));
Fkwv(2)=0*Fkwv(2)+0.1*pi^2*m*wv(3)*sin(2*pi*t/(tauwv+0.01));
Fkwv(3)=0*Fkwv(3)+0.1*pi^2*m*wv(3)*sin(2*pi*t/(tauwv+0.01));
Mkwv(1)=0*Mkwv(1)+0.4*pi^2*Ix*wv(3)*sin(2*pi*t/(tauwv+0.01));
Mkwv(2)=0*Mkwv(2)+0.4*pi^2*Iy*0.1*wv(3)*sin(2*pi*t/(tauwv+0.01));
Mkwv(3)=0*Mkwv(3)+0.4*pi^2*Iz*0.1*wv(3)*sin(2*pi*t/(tauwv+0.01));
%Mkwv(3)=0.5*mzkvw*rosm*dVwv^2*Fd;

%аеродинамічні сили і моменти
xwd=cc(38); %координати центру вітрильності (від ватерлінії)
ywd=cc(39);

```

```

zwd=cc(40);
cx0wd=kwd*cx0sm*(rosm/rowd)*(Fd/Fa);
cxkwd=-[cx0wd+0.25*(L/B-2)*abs(betawd)^3];
cykwd=0.25*(L/B-2)*betawd^3;
czkwd=0;
mxkwd=-cykwd*zwd;
mykwd=0;
mzkwd=cykwd*xwd;
Fpkwd=0.5*cxkwd*rowd*dVwd^2*Fa*sign(dVxwd);

```

%проекції аеродинамічних сил і моментів на осі ЗСК

```

Fykwd=0.5*cykwd*rowd*dVwd^2*Fa;
Fzkwd=0.5*czkwd*rowd*dVwd^2*Fa;
Mpkwd=0.5*mxkwd*rowd*dVwd^2*Fa*L;
Mykwd=0.5*mykwd*rowd*dVwd^2*Fa*L;
Mzkwd=0.5*mzkwd*rowd*dVwd^2*Fa*L;

```

%характеристики керма

```

hr=cc(41); %висота керма
br=cc(42); %ширина керма
sr=cc(43); %площа керма
lamr=cc(44); %видовження керма

```

%гідродинамічні характеристики керма

```

cxr=-1.46*delta^2; %було в 1000р менше
cyr=300*pi*lamr/(2+lamr)*delta; %коефіцієнт бокової сили керма (впливає на крок спіралі)
cyr=0;
mxr=-cyr*T;
myr=-cxr*T;
mzr=-cyr*(L/2);
Fxr=0.5*cxr*rosm*dVsm^2*sr;
Fyr=0.5*cyr*rosm*dVsm^2*sr;
Fzr=0;
Mxr=0.5*mxr*rosm*dVsm^2*sr*br;
Myr=0.5*myr*rosm*dVsm^2*sr*br;
Mzr=0.5*mzr*rosm*dVsm^2*sr*br;

```

%потужність і витрати палива

```

gle=cc(45); %питомі витрати палива г/(вт*сек)

```

%total forces and moments in LCS

```

P=teta*Pmax/(pi/2);
Fx=P+Fpkwd+Fpkwd+Fkwv(1)+Fxr;
Fy=Fykwd+Fykwd+Fkwv(2)+Fyr;
Fz=Fzkwd+Fzkwd+Fkwv(3)+Fzr;
Mx=Mpkwd+Mpkwd+Mkwv(1)+Mxr;
My=Mykwd+Mykwd+Mkwv(2)+Myr;
Mz=Mzkwd+Mzkwd+Mkwv(3)+Mzr;

```

%differential equations of vessel motion in LCS

```

xt(1)=(Fx+mu22*x(2)*x(6)+mu33*x(3)*x(5))/mu11;
xt(2)=(Fy-mu11*x(1)*x(6)+mu33*x(3)*x(4))/mu22;

```

```

xt(3)=(Fz+mu11*x(1)*x(5)-mu22*x(2)*x(4))/mu33;

xt(4)=(Mx-(mu66-mu55)*x(5)*x(6)-(k33-k22)*x(2)*x(3))/mu44;
xt(5)=(My-(mu44-mu66)*x(4)*x(6)-(k11-k33)*x(1)*x(3))/mu55;
xt(6)=(Mz-(mu55-mu44)*x(4)*x(5)-(k22-k11)*x(2)*x(1))/mu66;

xt(7)=x(4)+tan(x(8))*(x(5)*sin(x(7))+x(6)*cos(x(7)));
xt(8)=x(5)*cos(x(7))-x(6)*sin(x(7));
xt(9)=(x(6)*cos(x(7))+x(5)*sin(x(7)))/cos(x(8));

xt(10)=x(1)*cos(x(9))*cos(x(8))+x(2)*(sin(x(7))*cos(x(9))*sin(x(8))-
cos(x(7))*sin(x(9)))+x(3)*(cos(x(7))*cos(x(9))*sin(x(8))+sin(x(7))*sin(x(9)));
xt(11)=x(1)*sin(x(9))*cos(x(8))+x(2)*(cos(x(7))*cos(x(9))+sin(x(7))*sin(x(9))*sin(x(8)))+x(3)*
(cos(x(7))*sin(x(9))*sin(x(8))-sin(x(7))*cos(x(9)));
xt(12)=-x(1)*sin(x(8))+x(2)*sin(x(7))*cos(x(8))+x(3)*cos(x(7))*cos(x(8));
end

```

Модель системи керування

```

function [ teta,delta,intDpsi,intDy ] = sysctr12( x,intDpsi,intDy,cc)
%модель системи керування
%clear;
%вектор стану
%x(1)      vx
%x(2)      vy
%x(3)      Vz
%x(4)      Wx
%x(5)      Wy
%x(6)      Wz
%x(7)      крен
%x(8)      дифферент
%x(9)      курс
%x(10)     Xg
%x(11)     Yg
%x(12)     Zg
%вектор заданих ( програмних значень )
%xz(1-12)
%
global t wv
pi=3.1415926;
g=cc(1);
Vmax=cc(4);
xz(1)=cc(46);      %задана швидкість
xz(9)=cc(54);      %заданий курс
xz(11)=cc(56);     %задане бокове зміщення

%wvg(1)=wv(1)*cos(wv(2));  %швидкість хвилі у проекціях на осі БСК
%wvg(2)=wv(1)*sin(wv(2));
%wv1(1)=wvg(1)*cos(x(9))*cos(x(8))+wvg(2)*sin(x(9))*cos(x(8));  %швидкість хвилі у
проекціях на осі ЗСК
%wv1(2)=wvg(1)*(cos(x(9))*sin(x(8))*sin(x(7))-
sin(x(9))*cos(x(7)))+wvg(2)*(cos(x(9))*cos(x(7))+sin(x(9))*sin(x(8))*sin(x(7)));

```

```

%wv1(3)=wvg(1)*(sin(x(9))*sin(x(7))+cos(x(9))*sin(x(8))*cos(x(7)))+wvg(2)*(-
cos(x(9))*sin(x(7))+sin(x(9))*sin(x(8))*cos(x(7)));

%dVwv(1)=x(1)-wv1(1); %швидкість судна відносно хвилі
%dVwv(2)=x(2)-wv1(2);
%dVwv(3)=x(3)-wv1(3);
%dVwvmod=sqrt(dVwv(1)^2+dVwv(2)^2+dVwv(3)^2);

vnxg=x(1)*cos(x(9))-x(2)*sin(x(9)); %проекції швидкості судна в земній СК
vnyg=x(1)*sin(x(9))+x(2)*cos(x(9));

k(1)=2.0; %коефіцієнт підсилення по кутовій швидкості 5
k(2)=1.0; %коефіцієнт підсилення по куту 5
k(3)=0.001; %коефіцієнт підсилення по інтегралу від кута рискання 0.05
k(4)=0.0; %коефіцієнт підсилення по боковій швидкості 3
k(5)=0.0; %коефіцієнт підсилення по боковому зміщенню 0.2
k(6)=0.00; %коефіцієнт підсилення по інтегралу бокового зміщення

flag=1;
%if t>50
%flag=2;
%end

if flag==1
Dpsi=x(9)-xz(9);
intDpsi=intDpsi+Dpsi;
Dy=x(11)-xz(11);
intDy=intDy+Dy;
sig1=k(1)*x(6)+k(2)*Dpsi+k(3)*intDpsi;
sig2=k(4)*vnyg+k(5)*Dy+k(6)*intDy;
delta=sig1+sig2;
teta=pi*xz(1)/(2*Vmax);
end

if flag==2 %Оптимальне штормування
A = [];
b = [];
Aeq = [];
beq = [];
Vmin=2*1853/3600; %мінімальна швидкість
lb = [-Vmin,-pi];
ub = [Vmax,pi];
u0(1)=xz(1); %стартові параметри
u0(2)=xz(9);
%options=optimoptions('fmincon','Display','off'); %відключення повідомлень
%clc; %очищення командного рядка
fun = @(u)(u(2)-xz(9))^2; %мінімізація відхилення курсу
u = fmincon(fun,u0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,@nonlcon);
Dpsi=x(9)-u(2);
intDpsi=intDpsi+Dpsi;
Dy=x(11)-xz(11);
intDy=intDy+Dy;

```

```

sig1=k(1)*x(6)+k(2)*Dpsi+k(3)*intDpsi;
sig2=k(4)*vnyg+k(5)*Dy+k(6)*intDy;
delta=sig1+sig2;
teta=pi*u(1)/(2*Vmax);
end

```

```

if teta>pi/2
teta=pi/2;
end
if teta<-pi/2
teta=-pi/2;
end
if delta>35*pi/180
delta=35*pi/180;
end
if delta<-35*pi/180
delta=-35*pi/180;
end

```

```

%yse
end

```

Модель зовнішніх впливів

```

function [ wd,sm ] = meteo( t )
%модель вітру, течії і хвилювання
%wd(1)          м/с, швидкість вітру
%wd(2)          рад, кут вітру в земній СК
%sm(1)          м/с, швидкість течії
%sm(2)          рад, кут течії в земній СК
global wv
pi=3.1415926;
wd(1)=0;        %швидкість вітру
wd(2)=0*pi/180; %напрямок вітру

sm(1)=0;        %швидкість течії або хвилювання
sm(2)=0*pi/180; %напрямок течії або хвилювання. Задавати у зворотньому
напрямку !!!

wv(1)=13,7;     %швидкість хвилі,3 м/с
wv(2)=106*pi/180; %курс хвилі, рад. Задавати у зворотньому напрямку !!!
wv(3)=1*pi/180; %амплітуда кутового відхилення,рад (1град)

if t>0 & t<1
wd(1)=10;
wd(2)=90*pi/180;
end
end

```

Модель сенсорів

```

function [ xm ] = sensor( xn,wd,sm,t )
%вимірювач вектору лінійної швидкості
syst=0.5;      %систематична похибка

```

```

fluct=0.21;          %флуктуаційна похибка вимірювання Зсигма
fluct=(rand-0.5)*fluct;
xm(1)=xn(1)+syst+fluct;
xm(2)=xn(2)+syst+fluct;
xm(3)=xn(3)+syst+fluct;
%вимірювач вектору кутової швидкості
syst=0.001/57.3;
fluct=0.001/57.3;
fluct=(rand-0.5)*fluct;
xm(4)=xn(4)+syst+fluct;
xm(5)=xn(5)+syst+fluct;
xm(6)=xn(6)+syst+fluct;
%вимірювачі кутів
syst=1.0/57.3;
fluct=1.0/57.3;
fluct=(rand-0.5)*fluct;
xm(7)=xn(7)+syst+fluct;
xm(8)=xn(8)+syst+fluct;
xm(9)=xn(9)+syst+fluct;
%вимірювачі положення
syst1=10.0;
fluct1=5.0;
fluct1=(rand-0.5)*fluct1;
syst2=0.5;
fluct2=0.5;
fluct2=(rand-0.5)*fluct2;
xm(10)=xn(10)+syst1+fluct1;
xm(11)=xn(11)+syst1+fluct1;
xm(12)=xn(12)+syst2+fluct2;
%вимірювачі вектору швидкості вітру
syst1=0.2;
fluct1=0.2;
syst2=0.5/57.3;
fluct2=0.5/57.3;
fluct1=(rand-0.5)*fluct1;
fluct2=(rand-0.5)*fluct2;
xm(18)=wd(1,1)+syst1+fluct1; %швидкість вітру
xm(19)=wd(1,2)+syst2+fluct2; %кут вітру
%вимірювач вектору швидкості течії
syst1=0.2;
fluct1=0.2;
syst2=0.5/57.3;
fluct2=0.5/57.3;
fluct1=(rand-0.5)*fluct1;
fluct2=(rand-0.5)*fluct2;
xm(20)=sm(1,1)+syst1+fluct1;
xm(21)=sm(1,2)+syst2+fluct2;
end

```

Метод Рунге - Кути

```

function [ xt ] = runge12( x,teta,delta,wd,sm,cc,dt )
%Метод Рунге Кутты 4 порядка

```



```

xt1=ship12(x,teta,delta,wd,sm,cc);
x1=x+xt1*dt/2;
xt2=ship12(x1,teta,delta,wd,sm,cc);
x2=x+xt2*dt/2;
xt3=ship12(x2,teta,delta,wd,sm,cc);
x3=x+xt3*dt;
xt4=ship12(x3,teta,delta,wd,sm,cc);
xt=(xt1+2*xt2+2*xt3+xt4)/6;
end

```

Стенд імітаційного моделювання

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;
using System.IO.Ports;

namespace WindowsFormsApplication1
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        int summator = 0;
        string dataIN;
        string log;
        double double_penalty_c_m = 0;
        double double_penalty_c_f = 0;
        double double_penalty_s_avg = 0;
        double double_penalty_s_max=0;
        double double_penalty_s_min=0;
        double double_penalty_rot_max = 0;
        string head;
        string speed;
        string rot;
        public Form1()
        {
            InitializeComponent();
        }
        private void Form1_Load(object sender, EventArgs e)
        {
            serialPort1.Encoding = Encoding.ASCII;
            serialPort1.Open();
            dataIN = serialPort1.ReadExisting();
            textBox1.Text = dataIN;
            result_txt.Text = max_grade.Text;
        }
        private void serialPort1_DataReceived(object sender, SerialDataReceivedEventArgs e)

```

```

{
    summator++;
    dataIN = serialPort1.ReadExisting();
    textBox1.Text = dataIN;
    this.Invoke(new EventHandler(ShowData));
}

private void ShowData(object sender, EventArgs e)
{
    int dataINLength = dataIN.Length;

    int indexofsearch = dataIN.IndexOf("$VDVHW");
    if (dataIN.IndexOf("$VDVHW") != -1 && dataINLength > 24)
    {
        textBox1.Text = textBox1.Text + summator + ' ' + DateTime.Now + "\r\n" + dataIN +
"\r\n";
        string cut = dataIN.Substring(indexofsearch);
        head = cut.Substring(cut.IndexOf(',') + 1);
        for (int i = 1; i < 6; i++)
        {
            cut = cut.Substring(cut.IndexOf(',') + 1);
        }
        head = head.Substring(0, 5).Trim(new char[] { ',', 'T' });
        speed = cut.Substring(0, 5).Trim(new char[] { ',', ' ' });
        double speed_double = Convert.ToDouble(speed);
        double head_double = Convert.ToDouble(head);

        int head_int = Convert.ToInt32(head_double);
        if (head_int == 360)
        {
            head_int = 0;
        }

        if (Math.Abs(head_double - Convert.ToDouble(set_course.Text)) >
Convert.ToDouble(max_deviation.Text))
        {
            penalty_c_m_txt.ForeColor = Color.Red;
            penalty_c_m.ForeColor = Color.Red;
            double_penalty_c_m = Convert.ToDouble(penalty_c_m.Text);
        }
        if (head_double != Convert.ToDouble(set_course.Text))
        {
            penalty_c_f_txt.ForeColor = Color.Red;
            penalty_c_f.ForeColor = Color.Red;
            double_penalty_c_f = double_penalty_c_f + (Convert.ToDouble(penalty_c_f.Text)*
Math.Abs(head_double - Convert.ToDouble(set_course.Text)));
        }
        if (Math.Abs(speed_double - Convert.ToDouble(set_avg_speed.Text)) >
Convert.ToDouble(max_deviation_of_speed.Text))
        {
            penalty_s_avg_txt.ForeColor = Color.Red;
            penalty_s_avg.ForeColor = Color.Red;

```

```

        double_penalty_s_avg = Convert.ToDouble(penalty_s_avg.Text);
    }
    if (Math.Abs(speed_double) > Convert.ToDouble(max_speed.Text))
    {
        penalty_s_max_txt.ForeColor = Color.Red;
        penalty_s_max.ForeColor = Color.Red;
        double_penalty_s_max = Convert.ToDouble(penalty_s_max.Text);
    }
    if (Math.Abs(speed_double) < Convert.ToDouble(min_speed.Text))
    {
        penalty_s_min_txt.ForeColor = Color.Red;
        penalty_s_min.ForeColor = Color.Red;
        double_penalty_s_min = Convert.ToDouble(penalty_s_min.Text);
    }
}
indexofsearch = dataIN.IndexOf("HEROT");
if (dataIN.IndexOf("HEROT") != -1 && dataIN.Length > 10)
{
    string cut = dataIN.Substring(indexofsearch);
    rot = cut.Substring(cut.IndexOf(',') + 1);
    rot = rot.Substring(0, 5).Trim(new char[] { ',', 'A' });
    double rot_double = Convert.ToDouble(rot);
    textBox1.Text = textBox1.Text + summator + ' ' + DateTime.Now + "\r\n" + dataIN +
"\r\n";
    if (Math.Abs(rot_double) > Convert.ToDouble(rot_max.Text))
    {
        penalty_rot_max_txt.ForeColor = Color.Red;
        penalty_rot_max.ForeColor = Color.Red;
        double_penalty_rot_max = Convert.ToDouble(penalty_rot_max.Text);
    }
}
double result = Convert.ToInt32(max_grade.Text) + double_penalty_c_m +
double_penalty_c_f + double_penalty_s_avg + double_penalty_s_max +
double_penalty_s_min + double_penalty_rot_max;
result_txt.Text = Convert.ToString(result);

textBox1.Text = textBox1.Text + summator + ' ' + DateTime.Now + "\r\n" + dataIN +
"\r\n";
log = " Heading = " + head + " Speed = " + speed + " RoT = " + rot;
textBox3.Text = textBox3.Text + summator + ' ' + DateTime.Now + "\r\n" + log + "\r\n";
}

private void get_result_Click(object sender, EventArgs e)
{
    get_result.Enabled = false;
    double result = Convert.ToInt32(max_grade.Text) + double_penalty_c_m +
double_penalty_s_avg;
    result_txt.Text = Convert.ToString(result);
}

```

Додаток В.

Акт впровадження результатів дисертаційної роботи



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з НІПР ОНМУ

І.І. професор ОНМУ

О.М. ШУМИЛО

15 листопада 2023 р.

про використання результатів дисертаційної роботи

Матейчука Вадима Миколайовичана тему «Автоматизація процесів керування рухом суден у шторм»
в освітньому процесі Одеського національного морського університету.

Ми, що нижче підписалися, склали цей акт в тому, що результати наукових досліджень дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії здобувача Матейчука Вадима Миколайовича на тему «Автоматизація процесів керування рухом суден у шторм» впроваджені в освітній процес кафедри навігації і керування судном, а саме:

1) методи підвищення безпеки штормового плавання шляхом розрахунку і візуалізації небезпечних областей параметрів штормування, що ведуть до перекидання судна – при викладанні освітніх компонентів: «СК 15» та «СК 01» (для здобувачів наукового ступеню бакалавр).

2) використання стенду імітаційного моделювання на базі навігаційного тренажеру Navi Trainer 5000 для розробки і відпрацювання модулів автоматичного керування рухом суден судна – при викладанні освітніх компонентів: «СК15» (для здобувачів наукового ступеню магістр) та «СК 17» (для здобувачів наукового ступеню бакалавр) для аналізу виконання лабораторних робіт здобувачами освіти.

Начальник навчального
відділу ОНМУ, доцент

Олег РОССОМАХА

В.о. директора Навчально-наукового
Інституту Морського флоту

Олексій ШАМОВ

Завідувач кафедри навігації і
керування судном, доцент

Євгеній КАЛІНІЧЕНКО

Додаток Г.

Список публікацій за темою дисертації

1. Nosov P.S., Ben A.P., **Mateichuk V.N.**, Safonov M.S. Identification of “Human error” negative manifestation in maritime transport // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. Zaporizhzhia National Technical University. Pages 204-213. Web of Science. DOI 10.15588/1607-3274-2018-4-20
2. P. Nosov, A. Ben, S. Zinchenko, I. Popovych, **V. Mateichuk**, H. Nosova. Formal approaches to identify cadet fatigue factors by means of marine navigation simulators // *CEUR Workshop Proceedings*, 2732, P. 823-838, 2020. <http://ceur-ws.org/Vol-2732/20200823.pdf>
3. Serhii Zinchenko, **Vadym Mateichuk**, Pavlo Nosov, Ihor Popovych, Oleksandr Solovey, Pavlo Mamenko, Olga Grosheva. Use of Simulator Equipment for the Development and Testing of Vessel Control Systems / *Electrical, Control and Communication Engineering*. - 2020. - Vol.16. - №2. - P.58-64. DOI: 10.2478/ecce-2020-0009. <https://sciendo.com/pdf/10.2478/ecce-2020-0009>
4. Zinchenko S. M., Mamenko P. P., Grosheva O. O., **Mateichuk V. M.** Automatic control of the vessel’s movement under external conditions // *Науковий вісник ХДМА*, №2(21), 2019. – с.10-15. DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.010-015. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/480/416>
5. S.Zinchenko, O.Tovstokoryi, **V.Mateichuk**, P.Nosov, I.Popovych, I.Gritsuk. Automatic vessel steering in a storm // *Electrical, Control and Communication Engineering*, September, vol. 18, no. 1, pp. 66–74, 2022, <https://doi.org/10.2478/ecce-2022-0009>
6. Mateichuk V. M., Zinchenko S. M., Tovstokoryi O. M. Automatic control of the vessel in a storm, *Науковий вісник ХДМА*, 2023, № 26-27, <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/>

Патенти, які захищають наукову новизну:

7. Патент на корисну модель № 133709 МПК (2006): G06F 8/35 (2018.01), G06Q 99/00. Спосіб використання тренажерного обладнання для розробки та тестування систем керування рухом суден / С.М.Зінченко, **В.М.Матейчук**,

В.Г.Ляшенко, Бень А.П., Товстокорій О.М., Грошева О.О. - Заявка № u 2018 08851, заявлено 20.08.2018, опубліковано 25.04.2019, бюл. № 8/2019

Апробація матеріалів дисертаційного дослідження:

8. **Mateichuk V.M.**, Zinchenko S.M., Tovstokoryi O.M., Kyrychenko K.V., Mamenko P.P. Method of automatic storming by movement of phase point to the safe zone // Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми сталого розвитку морської галузі» (PSDMI-2023), 22 листопада, 2023.

9. **Матейчук В.М.**, Зінченко С.М., Носов П.С., Маменко П.П., Кириченко К.В. Автоматичне штормування із врахуванням наявного демпфування // Матеріали II Міжнародної науково - практичної конференції "Проблеми сталого розвитку морської галузі", Херсон, 7 грудня 2022 року

10. **Матейчук В.М.**, Зінченко С.М., Носов П.С., Маменко П.П., Кириченко К.В. Врахування амплітудно-частотної характеристики хвильового впливу на судно під час шторму // Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології і автоматизація", Одеський національний технологічний університет, 20-21 жовтня 2022, м.Одеса

11. **Матейчук В.М.**, Зінченко С.М., Маменко П.П., Кириченко К.В. Врахування наявного демпфування та спектру зовнішніх впливів у задачі автоматичного штормування // Матеріали XIV Міжнародної науково - практичної конференції "Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті" (MINTT-2022), Херсон, 25-27 травня 2022р.

12. **Vadym Mateichuk**, Serhii Zinchenko, Oleh Tovstokoryi, Pavlo Nosov, Yaroslav Nahrybelnyi, Ihor Popovych and Vitaliy Kobets. Automatic Vessel Control in Stormy Conditions // 2 nd International workshop on computational and Information Technologies for Control and Modeling (CITCM 2021), 5 November, 2021. Rivne, Ukraine.

13. **Mateichuk V.M.**, Zinchenko S.M., Tovstokoryi O.M., Mamenko P.P., Artemenko A.G. TAKING INTO ACCOUNT THE SLAMMING DURING AUTOMATIC SAFE SAILING IN A STORM // Матеріали 1 міжнародної

науково - практичної конференції "Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI-2021), Херсон: ХДМА, 03-04 листопада 2021

14. **Mateichuk V.M.**, Zinchenko S.M., Nosov P.S., Moiseienko V.S., Mamenko P.P. Automatic vessel steering in a storm // Materials of the I International scientific-practical conference "Actual problems of transport, energy, infrastructure safety". - Kherson: KhSMA, 8-11 September, 2021.

15. S. M. Zinchenko, P. S.Nosov, **V. M. Mateichuk**, P. P. Mamenko, O. O. Grosheva. Use of navigation simulator for development and testing ship control systems // Materials of the International scientific and practical conference dedicated to the memory of professors Fomin Yu. Ya. And Semenov V. S., Odessa (Ukraine) – Istambul (Turkey) – Odessa (Ukraine), 24-28 April 2019, pp. 350-355

16. С. М. Зінченко, **В. М. Матейчук**, В. Г. Ляшенко. Використання інформаційних систем моделювання для розробки та тестування систем автоматичного керування рухом судна // Матеріали V МНПК «Безпека життєдіяльності на транспорті а виробництві: освіта, наука, практика», Херсон, 13-15 вересня 2018р., с.27-29