

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

Кваліфікаційна наукова
робота на правах рукопису

ПЛОТНІКОВ ВЛАДИСЛАВ ІГОРОВИЧ

УДК 629.1

**ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ НАВІГАЦІЙНОГО
КОМПЛЕКСУ МОРСЬКИХ СУДЕН МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧНОГО
МОДЕЛЮВАННЯ**

Спеціальність 275 «Транспортні технології»
Галузь знань 27 «Транспорт»

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.І. Плотніков

Наукові керівники: Абрамов Геннадій Серафимович, к.ф.-м.н., доцент
Макарчук Дмитро Володимирович, к.т.н., доцент

Херсон – 2025

АНОТАЦІЯ

Плотніков В.І. Підвищення функціональної стійкості навігаційного комплексу морських суден методами математичного моделювання. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 275 – транспортні технології. Дисертацію виконано у Херсонській державній морській академії, Херсон. Подано на захист у Херсонську державну морську академію, Херсон, 2025.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-технічної задачі, яка полягає у підвищенні функціональної стійкості навігаційного комплексу морських суден методами теорії масового обслуговування, дублювання та байєсівського підходу. Вирішення науково-технічної задачі полягає у розробці відповідних рекомендацій щодо регламенту підвищення функціональної стійкості навігаційного комплексу.

Актуальність дослідження зумовлена тим, що під час плавання завжди існує вірогідність відмови одного або більше приладів навігаційної системи морського судна під дією зовнішніх або внутрішніх чинників, яка зростає при ускладненні умов судноплавства. Виходячи з цього, важливим питанням експлуатації та обслуговування навігаційного комплексу є створення моделей, методів та засобів діагностики для виявлення несправностей та помилкового функціонування, а також прогнозування його стану.

Метою роботи є попередження виникнення аварійних ситуацій морських суден за рахунок підвищення функціональної стійкості навігаційного комплексу в результаті зменшення вірогідності відмов його компонентів.

Завдання, які заплановано вирішити для досягнення мети роботи:

1. Визначити основні вимоги до функціональної стійкості навігаційного комплексу морського судна.

2. Розробити модель процесів і систем навігаційного комплексу морського судна.

3. Провести експериментальне дослідження функціонування навігаційних систем морського судна.

4. Провести дослідження навігаційного комплексу як системи масового обслуговування.

Об'єкт дослідження: процеси функціонування інтегрованого навігаційного комплексу сучасного морського судна. *Предмет дослідження:* функціональна стійкість навігаційного комплексу морського судна.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Вперше розроблено математичну модель надійності навігаційного комплексу як системи масового обслуговування, завдяки якій встановлено співвідношення між складністю умов плавання та можливостями системи, що дозволяє проводити розрахунки ймовірності обслуговування отриманого запиту.

2. На основі розробленої моделі оцінювання надійності суднового навігаційного комплексу при підвищеній навігаційній складності, яка включає апроксимаційні рівняння другого порядку, що пов'язують ймовірність робочого стану навігаційної системи з відповідними інтенсивностями потоків відмов та обслуговування, побудовано чотирьохфакторну лінійну регресію, яка була візуалізована в номограмі і є придатною для вирішення низки практичних задач.

3. Набув подальшого розвитку метод, заснований на байєсівському підході щодо оцінки апостеріорних ймовірностей різних гіпотез щодо надійності елементів технічної системи, який відрізняється від існуючих візуалізацією розрахунків при порівнянні апостеріорних ймовірностей з апіорними, які відображають низку закономірностей, що дозволяє використовувати апостеріорні ймовірності гіпотез для розрахунків ймовірностей майбутніх подій, таких як відмови навігаційного обладнання, на основі наявної інформації про його надійність.

4. Удосконалено підхід щодо визначення стійкості технічних систем, який включає проведення оцінки різних схем дублювання елементів системи і їх математичне моделювання, а також приклад помірно глибокого дублювання найменш надійних елементів системи, що значно (більше ніж удвічі) підвищує надійність системи в цілому, що відрізняється від існуючих урахуванням впливу дисперсії значень імовірності безвідмовної роботи елементів системи на значення відносної помилки.

У вступі описано основну проблему пошуку помилкового функціонування, діагностики обладнання навігаційного комплексу морських суден, визначення надійності і працездатності елементів навігаційних систем та необхідності і ступеня дублювання для найбільш вразливих елементів.

Розділ I. Розглянуті основні вимоги до функціональної стійкості навігаційного комплексу морського судна. Описана структура навігаційного комплексу морського судна. Визначено основні поняття про функціональну стійкість навігаційного комплексу морського судна (надійність, імовірність відмови, напрацювання до відмови, імовірність безвідмовної роботи за даний час, тощо). Визначено основні задачі і принципи побудови навігаційного комплексу морського судна. Описані математичні моделі функціонування навігаційного комплексу морського судна.

Розділ II. Розглянуті моделі процесів і систем навігаційного комплексу морського судна. Надано загальну характеристику і класифікацію моделей функціонування навігаційного комплексу. Проведено аналітичне дослідження моделей масового обслуговування. Виконано імітаційне моделювання навігаційних систем. Визначено основи побудови моделей навігаційних систем за даними експериментів (кореляційно-регресійний аналіз, побудова регресійних моделей, номограм, тощо).

Розділ III. Розглянуті питання експериментального дослідження функціонування навігаційних систем морського судна. Розглянута проблема пошуку помилкового функціонування, діагностики. Визначено частоту відмов елементів обладнання і ступінь їх тривалості – часу, необхідного для

відновлення працездатності. Проведено визначення надійності і працездатності елементів навігаційних систем морського судна. Проведено визначення необхідності і ступеня дублювання для найбільш вразливих елементів навігаційних систем.

Розділ IV. Розглянуті питання дослідження навігаційного комплексу як системи масового обслуговування (СМО). Надано теоретичні основи математичного моделювання навігаційного комплексу на основі теорії СМО. Проведено визначення числових характеристик для систем навігаційного комплексу судна як систем СМО (інтенсивності потоків заявок, обслуговування, тощо). Проведено визначення відповідних характеристик ефективності СМО (абсолютна і відносна пропускна здатність, імовірність відмови, довжина черги, час обслуговування, тощо). Виконано порівняння теоретичних розрахунків з експериментальними даними і коригування, модернізація моделей. Виконана розробка відповідних рекомендацій щодо підвищення функціональної стійкості навігаційного комплексу.

Ключові слова: безпека судноводіння, навігаційні системи, системи масового обслуговування, надійність системи, технічний фактор, потік запитів, збій і відновлення системи, математичне моделювання, транспорт, експлуатація.

ANNOTATION

Plotnikov V.I. Increasing the functional stability of the navigation complex of sea vessels using mathematical modeling methods. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 275 – transport technologies. The dissertation was completed at the Kherson State Maritime Academy, Kherson. Submitted for defense at the Kherson State Maritime Academy, Kherson, 2025.

The dissertation is devoted to solving the scientific and technical problem of increasing the functional stability of the navigation complex of sea vessels using the methods of queuing theory, duplication and the Bayesian approach. The solution to the scientific and technical problem consists in developing relevant recommendations regarding the regulations for increasing the functional stability of the navigation complex.

The relevance of the study is due to the fact that during navigation there is always a probability of failure of one or more devices of the navigation system of a sea vessel under the influence of external or internal factors, which increases with the complexity of navigation conditions. Based on this, an important issue of operation and maintenance of the navigation complex is the creation of models, methods and diagnostic tools for detecting malfunctions and erroneous functioning, as well as predicting its condition.

The purpose of the work is to prevent the occurrence of emergency situations in sea vessels by increasing the functional stability of the navigation complex as a result of reducing the probability of failures of its components.

The tasks that are planned to be solved to achieve the goal of the work:

1. Determine the basic requirements for the functional stability of the navigation complex of a sea vessel.
2. Develop a model of processes and systems of the navigation complex of a sea vessel.

3. Conduct an experimental study of the functioning of navigation systems of a sea vessel.

4. Conduct a study of the navigation complex as a mass service system.

Object of research: processes of functioning of the integrated navigation complex of a modern sea vessel. Subject of research: functional stability of the navigation system of a sea vessel.

Scientific novelty of the results obtained

1. For the first time, a mathematical model of the reliability of the navigation complex as a mass service system was developed, thanks to which a relationship was established between the complexity of navigation conditions and the capabilities of the system, which allows calculations of the probability of servicing the received request.

2. Based on the developed model for assessing the reliability of the ship's navigation complex with increased navigation complexity, which includes second-order approximation equations that relate the probability of the operating state of the navigation system to the corresponding intensities of failure and service flows, a four-factor linear regression was constructed, which was visualized in a nomogram and is suitable for solving a number of practical problems.

3. A method based on the Bayesian approach to estimating the posterior probabilities of various hypotheses regarding the reliability of elements of a technical system has been further developed, which differs from existing visualization calculations when comparing posterior probabilities with prior ones, which reflect a number of patterns, which allows using posterior probabilities of hypotheses to calculate the probabilities of future events, such as failures of navigation equipment, based on available information about its reliability.

4. An approach to determining the stability of technical systems was improved, which includes an assessment of various schemes for duplicating system elements and their mathematical modeling, as well as an example of moderately deep duplication of the least reliable system elements, which significantly (more than twice) increases the reliability of the system as a whole, which differs from

existing ones by taking into account the influence of the dispersion of the values of the probability of failure-free operation of system elements on the value of the relative error.

The introduction describes the main problem of finding erroneous functioning, diagnostics of the equipment of the navigation complex of sea vessels, determining the reliability and operability of navigation system elements and the need and degree of duplication for the most vulnerable elements.

Section I. The main requirements for the functional stability of the navigation complex of a marine vessel are considered. The structure of the navigation complex of a marine vessel is described. The main concepts of the functional stability of the navigation complex of a marine vessel are defined (reliability, probability of failure, operating time to failure, probability of failure-free operation for the current time, etc.). The main tasks and principles of building the navigation complex of a marine vessel are defined. Mathematical models of the functioning of the navigation complex of a marine vessel are described.

Section II. Models of processes and systems of the navigation complex of a marine vessel are considered. A general characteristic and classification of models of the functioning of the navigation complex are provided. An analytical study of mass service models is carried out. Simulation modeling of navigation systems is performed. The foundations of building models of navigation systems based on experimental data are determined (correlation-regression analysis, construction of regression models, nomograms, etc.).

Section III. Issues of experimental research of the functioning of navigation systems of a marine vessel are considered. The problem of finding erroneous functioning diagnostics is considered. Construction of histograms of functional stability of navigation system elements (determination of the frequency of failures of equipment elements and the degree of their duration - the time required to restore operability). The reliability and operability of navigation system elements of a sea vessel is determined. The necessity and degree of duplication for the most vulnerable navigation system elements are determined.

Section IV. Issues of studying the navigation complex as a mass service system (MSS) are considered. Theoretical foundations of mathematical modeling of the navigation complex based on the MSS theory are provided. Numerical characteristics for the ship's navigation complex systems as MSS systems are determined (intensity of application flows, service, etc.). The corresponding characteristics of MSS efficiency are determined (absolute and relative throughput, probability of failure, queue length, service time, etc.). Comparison of theoretical calculations with experimental data and corrections, modernization of models were carried out. Relevant recommendations were developed regarding increasing the functional stability of the navigation complex.

Keywords: navigation safety, navigation systems, mass service systems, system reliability, technical factor, request flow, system failure and recovery, mathematical modeling, transport, operation.

ОПУБЛІКОВАНІ ПРАЦІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Публікації у фахових виданнях категорії «Б»:

1. Plotnikov V.I., Dudchenko S.V., Abramov G.S., Makarchuk D.V. Mathematical modeling and analysis of the reliability of the navigation complex. *Науковий вісник ХДМА*, 2023, № 1-2 (26-27), с. 82-95. DOI: 10.33815/2313-4763.2023.1-2.26-27.082-095. (Внесок автора: конкретизація математичних моделей навігаційного комплексу)
2. Abramov G.S., Plotnikov V. I. Analysis of the reliability of the navigation complex and recommendations for increase of reliability. *Науковий вісник ХДМА*, 2024, № 1 (28), с. 68-78. DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.068-078. (Внесок автора: аналіз параметрів надійності навігаційного комплексу)
3. Abramov G.S., Plotnikov V.I. Application of Bayesian approach for determining the reliability of the navigation complex. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*, 2024, №2 (49), с. 127-137. DOI: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321374. (Внесок автора: обчислення апіорних та апостеріорних вірогідностей)
4. Абрамов Г.С., Плотніков В.І. Моделювання процесів підвищення надійності навігаційного комплексу за допомогою дублювання його елементів. *Науковий вісник ХДМА*, 2024, №2 (29), с. 164-177. DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.164-177. (Внесок автора: побудова математичних моделей)
5. Abramov G.S., Plotnikov V.I. Mathematical modeling of the processes of increasing the reliability of the navigation complex through redundancy. *Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*, 2024, № 3 (41), с. 147-158. DOI: 10.33298/2226-8553.2024.3.41.17. (Внесок автора: статистична обробка результатів обчислення)

Тези доповідей:

1. Плотніков В.І., Макарчук Д.В. Базові аспекти стійкості навігаційного комплексу сучасного морського судна. Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI–2021): Матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції, м. Херсон, 3-5 листопада 2021 р., с. 133-136. (Внесок автора: опис основних параметрів надійності навігаційного комплексу)

2. Plotnikov V.I., Abramov G.S., Makarchuk D.V. Analysis of the stability of marine navigation complex systems from the point of view of the QS. Modern information and innovation technologies in transport (MINTT–2023): Materials of the 15th international scientific and practical conference, Kherson, May 24-25, 2023, pp. 244-249. (Внесок автора: обробка результатів обчислення)

3. Abramov G.S., Plotnikov V.I., Zinoviev V.I. Analysis of the reliability of the navigation complex and its influence on the functioning of the maritime logistics system. “Transport, port, logistics, security: modern-day challenges and development prospects”: Materials of the 1st International Scientific and Practical Conference, Kherson, September 28, 2023, pp. 16-29. (Внесок автора: аналіз надійності функціонування навігаційного комплексу)

4. Plotnikov V.I. Implementation of e-navigation concept. Modern information and innovation technologies in transport (MINTT–2024): Materials of the 16th international scientific and practical conference, Odesa, May 29-31, 2024, pp. 149-152. (Внесок автора: аналіз сучасних технологій запровадження е-навігації)

5. Plotnikov V.I. Use of bayesian data analysis to monitor the condition of navigation devices. Problems of sustainable development of the maritime industry (PSDMI–2024): Materials of the 4th International Scientific and Practical Conference, Odesa, November 28-29, 2024, pp. 39-41. (Внесок автора: опис застосування байєсівського аналізу даних)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ НАВІГАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ МОРСЬКОГО СУДНА.....	21
1.1. Структура навігаційного комплексу морського судна.....	26
1.2. Функціональна стійкість навігаційного комплексу морського судна (надійність, імовірність відмови, напрацювання до відмови, імовірність безвідмовної роботи за даний час, тощо).....	38
1.3. Основні задачі і принципи побудови навігаційного комплексу морського судна.....	44
1.4. Математичні моделі функціонування навігаційного комплексу морського судна.....	51
Висновки до I розділу.....	55
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ І СИСТЕМ НАВІГАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ МОРСЬКОГО СУДНА.....	57
2.1. Імітаційне моделювання навігаційних систем.....	57
2.2. Побудова моделей навігаційних систем за даними експериментів (кореляційно-регресійний аналіз, побудова регресійних моделей, номограм, тощо).....	78
Висновки до II розділу.....	84
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ МОРСЬКОГО СУДНА.....	86
3.1. Визначення параметрів вибіркового контролю для виявлення стану елементів навігаційних систем (регламент вибіркового контролю).....	86
3.2. Визначення необхідності і ступеня дублювання для найбільш вразливих елементів навігаційних систем.....	102

	13
Висновки до III розділу.....	117
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ НАВІГАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ ЯК СИСТЕМИ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ (СМО).....	120
4.1. Математичне моделювання навігаційного комплексу на основі теорії СМО.....	120
4.2. Визначення числових характеристик для систем навігаційного комплексу судна як систем СМО (інтенсивності потоків заявок, обслуговування, тощо).....	121
4.3. Визначення відповідних характеристик ефективності СМО (абсолютна і відносна пропускна здатність, імовірність відмови, довжина черги, час обслуговування, тощо).....	125
Висновки до IV розділу.....	130
ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ.....	131
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	134
ДОДАТКИ.....	150

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

AIS – Система автоматичної ідентифікації;
ANS – Автономна навігаційна система;
BNWAS – Система тривоги навігаційної вахти на містку;
CTMC – Ланцюг Маркова з безперервним часом;
DGPS – Диференціальна система глобального позиціонування;
DTMC – Ланцюг Маркова з дискретним часом;
ECDIS – Система відображення електронних карт та інформації;
FD – Виявлення несправностей;
FMECA – Аналіз ефектів і критичності режиму відмови;
GMDSS – Глобальна морська система попередження лиха та безпеки;
GPS – Система глобального позиціонування;
IMO – Міжнародна морська організація;
INS – Інтегрована навігаційна система;
SIP – Стратегічний план впровадження електронної навігації;
SOLAS – Міжнародна конвенція з охорони життя на морі;
MTBF – Середній час напрацювання на відмову;
MTTR – Середній час напрацювання до ремонту;
M/M/1 – Односерверна модель масового обслуговування;
M/M/c – Багатосерверна модель масового обслуговування;
RPN – Номер пріоритету ризику;
VDR – Реєстратор рейсових даних;
Q – Відносна пропускна здатність;
 Q_T – Середня відносна пропускна здатність;
ЕК – Електронна карта;
ІМР – Інтерфейсний модуль радіолокаційної станції;
НК – Навігаційний комплекс;
НІС – Навігаційно-інформаційна система;
РЛС – Радіолокаційна станція;

СМО – Система масового обслуговування;

γ – Інтенсивність потоку відновлення;

λ – Інтенсивність потоку запитів;

μ – Інтенсивність потоку обслуговування;

ν – Інтенсивність потоку відмов;

ν' – Інтенсивність потоку відмов у стані очікування.

ВСТУП

Для забезпечення безпеки мореплавання сучасні морські судна оснащені цілим рядом навігаційних приладів, інтегрованих у багатокomпонентну систему, що має назву навігаційний комплекс. Під час плавання завжди існує вірогідність відмови одного або більше приладів системи під дією зовнішніх або внутрішніх чинників. Існуючі на сьогоднішній день алгоритми діагностування недостатньо задовольняють потреби виявлення несправностей та помилкового функціонування.

Актуальність роботи. У 2014 році Міжнародна морська організація (ІМО) прийняла Стратегічний план впровадження електронної навігації (SIP). Цей план спрямований на оцінку впливу засобів електронної навігації на зменшення навігаційних аварій, таких як зіткнення суден і посадка на міліну, як це визначено Міжнародною конвенцією з охорони життя на морі (SOLAS). Очікуваним результатом є суттєве зменшення таких нещасних випадків, що прогнозується приблизно на 65 відсотків. Відповідальність за безпеку судноплавства та ефективний рух суден лежить на державах-членах ІМО як на міжнародному, так і на національному рівнях. Щоб запровадити нові концепції та інноваційні системи в рух суден, важливо ретельно оцінити їхній потенційний вплив на судна, що відповідають вимогам SOLAS і на ті, що не відповідають вимогам SOLAS, забезпечивши комплексний аналіз. Щоб досягти цього, необхідно вивчати та використовувати методологію ІМО для вимірювання впливу електронної навігації на безпеку судноплавства. У цьому дискурсі розглядаються питання, що охоплюють ідентифікацію та усунення несправностей в інформаційно-вимірювальних системах.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Автор дисертації брав безпосередню участь у виконанні теми як виконавець, у НДР «Моделі та методи прогнозування довговічності обладнання засобів річкового та морського транспорту в умовах експлуатації за технічним станом» № ДР (РК) 0120U104335.

Мета і завдання дослідження. *Мета роботи* – попередження виникнення аварійних ситуацій морських суден за рахунок підвищення функціональної стійкості навігаційного комплексу в результаті зменшення вірогідності відмов його компонентів.

Завдання, які заплановано вирішити для досягнення мети роботи:

1. Визначити основні вимоги до функціональної стійкості навігаційного комплексу морського судна.
2. Розробити модель процесів і систем навігаційного комплексу морського судна.
3. Провести експериментальне дослідження функціонування навігаційних систем морського судна.
4. Провести дослідження навігаційного комплексу як системи масового обслуговування.

Об'єкт дослідження: процеси функціонування інтегрованого навігаційного комплексу сучасного морського судна.

Предмет дослідження: функціональна стійкість навігаційного комплексу морського судна.

Методи дослідження. Теоретичні і експериментальні дослідження ґрунтуються на процесах експлуатації навігаційного обладнання, які протікають при різних умовах складності судноплавства. Дослідження, які пов'язані з вирішенням завдань оцінки надійності навігаційного комплексу, виконували з використанням математичного моделювання, теорії ймовірностей і математичного аналізу.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше розроблено математичну модель надійності навігаційного комплексу як системи масового обслуговування, завдяки якій встановлено співвідношення між складністю умов плавання та можливостями системи, що дозволяє проводити розрахунки ймовірності обслуговування отриманого запиту.

2. На основі розробленої моделі оцінювання надійності суднового навігаційного комплексу при підвищеній навігаційній складності, яка включає апроксимаційні рівняння другого порядку, що пов'язують ймовірність робочого стану навігаційної системи з відповідними інтенсивностями потоків відмов та обслуговування, побудовано чотирьохфакторну лінійну регресію, яка була візуалізована в номограмі і є придатною для вирішення низки практичних задач.

3. Набув подальшого розвитку метод, заснований на байєсівському підході щодо оцінки апостеріорних ймовірностей різних гіпотез щодо надійності елементів технічної системи, який відрізняється від існуючих візуалізацією розрахунків при порівнянні апостеріорних ймовірностей з апріорними, які відображають низку закономірностей, що дозволяє використовувати апостеріорні ймовірності гіпотез для розрахунків ймовірностей майбутніх подій, таких як відмови навігаційного обладнання, на основі наявної інформації про його надійність.

4. Удосконалено підхід щодо визначення стійкості технічних систем, який включає проведення оцінки різних схем дублювання елементів системи і їх математичне моделювання, а також приклад помірно глибокого дублювання найменш надійних елементів системи, що значно (більше ніж удвічі) підвищує надійність системи в цілому, що відрізняється від існуючих урахуванням впливу дисперсії значень імовірності безвідмовної роботи елементів системи на значення відносної помилки.

Практичне значення отриманих результатів. На основі проведених експериментальних досліджень визначені необхідність і ступінь дублювання для найбільш вразливих елементів навігаційних систем, що забезпечує підвищення функціональної стійкості навігаційного комплексу.

Дослідну перевірку та впровадження методів математичного моделювання функціональної стійкості навігаційного комплексу морських суден проведено за спільної участі з товариством з обмеженою відповідальністю «Херсонський морський спеціалізований тренажерний

центр». Впровадження зазначених методів підвищило ефективність оцінки функціональної стійкості навігаційного комплексу, оптимізувавши процедури прийняття рішень в умовах навігаційної діяльності, аварійних ситуацій на 10% та вдосконалило систему підготовки фахівців морської галузі, а саме продукт «Tropical storm and heavy weather navigation» (DS-101-35-KMSTC), додаток А. Додатково матеріали дисертації впроваджено в навчальному процесі Херсонської державної морської академії для здобувачів освітнього ступеня «Магістр», факультету «Судноводіння» при викладанні освітньої компоненти «Математична статистика та теоретичні засади судноводіння», кафедра «Судноводіння», додаток Б.

Особистий внесок здобувача. Здобувач самостійно виконував експериментальні дослідження, обчислювальні експерименти при розробці моделей, накопичення і аналіз апріорної вхідної інформації, виконав розрахунки статистичних діагностичних характеристик з урахуванням вимог до проведення експерименту. Особисто виконував обробку і узагальнення результатів експериментальних досліджень. Спільно із науковими керівниками к.ф.-м.н., доц. Абрамовим Г.С. та к.т.н., доц. Макаrchуком Д.В. розроблено математичні моделі функціонування навігаційного комплексу морського судна.

Апробація результатів дисертації. Обговорення результатів роботи здійснено на наступних наукових конференціях: I Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми сталого розвитку морської галузі» (м. Херсон, 2021 р.), XV Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» (м. Херсон, 2023 р.), I Міжнародній науково-практичній конференції «Транспорт, порт, логістика, безпека: виклики сучасності та перспективи розвитку» (м. Херсон, 2023 р.), XVI Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» (м. Одеса, 2024 р.), IV Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми сталого розвитку морської галузі» (м. Одеса, 2024 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи висвітлені в 10 наукових працях: 5 статей у фахових виданнях, 5 матеріалів конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота містить: вступ, чотири розділи, основні висновки, використану літературу, додатки. Робота викладена на 123 сторінках машинописного тексту, містить 29 рисунків, 6 таблиць, 111 літературних джерел, 3 додатки. Загальний обсяг дисертації складає 153 сторінки.

РОЗДІЛ 1

ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ НАВІГАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ МОРСЬКОГО СУДНА

У період з 2011 по 2018 рік на флотах держав-членів Європейського Союзу або в морських адміністративних водах ЄС сталося 23073 морських аварій та інцидентів, йдеться у звітах Європейського агентства з морської безпеки. У зв'язку з цією великою кількістю інцидентів 699 осіб загинули, 7694 особи отримали поранення, 230 суден були повністю знищені, і відбулося понад 566 випадків забруднення океану. Отже, останнім часом морські аварії та інциденти спричинили великі економічні та екологічні наслідки. Стверджувалося, що морські катастрофи можуть мати тривалий вплив на екосистему та навколишнє середовище регіону. Ось чому органи влади та міжнародні об'єднання починають ретельно аналізувати основні причини морських аварій та інцидентів, а потім оцінювати їх, щоб керувати наслідками та шукати шляхи їх мінімізації. Дослідницький проект [1] поєднує описовий огляд відповідних статей із бібліотечними дослідженнями щорічних звітів Європейської інформаційної платформи морських аварій для аналізу даних і ефективних факторів морських аварій. Потім пропонується політика та стратегія для зменшення аварій та інцидентів, пов'язаних із цими факторами.

Завдяки кращому технічному обслуговуванню, стандартам проектування, навчанню та моніторингу морський сектор може зменшити вплив аварій і підвищити рівень безпеки на морі. Розширені протоколи технічного обслуговування, покращені стандарти проектування, навчання екіпажу новим технологіям і постійний моніторинг систем є важливими для уникнення аварій, спричинених технічними проблемами.

Були знайдені численні методи аналізу надійності електронних навігаційних систем, з основним акцентом на оцінку характеристик надійності як системи в цілому, так і її окремих підсистем. У деяких

дослідженнях щодо надійності навігаційних систем згадується визначення надійності як сприйнятливість навігаційного пристрою або конкретної системи чи компонента (якщо він є) до помилок протягом визначеного періоду часу та конкретних умов. Це вказує на ймовірність виконання конкретного завдання без будь-яких інцидентів. Середній час напрацювання на відмову (MTBF) є відмінним параметром, який використовується для визначення надійності. Це типовий проміжок часу між послідовними збоями системи або компонентів системи. Разом із надійністю, Міжнародна асоціація маячних служб (IALA) [2] також описує доступність, яка описується як імовірність того, що допомога або допоміжна система виконує свою призначену функцію за певних умов у випадково вибраний момент. Параметр середнього часу до ремонту (MTTR) використовується для оцінки доступності.

З точки зору дослідження надійності систем DGPS, Шпехт [3] описав структуру надійності системи та її компонентів з огляду на їхні функції та взаємозв'язки. Згодом компонентам і системам було надано два стани залежно від їхньої роботи: 0 – несправність, 1 – нормальне функціонування. Крім того, надійність навігаційної системи оцінюється протягом встановленого періоду, відомого як ймовірність виживання системи, беручи до уваги задану структуру надійності. Надійність навігаційної системи та її гранична надійність протягом певного періоду часу були розраховані на основі експоненціального розподілу тривалості служби та простоїв.

Аналіз доступності системи AIS, розроблений Яскільським [4], використовується для ланцюгів Маркова. Три різні стани системи (функціонування, проміжний та збій) були ідентифіковані на основі коефіцієнта доступності передачі даних AIS, що контролюється. Після цього була створена матриця ймовірностей переходів між різними станами доступності AIS. Матриця була сформована з використанням інтенсивності переходів станів, ідентифікованих шляхом аналізу сигналів базової станції AIS, які були записані. Зрештою, ймовірність перебування системи в

кожному робочому стані була встановлена шляхом розгляду початкового та сукупного розподілів переходів між конкретними станами.

Оцінка надійності електронної системи передачі щодо електромагнітних перешкод, як описано Пас і Росінський [5], включає три рівні: повна функціональність, пріоритет безпеки та неналежний захист. Це було досягнуто шляхом диференціації між станами. Для опису аналізованої системи було використано систему рівнянь Чепмена-Колмогорова шляхом визначення переходів між певними безпечними станами. Потім були реалізовані початкові умови та використано перетворення Лапласа для обчислення ймовірності перебування системи в певному стані. Крім того, ймовірність того, що система залишиться в робочому стані, визначалася шляхом відстеження швидкості перемикання між окремими станами та ймовірності перебування в одному стані. Програми, які оцінюють надійність систем транспортування електронів, спираються на переконання, що час переходу між окремими станами безпеки відповідає експоненціальному розподілу.

Стандарти продуктивності навігаційного комплексу морського судна мають вирішальне значення для забезпечення безпечної та ефективної навігації. Ці стандарти зазвичай встановлюються міжнародними організаціями, такими як ІМО, і часто включають національні правила [6]. Ось деякі з основних вимог:

1. Точність.

Позиціонування: навігаційний комплекс повинен надавати точні позиційні дані (широта, довгота та висота), щоб судно залишалося на наміченому курсі.

Швидкість і напрямок: системи повинні точно вимірювати та відображати швидкість і напрямок судна, включаючи можливість виявлення та компенсації дрейфу.

2. Надійність [7].

Резервування: критично важливі навігаційні системи повинні мати резервні компоненти або резервні системи для забезпечення безперервної роботи в разі збою.

Цілісність системи: навігаційні системи повинні подавати сповіщення або тривоги, якщо будь-яка частина системи виходить з ладу або надає недостовірні дані.

3. Час відгуку.

Дані в реальному часі: навігаційні дані повинні оброблятися та відображатися в режимі реального або майже реального часу, щоб забезпечити своєчасне прийняття рішень екіпажем.

Частота оновлення: система повинна оновлюватися через достатні проміжки часу, щоб підтримувати точну та актуальну навігаційну інформацію.

4. Сумісність з навколишнім середовищем [8].

Стійкість до погодних умов: навігаційне обладнання повинно надійно працювати в різних умовах навколишнього середовища, включаючи екстремальні погодні умови, коливання температури та високу вологість.

Відповідність ЕМІ/ЕМС: системи мають бути захищені від електромагнітних перешкод (ЕМІ) і відповідати стандартам електромагнітної сумісності (ЕМС).

5. Інтеграція з іншими системами [9].

Зв'язок: навігаційний комплекс повинен бути здатний до безперебійної інтеграції з іншими бортовими системами, такими як системи зв'язку, керування двигуном і системи автоматизації.

Стандартизовані інтерфейси: використання стандартизованих форматів даних та інтерфейсів для взаємодії з іншими морськими системами, такими як AIS (система автоматичної ідентифікації) та ECDIS (система відображення електронних карт та інформації).

6. Інтерфейс користувача та зручність використання [10].

Простота використання: система повинна мати інтуїтивно зрозумілий інтерфейс користувача, який дозволяє судноводіям легко розуміти та взаємодіяти з навігаційними даними.

Навчання та документація: необхідно надати адекватні навчальні матеріали та документацію, щоб переконатися, що екіпаж може ефективно керувати системою.

7. Відповідність міжнародним стандартам.

Стандарти ІМО: відповідність стандартам ІМО продуктивності для суднового радіо- та навігаційного обладнання, наприклад, у Конвенції SOLAS.

Правила класифікаційного товариства: дотримання конкретних вимог відповідних класифікаційних товариств (наприклад, ABS, Lloyd's Register, DNV).

8. Вимоги до живлення [11].

Джерело живлення: навігаційна система повинна мати можливість працювати від джерела живлення судна та мати варіанти резервного живлення.

Енергоефективність: система повинна бути розроблена таким чином, щоб споживати енергію ефективно без шкоди для продуктивності.

9. Реєстрація та запис даних.

Запис даних рейсу: навігаційний комплекс повинен включати системи для реєстрації та запису навігаційних даних для майбутнього аналізу, відповідності та розслідування аварій.

10. Безпека та резервування [12].

Відмовостійкі механізми: система повинна включати відмовостійкі механізми для підтримки або швидкого відновлення навігаційних можливостей у разі збоїв системи.

Аспекти інтерфейсу людина-машина (НМІ): проект системи повинен враховувати людський фактор, мінімізуючи ризик помилки судноводія та забезпечуючи безпечну роботу за будь-яких умов.

Ці стандарти призначені для забезпечення надійності, точності та безпеки навігаційної системи судна, що відповідає потребам сучасних морських операцій.

1.1. Структура навігаційного комплексу морського судна

Навігаційний комплекс морського судна – це складна система, призначена для забезпечення безпечної та ефективної експлуатації судна. Він об'єднує різні компоненти та технології, кожна з яких відіграє вирішальну роль у навігації, зв'язку та контролі [13]. Ось огляд його структури:

1. Місток.

Розташування: місток є центром керування судном, зазвичай розташований на самій верхній палубі, звідки відкривається чіткий огляд навколишнього середовища.

Функція: на містку централізовано навігаційні та контрольні системи судна. У ньому розташовані основні елементи керування для рульового керування, керування двигуном, зв'язку та навігації.

2. Навігаційні прилади [14].

Радар: виявляє об'єкти та інші судна навколо судна, необхідний для уникнення зіткнень, особливо в умовах поганої видимості.

GPS (система глобального позиціонування): надає точні дані про місцезнаходження, допомагаючи визначити курс судна.

Гірокомпас: визначає курс судна відносно істинної півночі, незалежно від зовнішніх впливів, таких як магнітне поле.

Магнітний компас: резервне дублювання гірокомпаса, він вказує напрямки на основі магнітного поля Землі.

Автопілот: система, яка підтримує корабель на заданому курсі без ручного керування.

Ехолот: вимірює глибину води під судном, що має вирішальне значення для уникнення підводних небезпек.

Лаг: вимірює швидкість судна відносно води (відносний лаг) або відносно ґрунту (абсолютний лаг).

3. Системи зв'язку.

УКХ-радіо: використовується для зв'язку на короткій відстані з іншими суднами, портами та береговими станціями.

Радіо ПЧ/КХ: використовується для зв'язку на далекій відстані, особливо важливо під час перебування поза діапазоном УКХ.

Супутникові системи зв'язку: надають можливості глобального зв'язку, включаючи Інтернет і служби передачі даних.

AIS (система автоматичної ідентифікації): передає положення, швидкість і курс судна іншим суднам і прибережним органам.

4. Система відображення електронних карт та інформації (ECDIS) [15].

Функція: розширений навігаційний інструмент, який відображає електронні морські карти, об'єднуючи дані з різних датчиків (наприклад, GPS і радар), щоб забезпечити повне уявлення про оточення судна та запланований маршрут.

Переваги: ECDIS покращує ситуаційну обізнаність, дозволяє автоматично планувати маршрут і зменшує залежність від традиційних паперових карт.

5. Інтегрована навігаційна система (INS).

Функція: ця система об'єднує дані з різних навігаційних приладів (таких як радар, GPS, гірокомпас тощо) в єдиний інтерфейс. Це дозволяє централізовано контролювати навігацію судна.

Компоненти: часто включає дані радара, ECDIS, AIS, автопілота та інших датчиків.

6. Рульовий механізм і елементи керування двигуном.

Рульовий механізм: механізми, які керують кермом, що дозволяє судну повертати.

Елементи керування двигуном: системи, які керують рушійною силою судна, включаючи запуск/зупинку двигуна та керування заднім ходом.

7. Системи безпеки та моніторингу.

Система тривоги навігаційної вахти на містку (BNWAS): гарантує, що вахтовий офіцер знаходиться наготові та попереджає інших, якщо офіцер стає недієздатним.

Системи виявлення вогню та диму: відстежують наявність вогню чи диму на містку.

Система відеоспостереження (CCTV): використовується для моніторингу критичних зон судна з містку.

8. Системи резервного копіювання та резервування.

Ручне керування: резервна копія автопілота, що дозволяє вручну керувати напрямком судна.

Паперові карти: хоча ECDIS використовується все частіше, судна часто мають паперові карти як резервну копію.

Вторинні системи зв'язку: у разі відмови первинних систем зв'язку, доступні вторинні системи (наприклад, факели, аварійні маяки).

9. Датчики навколишнього середовища.

Анемометр: вимірює швидкість і напрямок вітру.

Барометр: вимірює атмосферний тиск, використовується для прогнозування змін погоди.

Датчики температури: контролює температуру моря та повітря.

10. Системи запису даних [16].

Реєстратор рейсових даних (VDR): подібно до "чорної скриньки" в літаку, він записує навігаційні дані, голосовий зв'язок на містку та іншу важливу інформацію. Це важливо для розслідування нещасних випадків.

11. Додаткові системи.

GMDSS (Глобальна морська система попередження лиха та безпеки): гарантує, що судно може надсилати сигнали лиха та підтримувати зв'язок з рятувальними службами в надзвичайних ситуаціях.

Навігаційні вогні та сигнали: гарантує, що судно видно іншим і може повідомляти про свій статус за допомогою світлових і звукових сигналів.

Навігаційний комплекс морського судна є високоінтегрованою системою, яка поєднує передові технології з традиційними методами для забезпечення безпечної та ефективної навігації. Для роботи з цими системами та інтерпретації даних потрібен кваліфікований екіпаж, що робить це одним із найважливіших аспектів морських операцій.

Навігаційний комплекс (НК) визначається як сукупність суднових вимірювальних приладів і обчислювальної техніки, яка дозволяє визначати положення і швидкість судна відносно Землі. Жоден із наявних на даний момент навігаційних вимірювачів не може цілком вирішити ці задачі, оскільки кожному окремо не вистачає необхідної точності, перешкодостійкості чи надійності.

Завдання, які вирішує НК, різноманітні. Одним із ключових аспектів є вимірювання пройденої відстані, що гарантує постійну оцінку координат об'єкта. Основним недоліком розрахункових систем є зниження точності визначення координат із збільшенням часу роботи. Отже, для досягнення необхідної точності обчислені координати необхідно послідовно або періодично коригувати за даними, отриманими з радіотехнічних вимірювачів, тобто проводити ретельну обробку даних.

У навігаційних системах із вищим рівнем інтеграції обладнання використовується зворотний зв'язок. Завдяки цим зв'язкам гарантується найвищий рівень надійності. Враховуючи, що системи всередині навігаційного комплексу встановлюють навігаційні параметри у своїй конкретній системі координат, алгоритми навігаційного обчислювального пристрою мають процедуру перетворення даних із цих систем у основну систему координат, де обчислюється пройдений шлях.

Крім того, НК містить автоматизовану систему керування судном і налаштування для індикації та відображення навігаційних даних. НК призначений для навігації та управління судном на всіх етапах рейсу. Завдання, які виконує НК, окрім послідовного визначення місця

розташування судна, розрахунку та коригування його шляху, полягають у програмуванні маршруту плавання, подачі інформації від систем індикації, автоматичному контролі за станом приладів і систем НК.

На рисунку нижче показано структурну схему типової інтегрованої навігаційної системи, призначеної для автоматизації навігації та запобігання зіткненням. Визначення шляху в даному комплексі здійснюється за інформацією від лага та гірокомпаса. Глобальна навігаційна супутникова система (GNSS), така як "GPS", служить системою корекції координат розташування, причому штурман виконує ручні корекції.

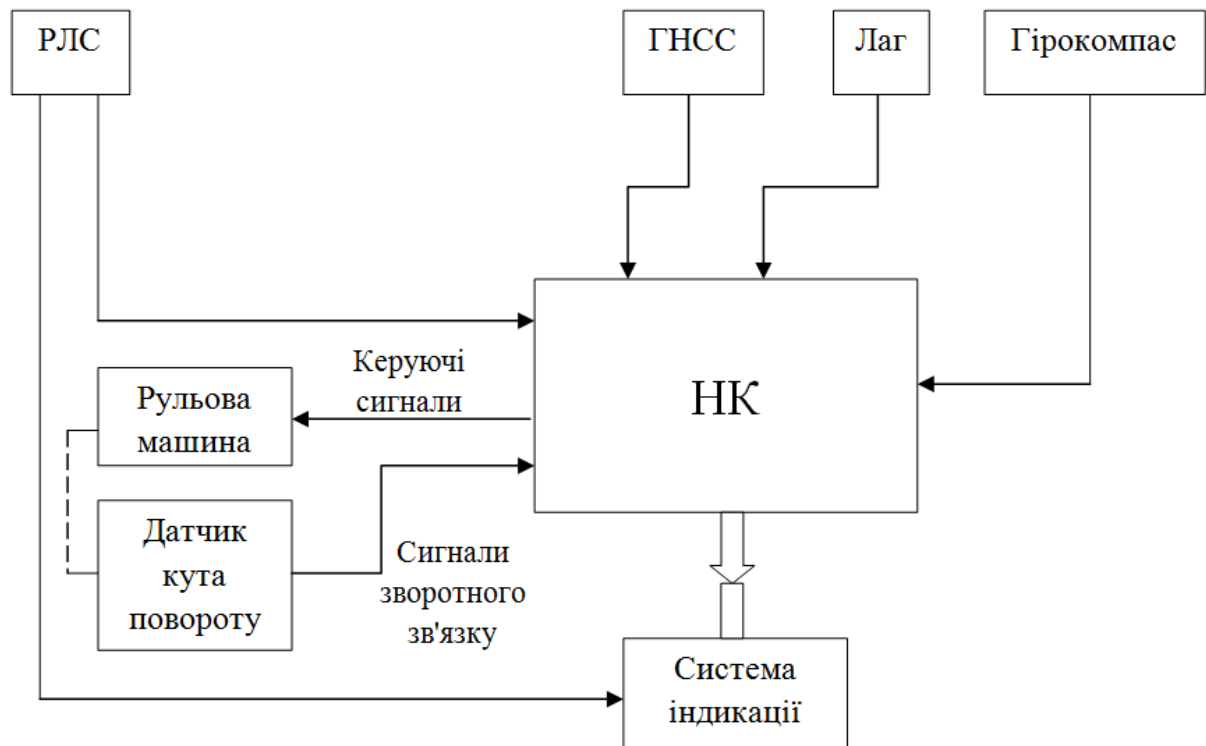


Рисунок 1.1 – Структурна схема інтегрованої навігаційної системи сучасного морського судна

Навігаційна система судна використовує відповідні алгоритми для перетворення координат і ефективної обробки даних від усіх навігаційних датчиків, а також виробляє важливі сигнали для систем автоматичного керування рухом судна та системи, яка вказує та відображає умови в

навігаційній зоні. Радіолокаційне зображення, отримане на РЛС судна, аналогічно вводиться в систему індикації [17].

Навігаційна система судна — це багатокomпонентний електронний комплекс водного транспорту, призначений для визначення оптимального маршруту руху. За точність обчислень і виконання навігаційних розрахунків відповідає навігаційна система судна, яка включає:

- Суднові технічні засоби навігації;
- Суднове устаткування для завдань управління маневрами судна.

Виділяють наступні підсистеми:

- Суднові навігаційні системи;
- Гіроскопічні суднові навігаційні прилади;
- Суднові навігаційні прилади для визначення координат судна;
- Суднові лаги;
- Магнітні суднові компаси;
- Суднові навігаційні інструменти.

Суднова навігаційна інформаційна система (НІС) — це пристрій, який збирає, зберігає та обробляє дані, необхідні для спрямування судна від порту відправлення до порту призначення, а потім представляє оброблену інформацію на електронній карті таким чином, щоб сприяти безпечній та ефективній навігації.

Термін НІС включає різні комбінації засобів, які створюють бортові інформаційні системи, призначені для навігації.

НІС виготовляються в різних конфігураціях, що дозволяє адаптувати ці системи до різних типів суден і конкретних завдань, які вони вирішують. Існують НІС для великих вантажних суден, круїзних лайнерів, спеціалізованих суден (рибальських, гідрографічних тощо), орендних човнів, яхт та інших.

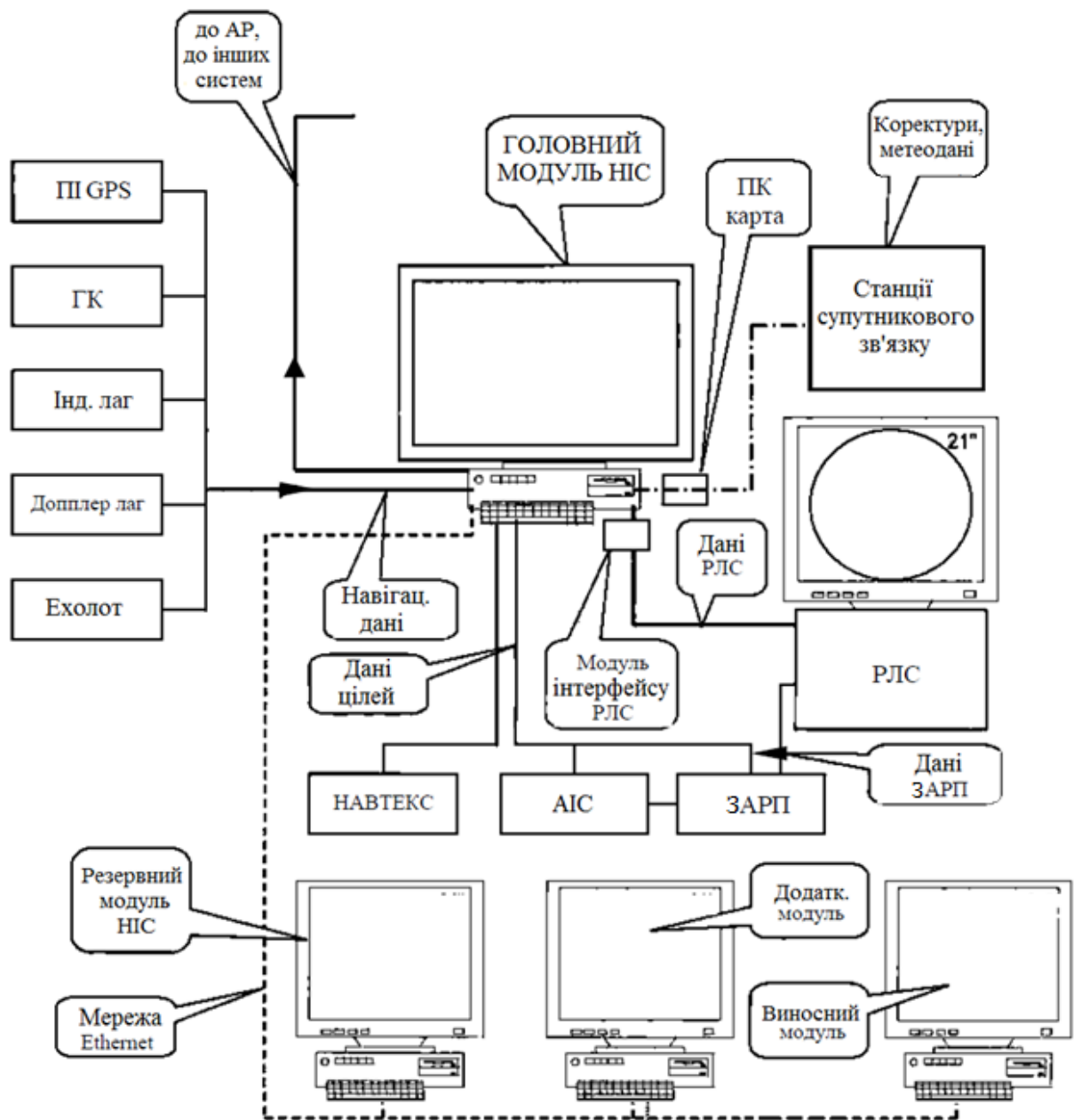


Рисунок 1.2 – Блок-схема НІС з периферійними пристроями

Основними частинами всіх НІС є:

- апаратні засоби;
- інформаційне забезпечення (дані);
- програмне забезпечення;
- засоби взаємодії НІС із оператором.

Апаратне забезпечення НІС складається з головного модуля, резервного блоку та периферійного обладнання (рис. 1.2). Базова

конфігурація НІС включає лише головний модуль та основні датчики інформації.

Головний модуль – це в загальному випадку встановлений у спеціальній консолі високопродуктивний персональний комп'ютер, що має канали для з'єднання з навігаційними приладами та пристроями керування судном.

Головний модуль НІС встановлюється у рульовій рубці. Він включає системний блок, монітор, керуючу панель.

До складу системного блоку входять: процесор, співпроцесор, оперативна пам'ять, накопичувач на жорсткому диску, додаткові блоки пам'яті, пристрої для введення даних з гнучких магнітних та оптичних дисків, порти введення/виведення тощо.

Процесор управляє зніманням інформації з датчиків, контролює інформаційні потоки між частинами системи, виконує обробку інформації, готує та видає дані на відображення та пристрої управління.

Накопичувачі та додаткові блоки пам'яті служать для зберігання інформації, яка потрібна для виконання функцій НІС.

Дисплей головного модуля служить для відображення навігаційної карти, місця судна на ній, кінематичних параметрів свого судна, його запланованого шляху та подання інших даних.

Дисплей зазвичай має два режими відображення процесу судноводіння: в істинному та відносному русі.

В істинному режимі зображення карти нерухоме, а умовний знак судна рухається по екрану відповідно до шляхового кута та шляхової швидкості судна. При підході символу судна до краю екрана зображення карти зсувається, щоб судно залишалось на екрані.

У відносному режимі центр символу судна на дисплеї нерухомий і перебуває у середині екрана, а карта «пливе» йому назустріч. При необхідності умовний знак судна може бути зміщений з центру для збільшення на екрані дистанції огляду по носу судна. Для реалізації режиму

відносного руху комп'ютер повинен бути досить потужним, здатним швидко перерахувати та відобразити нові позиції всіх об'єктів карти за малий (1 сек. і менше) інтервал часу, вибраний для подання руху.

Дисплей може показувати обстановку з різною орієнтацією карти, найчастіше «за нордом» та «за курсом». Ряд НІС дозволяють орієнтувати карту в будь-якому заданому напрямку.

На панелі, що управляє, розташований маніпулятор (зазвичай трекбол), доповнений кількома клавішами. Може використовуватись і клавіатура.

Резервний блок НІС у повному або обмеженому обсязі виконує функції головного модуля системи при виході останнього з ладу. Резервна система забезпечує можливість отримання всієї необхідної інформації від навігаційних датчиків, результатів попередньої прокладки, даних коректур.

Периферійна апаратура. Навігаційно-інформаційна система використовує дані, що надходять з різних джерел, та передає свої відомості іншим системам та пристроям. На рис. 1.2 наведено одну з можливих конфігурацій НІС з периферійними приладами.

Датчики навігаційної інформації НІС отримує курс від гірокомпасу, швидкість – від лага, глибину – від ехолота, обсервовані координати – від приймаче-індикаторів супутникових та берегових радіонавігаційних систем (РНС).

Крім зазначених на малюнку датчиків, до НІС можуть підключатися: показчик швидкості повороту, електронний магнітний компас, датчик параметрів вітру та ряд інших приладів.

Однією з обов'язкових ознак НІС є автоматичне введення координат місця від приймача супутникової навігаційної системи GPS, що забезпечує можливість моніторингу точної позиції судна на електронних картах у всіх районах Світового океану. Ця можливість - одна з основних переваг НІС.

На зображення ЕК може накладатися інформація від РЛС, цілі від засобів автоматичної радіолокаційної прокладки (ЗАРП) та бортової апаратури AIS, а також метеорологічні дані та карти, що отримуються по

каналах супутникового зв'язку. Через супутникові канали в пам'ять НІС можуть надходити коректури та інша інформація, включаючи нові ЕК. На дисплеї НІС з'являються і попередження, що передаються лінією НАВТЕКС.

Інтерфейсний модуль РЛС (ІМР) призначений для поєднання РЛС із комп'ютерами НІС. Це апаратно-програмний блок, що забезпечує НІС можливість роботи з РЛС у необхідних діапазонах: 3-сантиметровому: X-band (9300÷9500 МГц), 10-сантиметровому: S-band (2900÷3100 МГц).

ІМР перетворює ехосигнали РЛС у цифрову форму, передає їх у ПК та дозволяє накласти радіолокаційне зображення на електронну карту. Крім того, цей пристрій дає можливість передавати радіолокаційне зображення через мережу Ethernet (або через волоконно-оптичний канал) на будь-які інші комп'ютери.

З іншого боку, ІМР надає персональному комп'ютеру функції управління РЛС. Інтерфейсний модуль дозволяють з'єднати з комп'ютером будь-яку РЛС, що відповідає вимогам ІМО, та забезпечити управління їй з будь-якого комп'ютера системи, головного, резервного або допоміжного, де б він не знаходився на судні.

Ряд сучасних РЛС (RadarPC) самі виконують функції ІМР та повністю сумісні з НІС.

Додатковий модуль відображення НІС є забезпеченим органами управління монітором, який встановлюється на містку. Він призначений для можливості паралельного з основним модулем відображення даних в одному або в різних режимах (орієнтації, масштабування, змісту даних). Цей блок також корисний у ситуаціях, коли до керування судном залучено кілька осіб. На містку, якщо необхідно, може встановлюватись кілька додаткових моніторів НІС.

Виносний модуль. Ряд НІС дозволяє по каналу Ethernet передавати зображення з головного ПК на дисплеї комп'ютерів, що знаходяться в інших приміщеннях (у штурманській рубці, каюті капітана і т.д.). Ці комп'ютери

стають виносними блоками НІС. Маючи такий виносний модуль у своїй каюті, капітан може будь-коли проконтролювати процес судноводіння.

Виведення інформації з НІС може проводитися на авторульовий, принтер та інші пристрої та системи.

Інформаційне забезпечення (дані) включає компоненти карт, що зберігаються в пам'яті НІС, коректури до них, інформацію, отриману з різних навігаційних засобів, дані, отримані по каналах зв'язку із зовнішніх джерел, а також додаткову інформацію, необхідну для виконання завдань навігації судна від порту відправлення до порту призначення. Дані НІС зберігаються в пам'яті у вигляді інформаційних масивів (баз даних та інших структурованих наборів).

Інформаційні бази розміщуються у зовнішній пам'яті комп'ютера. Для зберігання переважно використовуються жорсткі магнітні та компактні оптичні диски, причому останні є найбільш підходящими для навігаційних систем. Вони містять більший обсяг даних, нечутливі до магнітних полів, витримують значні фізичні навантаження.

Бази даних НІС поділяються на статичні та динамічні.

Інформація статичних основ перебуває у пам'яті НІС довгий час у постійному вигляді. Коригування до неї виходять порівняно рідко і зберігаються окремо від статичних баз.

Динамічні бази містять інформацію, що досить швидко втрачає свою цінність. При оновленні динамічних баз повністю замінюється їх зміст.

Нижче наведено ряд статичних баз, дані яких використовуються в НІС:

- Картографічна база;
- База відомостей про навігаційні засоби;
- База рекомендованих маршрутів;
- Кліматична база;
- База даних до розрахунку приливних явищ;
- База відомостей про порти;
- База даних про судно.

Основною зі статичних баз є картографічна база, яка може містити дані електронних карт у растровому або векторному форматі. Ряд систем має кілька таких баз, що зберігають різні колекції ЕК.

У динамічних базах НІС зберігаються відомості про:

- льодові покриття;
- змінні течії;
- океанографічні явища;
- погоду.

Програмне забезпечення навігаційної інформаційної системи складається з усіх програм і програмних пакетів, що зберігаються в її пам'яті. Проаналізувавши вплив програмного та апаратного забезпечення на вартість сучасної НІС, можна зробити висновок, що НІС є переважно програмним забезпеченням.

Воно складається з:

- операційної системи;
- програмних засобів, що забезпечують знімання даних з навігаційних приладів та видачу інформації іншим технічним пристроям;
- прикладного програмного забезпечення (бібліотеки прикладних програм для вирішення навігаційних та інших задач, що стосуються навігації).

Операційна система є комплексом програм, які організують роботу комп'ютера та управління його ресурсами.

Програми для прийому та видачі даних (драйвери) забезпечують знімання інформації з навігаційних приладів та передачу даних на засоби відображення, керування та іншим фізичним пристроям.

Прикладне програмне забезпечення складається з окремих програм та програмних пакетів, призначених для виконання функцій, заради яких створено НІС. Прикладне програмне забезпечення, залежно від активації кнопок, ключів та інших елементів інтерфейсу користувача, дозволяє вирішувати різні навігаційні завдання, керувати зображенням електронної

карти, сигналізувати про виникнення ситуацій, що вимагають уваги та/або дій вахтового помічника, отримувати різні довідки і т.д.

Засоби взаємодії НІС з оператором включають інтерфейс користувача, методи та форми відображення інформації, звукову сигналізацію, візуальні та голосові попередження.

Інтерфейс користувача НІС є середовищем організації взаємодії оператора з системою. Він дозволяє судноводію змінювати системні параметри, вводити дані, вибрати види сервісу та функції, які має виконати система.

Методи та форми відображення інформації забезпечують концентроване, наочне, точне подання необхідних вахтовому помічнику даних, сприяють глибокому розумінню ним ситуацій, що складаються при судноводінні, та допомагають приймати правильні рішення щодо управління судном.

Звукова сигналізація, візуальні та голосові попередження привертають увагу судноводія до ситуацій, які потребують швидкої оцінки та прийняття дій [18].

1.2. Функціональна стійкість навігаційного комплексу морського судна (надійність, імовірність відмови, напрацювання до відмови, імовірність безвідмовної роботи за даний час, тощо)

Під функціональною стійкістю навігаційного комплексу морського судна розуміється здатність системи зберігати свою працездатність і функціональність в різних умовах експлуатації. Це передбачає забезпечення того, щоб комплекс залишався надійним, мав низьку ймовірність відмови та продовжував ефективно працювати з часом [19]. Нижче наведено деякі основні поняття, пов'язані з функціональною стійкістю навігаційного комплексу:

1. Надійність.

Визначення: надійність означає ймовірність того, що навігаційний комплекс виконуватиме свої призначені функції без збоїв протягом визначеного періоду за нормальних умов експлуатації.

Ключові фактори: на надійність впливають якість компонентів, міцність конструкції, методи технічного обслуговування та умови експлуатації.

2. Імовірність відмови [20].

Визначення: це ймовірність того, що компонент або весь навігаційний комплекс не зможе виконувати свою призначену функцію протягом визначеного періоду часу.

Виразність: часто виражається як функція часу, яка зазвичай зростає, коли система застаріває або піддається впливу суворих умов.

3. Підготовка до відмови.

Визначення: підготовка до відмови означає період до відмови, протягом якого система може демонструвати ознаки погіршення чи зниження продуктивності.

Моніторинг: регулярний моніторинг і діагностика можуть допомогти виявити ранні ознаки потенційної несправності, дозволяючи проводити профілактичне технічне обслуговування до повної несправності.

4. Імовірність безвідмовної роботи (імовірність виживання).

Визначення: це ймовірність того, що навігаційний комплекс буде працювати без будь-яких збоїв протягом певного періоду, який часто називають «часом доручення».

Важливість: висока ймовірність виживання має вирішальне значення для забезпечення безпеки та ефективності морських операцій, особливо під час критичних етапів, таких як навігація через небезпечні води.

5. Середній час напрацювання на відмову (MTBF).

Визначення: MTBF – це міра середнього часу між послідовними відмовами навігаційного комплексу або його компонентів. Це ключовий показник надійності.

Розрахунок: $MTBF = \text{Загальний час роботи} / \text{Кількість відмов}$.

6. Середній час до ремонту (MTTR).

Визначення: MTTR – середній час, необхідний для ремонту несправного компонента навігаційного комплексу та відновлення його працездатності.

Вплив: нижчий MTTR сприяє вищій загальній доступності системи, оскільки час простою через ремонт мінімізується.

7. Доступність.

Визначення: доступність – це частка часу, протягом якого навігаційний комплекс працює і здатний виконувати необхідні функції.

Розрахунок: $\text{доступність} = MTBF / (MTBF + MTTR)$.

Важливість: висока доступність важлива для забезпечення того, щоб судно могло безпечно плавати та реагувати на динамічні умови без перерв.

8. Надмірність [21].

Визначення: резервування передбачає включення додаткових компонентів або систем для резервування основних, зменшуючи вплив єдиної точки відмови.

Типи: резервування може бути апаратним (наприклад, кілька радарів) або функціональним (наприклад, кілька систем зв'язку).

Перевага: підвищується надійність і доступність навігаційного комплексу.

9. Відмовостійкість.

Визначення: відмовостійкість – здатність навігаційного комплексу продовжувати коректну роботу навіть у разі відмови компонента.

Механізми: це може включати автоматичне перемикання на системи резервного копіювання, протоколи виправлення помилок або діагностику в реальному часі.

10. Деградація та знос.

Деградація: з часом компоненти навігаційного комплексу можуть деградувати через такі чинники, як механічний знос, корозія та вплив

навколишнього середовища. Деградація знижує надійність і збільшує ймовірність відмови.

Період зносу: це остання фаза життєвого циклу компонента, коли ймовірність відмови різко зростає. Регулярне технічне обслуговування та своєчасна заміна деталей є важливими, щоб уникнути поломки на цьому етапі.

11. Профілактичне технічне обслуговування.

Визначення: профілактичне технічне обслуговування передбачає регулярні перевірки, тестування та обслуговування навігаційного комплексу для запобігання поломкам і продовження терміну служби обладнання.

Стратегії: графіки технічного обслуговування часто базуються на рекомендаціях виробника, робочих даних і умовах навколишнього середовища.

12. Діагностика та моніторинг стану.

Визначення: діагностика та моніторинг стану передбачають постійну або періодичну оцінку навігаційного комплексу для виявлення будь-яких ознак несправності або погіршення.

Інструменти: вони можуть включати системи моніторингу на основі датчиків, діагностику програмного забезпечення та звичайні перевірки вручну.

Перевага: раннє виявлення проблем може призвести до своєчасного втручання, зменшуючи ймовірність раптових збоїв.

13. Оцінка та управління ризиками [22].

Визначення: оцінка ризику включає визначення потенційних режимів відмов у навігаційному комплексі та оцінку ймовірності та наслідків цих відмов.

Управління: розробляються стратегії пом'якшення цих ризиків, такі як удосконалення практик технічного обслуговування, посилення резервування або оновлення компонентів системи.

Функціональна стійкість навігаційного комплексу на морському судні має вирішальне значення для забезпечення безпеки та ефективності морських операцій. Розуміючи та керуючи концепціями надійності, ймовірності відмови та відповідними показниками, судноводії можуть підтримувати високий рівень продуктивності системи, зменшувати ймовірність збоїв і забезпечувати безперервну роботу в різних умовах.

Стійкість функціонування відноситься до підтримки певних характеристик процесу функціонування в умовах збурень або невизначеностей у різних параметрах системи або її математичному представленні. У цьому сценарії важливо визначити допустиму категорію збурень. В даний час існує безліч визначень терміна «стійкість», які, як правило, відрізняються в залежності від конкретної сфери, в якій вони застосовуються. Концепція стійкості по відношенню до складних технічних систем і механізмів їх управління є особливо складною.

Показник надійності зазвичай інтерпретується як значення або група значень, які якісно або кількісно оцінюють, наскільки добре системи можуть адаптуватися до виконання завдань, якщо використовуються за призначенням. Виходячи з цілей дослідження, враховують якісні, порядкові та кількісні показники надійності.

Якісні показники надійності не виражаються чисельно і не дають обґрунтування переваги одного об'єкта над аналогічним. Вони дозволяють ідентифікувати один об'єкт від іншого, але не дозволяють порівнювати рівні їх продуктивності щодо ключових функцій. Покладання виключно на якісні показники обмежує застосування методів теорії надійності.

Порядкові показники надійності дозволяють обґрунтувати перевагу одного варіанту системи над іншим під час порівнянь, навіть не вимірюючи ступінь цієї переваги. Вони дозволяють організувати досліджувані варіанти системи в порядку зростання надійності, але не дозволяють оцінити ступінь відмінностей у досягнутих рівнях варіантів, що розглядаються.

Кількісні показники надійності включають дані, які оцінюють переваги вибору однієї системи порівняно з іншою, і виражають надійність чисельно. Кількісні показники виводяться шляхом аналізу результатів спостережень за роботами при використанні об'єктів за призначенням або при специфічних випробуваннях. Вони також можуть бути отримані за допомогою обчислень або моделювання операційного процесу об'єктів. Кількісні показники надійності є основними показниками, які охоплюють найважливішу інформацію про те, наскільки добре об'єкт може адаптуватися до свого призначення. Державний стандарт України визначає показник надійності виключно як кількісну ознаку однієї чи кількох властивостей, що становлять надійність.

Показники безвідмовності. Імовірність безвідмовної роботи – це ймовірність того, що протягом заданого періоду роботи не станеться жодної відмови об'єкта. Гамма-відсоткове напрацювання до відмови відноситься до тривалості роботи, протягом якої ймовірність відмови об'єкта не очікується з імовірністю γ , представленою у відсотках. Кожен гамма-відсоток по суті представляє квантілі відповідних розподілів.

Для показників безвідмовності параметр γ задають наступними значеннями: 90; 95; 99; 99,5% і т. д. Отже, ймовірність відмови на інтервалі $[0; t]$ становитиме відповідно 0,10; 0,05; 0,01; 0,005 і т.д. Для мінімізації виникнення критичних відмов об'єктів експлуатації значення γ для цих відмов повинні бути наближені до 100 %. Критичність відмови визначається ознаками, які впливають на результати відмови. Вони можуть представляти значення прямих чи непрямих втрат, пов'язаних із появою відмови, або труднощі відновлення елемента після відмови. Ці характеристики взаємно погоджуються виробником і замовником і викладені в нормативно-технічній документації.

Середнє напрацювання до відмови представляє очікувану тривалість роботи об'єкта до його початкової відмови. Середнє напрацювання на

відмову – це відношення загальної тривалості експлуатації відремонтованого виробу до очікуваного значення його відмов протягом цього періоду експлуатації. Цей показник встановлено для відновлених елементів, при яких допускаються повторні відмови, оскільки вони не призводять до істотних наслідків і не вимагають значних фінансових витрат для відновлення працездатності. Уздовж осі часу випадки відмови створюють потік відмов, тоді як випадки відновлення створюють потік відновлень. Параметр потоку відмов являє собою відношення очікуваної кількості відмов ремонтного об'єкта за короткий період його експлуатації до тривалості цього часу експлуатації [17].

1.3. Основні задачі і принципи побудови навігаційного комплексу морського судна

Навігаційний комплекс морського судна призначений для забезпечення безпечної, ефективної та надійної експлуатації судна під час його плавання в різних морських середовищах. Створення цього комплексу передбачає інтеграцію цілого ряду систем і технологій, які працюють разом для підтримки навігації, контролю та зв'язку судна [23]. Нижче перераховані основні завдання та принципи, якими керується побудова навігаційного комплексу:

Основні завдання навігаційного комплексу.

1. Безпечна навігація.

Мета: переконатися, що судно слідує безпечним та оптимальним маршрутом, уникаючи таких небезпек, як мілководдя, інші судна та перешкоди.

Інструменти: система відображення електронних карт та інформації (ECDIS), радар, система автоматичної ідентифікації (AIS) і система глобального позиціонування (GPS).

2. Планування та оптимізація маршруту.

Мета: спланувати найефективніший маршрут з урахуванням таких факторів, як погода, течії, споживання палива та нормативні обмеження.

Інструменти: ECDIS, програмне забезпечення для планування рейсу, системи прогнозування погоди.

3. Уникнення зіткнення.

Мета: виявлення й уникнення потенційних зіткнень з іншими суднами чи об'єктами.

Інструменти: радар, AIS, автопілот із можливістю уникнення зіткнень, візуальне спостереження.

4. Фіксація позиції.

Мета: постійно точно визначати положення судна, щоб переконатися, що воно залишається на запланованому курсі.

Інструменти: GPS, диференціальний GPS (DGPS), гірокомпас, магнітний компас.

5. Моніторинг навколишнього середовища.

Мета: контролювати та реагувати на умови навколишнього середовища, такі як вітер, хвилі, течії та погода, для підтримки безпечної навігації.

Інструменти: анемометри, барометри, ехолоти, метеорологічні радари, датчики температури.

6. Підтримка зв'язку.

Мета: підтримувати надійний зв'язок з іншими суднами, портами та морськими органами для координації та у надзвичайних цілях.

Інструменти: УКХ/ПЧ/КХ радіостанції, системи супутникового зв'язку, GMDSS (Глобальна морська система повідомлень про лихо та забезпечення безпеки).

7. Управління судновими системами [24].

Мета: інтеграція та контроль суднових систем, таких як рульове управління, рушій та керування живленням, для забезпечення безперебійної роботи.

Інструменти: інтегровані навігаційні системи (INS), автопілот, системи керування двигуном, системи динамічного позиціонування (для певних суден).

8. Запис і реєстрація даних.

Мета: записувати та зберігати навігаційні дані, комунікації та робочі параметри для аналізу, відповідності законодавству та розслідування нещасних випадків.

Інструменти: реєстратор рейсових даних (VDR), журнали ECDIS, журнали двигуна та рульового керування.

9. Сигналізація та моніторинг.

Мета: контролювати стан критично важливих систем і подавати сигнали тривоги у разі несправностей або ненормальних умов.

Інструменти: система сигналізації навігаційної вахти на містку (BNWAS), системи виявлення вогню та диму, моніторинг відеоспостереження.

10. Реагування на надзвичайні ситуації.

Мета: сприяти швидкому та ефективному реагуванню в разі надзвичайних ситуацій, таких як зіткнення, посадка на мілину або пожежі на борту.

Інструменти: GMDSS, аварійна сигналізація, системи розгортання рятувальних шлюпок, сигнали лиха.

Принципи побудови навігаційного комплексу.

1. Інтеграція.

Принцип: навігаційний комплекс має бути повністю інтегрованим, дозволяючи різним системам бездоганно працювати разом. Ця інтеграція покращує обізнаність про ситуацію, прийняття рішень і ефективність роботи.

Приклад: інтеграція ECDIS із радаром та AIS забезпечує комплексне уявлення про оточення судна, покращуючи можливості уникнення зіткнень.

2. Надмірність.

Принцип: критично важливі системи повинні мати резервні компоненти або резервні системи для забезпечення безперервної роботи навіть у разі збою основної системи.

Приклад: подвійні радіолокаційні системи або кілька каналів зв'язку гарантують, що навігація та зв'язок залишатимуться функціональними у разі збою.

3. Модульність.

Принцип: навігаційний комплекс має складатися з модульних компонентів, що дозволяє легко модернізувати, обслуговувати та замінювати окремі частини без порушення роботи всієї системи.

Приклад: модульні блоки ECDIS, які можна легко оновити новим програмним або апаратним забезпеченням.

4. Масштабованість.

Принцип: система повинна бути масштабованою, щоб відповідати потребам різних типів суден, від невеликих прибережних суден до великих океанських суден.

Приклад: масштабовані системи зв'язку, які можуть варіюватися від базових налаштувань VHF до складних супутникових систем залежно від зони експлуатації судна.

5. Людиноорієнтований дизайн.

Принцип: у проекті навігаційного комплексу пріоритетом має бути простота використання з інтуїтивно зрозумілими інтерфейсами та елементами керування, які зменшують ризик людської помилки.

Приклад: ергономічно розроблені макети містку з чіткими, легкими для читання дисплеями та елементами керування, розташованими для легкого доступу.

6. Надійність і міцність.

Принцип: системи мають бути високонадійними та здатними працювати в широкому діапазоні умов, включаючи сувору погоду та бурхливе море.

Приклад: обладнання морського класу, стійке до корозії, ударів і вібрації.

7. Відповідність стандартам [25].

Принцип: навігаційний комплекс повинен відповідати міжнародним морським правилам і стандартам, таким як встановлені ІМО і класифікаційними товариствами.

Приклад: забезпечення відповідності ECDIS стандартам продуктивності, встановленим ІМО.

8. Безпека.

Принцип: безпека має першочергове значення при проектуванні та експлуатації навігаційного комплексу. Системи повинні включати засоби безпеки, сигналізацію та протоколи надзвичайних ситуацій для захисту судна та екіпажу.

Приклад: включення BNWAS для забезпечення пильності вахтового офіцера.

9. Обробка даних у реальному часі.

Принцип: навігаційний комплекс повинен бути здатний обробляти та відображати дані в реальному часі від різних датчиків і систем для підтримки своєчасного прийняття рішень.

Приклад: оновлення погодних умов і стану моря в режимі реального часу відображаються на містку.

10. Інтероперабельність.

Принцип: навігаційний комплекс повинен мати можливість взаємодіяти із зовнішніми системами, такими як берегові центри управління рухом або інші судна, для обміну та отримання інформації.

Приклад: обмін даними AIS з найближчими суднами та прибережними органами влади для покращення обізнаності про ситуацію.

При проектуванні та будівництві навігаційного комплексу морського судна необхідно ретельно враховувати завдання та принципи забезпечення безпечної, ефективної та надійної експлуатації. Дотримуючись цих

принципів, комплекс може забезпечити судно інструментами, необхідними для безпечної навігації в різноманітних і складних умовах.

Проблема виявлення збоїв у функціонуванні, діагностики проблем і впровадження вибіркового контролю в морських навігаційних системах має вирішальне значення для забезпечення безпеки та надійності роботи судна. Ось детальний підхід до вирішення цієї проблеми:

1. Виявлення несправностей [26].

1.1 Моніторинг і збір даних.

Безперервний моніторинг: впровадити системи, які постійно контролюють роботу всіх компонентів навігації, таких як GPS, радар, AIS, ECDIS, гірокомпас тощо.

Реєстрація даних: записувати дані з цих систем для подальшого аналізу, включаючи вихідні дані датчиків, повідомлення про помилки та індикатори справності системи.

Базові показники продуктивності: встановити нормальні робочі параметри для кожної системи, з якими можна порівнювати дані в реальному часі для виявлення аномалій.

1.2 Виявлення аномалій.

Виявлення на основі порогового значення: установити попередньо визначені порогові значення для ключових параметрів (наприклад, потужність сигналу, точність позиціонування). Будь-які відхилення за межі цих порогів викликають сповіщення.

Статистичні методи: використовувати статистичний аналіз для виявлення моделей, які відхиляються від очікуваної поведінки. Це може включати такі методи, як аналіз стандартного відхилення, ковзаючі середні або більш просунуті статистичні моделі.

2. Діагностика [27].

2.1 Усунення несправностей.

Систематичне тестування: якщо виявлено несправність, систематично тестувати кожен компонент навігаційної системи, щоб ізолювати несправну

частину. Це може включати запуск діагностики або заміну компонентів, щоб перевірити, чи несправність залишається.

Аналіз першопричини: використати такі методи, як аналіз режиму та наслідків відмови (FMEA) або аналіз дерева помилок (FTA), щоб відстежити причину несправності. Це може включати визначення того, чи проблема пов'язана з апаратним збоєм, помилками програмного забезпечення, впливом навколишнього середовища чи помилкою користувача.

2.2 Інструменти діагностики.

Вбудоване тестове обладнання (BITE): використати системи BITE, які можуть запускати самодіагностичні тести та повідомляти про стан справності різних компонентів.

Імітаційні моделі: створити імітаційні моделі навігаційних систем, щоб відтворити умови несправності та зрозуміти, як різні фактори впливають на проблему.

Експертні системи: розробити експертні системи, які використовують базу даних відомих проблем і рішень для допомоги в діагностиці нових несправностей на основі шаблонів симптомів.

3. Вибірковий контроль [28].

3.1 Управління резервуванням.

Кілька систем: впровадити резервні системи для критичних навігаційних функцій (наприклад, подвійні пристрої GPS, кілька радарних систем), щоб дозволити судну продовжувати безпечну роботу, навіть якщо одна система виходить з ладу.

Автоматичне перемикавання: розробити алгоритми, які можуть автоматично перемикає керування з несправної системи на резервну без переривання операцій. Це включає забезпечення того, щоб система резервного копіювання була повністю працездатною та відкаліброваною.

Такий підхід забезпечує комплексну стратегію підтримки цілісності та надійності навігаційних систем морського судна, тим самим підвищуючи безпеку та ефективність експлуатації.

1.4. Математичні моделі функціонування навігаційного комплексу морського судна

Математичні моделі необхідні для аналізу, прогнозування та оптимізації роботи навігаційного комплексу на морському судні. Ці моделі можуть представляти різні аспекти функціональності системи, включаючи надійність, точність навігації, динаміку системи та ймовірність відмови [29]. Нижче наведені деякі основні математичні моделі, які використовуються в функціонуванні навігаційного комплексу:

1. Моделі надійності.

1.1. Експоненціальна модель надійності.

Призначення: використовується для моделювання часу між відмовами компонентів навігаційного комплексу, припускаючи постійну частоту відмов.

Модель:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

де:

$R(t)$ – надійність у момент часу t ;

λ – інтенсивність відмов (відмов за одиницю часу);

t – час.

Застосування: підходить для моделювання надійності електронних компонентів навігаційного комплексу.

1.2. Модель розподілу Вейбулла.

Призначення: моделює дані про термін служби компонентів, враховуючи, що частота відмов може змінюватися з часом (збільшуватися, зменшуватися або бути постійною).

Модель:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

де:

$R(t)$ – надійність у момент часу t ;

η – параметр масштабу (характерний ресурс);

β – параметр форми (визначає поведінку інтенсивності відмов).

Застосування: використовується для аналізу компонентів, які можуть мати період зношування або фазу «дитячої смертності».

2. Моделі масового обслуговування [30].

2.1. Ланцюг Маркова з безперервним часом (СТМС).

Призначення: використовується для моделювання переходів між різними станами навігаційного комплексу, такими як робочий, погіршений та несправний стани.

Модель: визначається матрицею швидкості переходу Q , де кожен елемент q_{ij} представляє швидкість переходу від стану i до стану j .

Застосування: підходить для моделювання систем, де час переходу між станами розподілено експоненціально, а переходи не мають пам'яті.

2.2. Ланцюг Маркова з дискретним часом (DTMC).

Мета: моделювання систем із переходами станів на дискретних інтервалах часу.

Модель: визначається матрицею ймовірності переходу P , де кожен елемент p_{ij} є ймовірністю переходу від стану i до стану j за один часовий крок.

Застосування: застосовується до сценаріїв, коли перевірки або оновлення відбуваються через регулярні проміжки часу.

2.3. М/М/1 Черга.

Призначення: моделює системи, де запити (такі як обробка даних або завдання зв'язку) ставляться в чергу та обслуговуються одним сервером (наприклад, блоком обробки або каналом зв'язку).

Модель:

Швидкість надходження λ (запитів в одиницю часу).

Швидкість обслуговування μ (кількість заявок, що обслуговуються в одиницю часу).

Завантаженість системи:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$$

Середня довжина черги:

$$L_q = \frac{\rho^2}{1 - \rho}$$

Середній час очікування:

$$W_q = \frac{\rho}{\mu(1 - \rho)}$$

Застосування: використовується для моделювання продуктивності систем зв'язку в навігаційному комплексі, де завдання стоять у черзі на обробку.

3. Модель фільтра Калмана.

Призначення: рекурсивний алгоритм, який використовується для оцінки стану динамічної системи (наприклад, положення, швидкості) за наявності шуму, часто використовується в навігаційних системах.

Модель:

Прогнозування:

$$\hat{x}_{k|k-1} = F\hat{x}_{k-1|k-1} + Bu_{k-1}$$

$$P_{k|k-1} = FP_{k-1|k-1}F^T + Q$$

Оновлення:

$$K_k = P_{k|k-1}H^T(HP_{k|k-1}H^T + R)^{-1}$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k(z_k - H\hat{x}_{k|k-1})$$

$$P_{k|k} = (I - K_kH)P_{k|k-1}$$

де:

$\hat{x}_{k|k-1}$ – прогнозована оцінка стану;

$P_{k|k-1}$ – прогнозована коваріація;

K_k – коефіцієнт підсилення Калмана;

z_k – вимірювання в момент часу k ;

F – це матриця переходів станів;

H – матриця спостереження.

Q і R є коваріаціями процесу та шуму вимірювання відповідно.

Застосування: зазвичай використовується в системах GPS та інерціальних навігаційних системах для фільтрації шуму та підвищення точності оцінки положення.

4. Байєсовські мережі.

Призначення: імовірнісна графічна модель, що представляє набір змінних та їхніх умовних залежностей за допомогою спрямованого ациклічного графа (DAG).

Модель:

Вузли представляють змінні (наприклад, показання датчиків, стани системи).

Ребра представляють умовні залежності.

Спільний розподіл ймовірностей розкладається як:

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | \text{Parents}(X_i))$$

Застосування: використовується для процесів прийняття рішень, діагностики несправностей та оцінки ризиків у навігаційному комплексі.

5. Моделі системної динаміки.

Призначення: моделює поведінку складних систем у часі, включаючи цикли зворотного зв'язку, часові затримки та накопичення.

Модель:

Диференціальні рівняння: використовуються для опису швидкості зміни станів системи.

Змінні стану: представляють ключові системні параметри (наприклад, положення, швидкість).

Петлі зворотного зв'язку: фіксування взаємодії між різними компонентами системи.

Застосування: підходить для моделювання динамічної поведінки систем навігації та керування судном, включаючи взаємодію між судном, навколишнім середовищем та навігаційним обладнанням.

6. Моделі лінійного програмування [31].

Призначення: моделі оптимізації, які знаходять найкращий результат (наприклад, мінімальну вартість або максимальну ефективність) у системі з лінійними обмеженнями.

Модель:

Цільова функція: представляє мету (наприклад, мінімізація споживання палива).

Обмеження: представляють системні обмеження (наприклад, максимальна швидкість, запас безпеки).

Рішення: використати такі алгоритми, як Simplex метод, щоб знайти оптимальне рішення.

Застосування: застосовується для оптимізації маршруту, розподілу ресурсів і планування в навігаційному комплексі.

Математичні моделі відіграють вирішальну роль у розумінні та оптимізації функціонування навігаційного комплексу на морському судні. Застосовуючи такі моделі, як теорія надійності, процеси Маркова, фільтрація Калмана та методи оптимізації, судноводії можуть покращити продуктивність системи, забезпечити безпеку та підтримувати ефективність роботи за різних умов [32-49].

Висновки до I розділу

1. В даній роботі, щоб формалізувати характеристику ознаки функціональної стійкості НК, сформульовано поняття про функції, які виконує НК, враховуючи стан доступних навігаційних засобів і

використовуваних систем рухомого радіозв'язку. Показано, що завдання забезпечення функціональної стабільності НК полягає в підтримці існуючої якості функцій НК в задані інтервали протягом певного періоду часу. Для виконання цього процесу в НК необхідні спеціальні засоби та методи реконфігурації та реорганізації системних ресурсів, які гарантують бажаний рівень якості функцій НК за несприятливих впливів.

2. Поставлено ряд задач дослідження: визначити основні вимоги до функціональної стійкості навігаційного комплексу морського судна. Розробити модель, процесів і систем навігаційного комплексу морського судна: провести дослідження результатів математичного моделювання; визначити, як початкові параметри системи впливають на ймовірність виконання вхідного запиту. Провести експериментальне дослідження функціонування навігаційних систем морського судна: провести оцінку ефективності різних схем дублювання елементів систем навігаційного комплексу і їх математичне моделювання; застосувати байєсівський підхід в оцінці надійності навігаційного комплексу. Провести дослідження навігаційного комплексу як системи масового обслуговування.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ І СИСТЕМ НАВІГАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ МОРСЬКОГО СУДНА

2.1. Імітаційне моделювання навігаційних систем

Імітаційне моделювання навігаційних систем є важливим інструментом для проектування, тестування та оптимізації продуктивності навігаційних технологій. Створюючи реалістичні віртуальні середовища та сценарії, інженери та дослідники можуть ретельно оцінювати навігаційні системи за різних умов, що призводить до безпечніших, ефективніших і надійніших реалізацій у реальному світі.

Безпека морських перевезень значною мірою залежить від надійності навігаційного обладнання. Щоб досягти цього, моряки, аналітики та дослідники повинні володіти надійними технічними знаннями та досвідом. Звіти відділу розслідування морських аварій (МАІВ) з 1993 по 2012 рік показують, що 6692 морських інцидентів були пов'язані виключно з технічними факторами, тоді як 69% інцидентів включали комбінацію інших факторів. Технічні фактори охоплюють низку аспектів, таких як основні/допоміжні/палубні механізми, процедури містку, маневреність, зіткнення/контакт, електричні системи, запобіжні заходи проти пожежі та вибуху, ризики затоплення, загальне управління та процедури, діяльність на судні, небезпека посадки на мілину, небезпечні випадки, навігаційне та комунікаційне обладнання, міркування щодо експлуатаційного дизайну, проблеми забруднення, заходи стабільності, цілісність конструкції, обладнання безпеки та протоколи реагування на надзвичайні ситуації, серед іншого. Протягом історії людства одним із найбільш широко визнаних підходів було витягти цінну інформацію з минулих небажаних подій, що, у свою чергу, допомагає людям подолати можливі рецидиви.

Метою SIP є оцінка впливу електронної навігації з метою мінімізації навігаційних інцидентів, таких як зіткнення та посадка на міліну, досягнувши значного зменшення на 65% саме для суден SOLAS. Ситуація з безпекою на морі відрізняється від країни до країни. У реальній морській практиці судна SOLAS часто стикаються з суднами, які не відповідає вимогам SOLAS. Практика впровадження електронної навігації може відрізнятися в різних країнах через відмінності в їхніх пріоритетах, рівнях готовності та очікуваних результатах застосування її в їхніх акваторіях. Завдяки створенню ефективного та дієвого національного SIP це допомагає державам-членам максимізувати переваги впровадження електронної навігації для їхніх акваторій.

Національні органи влади несуть відповідальність за розслідування та моніторинг відповідних ситуацій, що стосуються їхніх національних вод і судноплавного флоту. Автори статті [50] представляють новий підхід для ефективної оцінки впровадження програм електронної навігації. Метою методу є кількісна оцінка впливу рішень електронної навігації з точки зору зменшення аварій, яких потенційно можна уникнути за допомогою програм електронної навігації. Цей метод представлено та досліджено в рамках корейського проекту SMART-Navigation, який пропонує послуги електронної навігації як для суден, які не відповідають вимогам SOLAS, так і для суден SOLAS. Цей проект може слугувати зразком для всебічної оцінки впровадження електронної навігації з урахуванням унікальних обставин і умов прибережних держав. У рамках цього проекту впроваджуються спеціалізовані рішення у вигляді засобів e-Navigation toolkit. На презентації оприлюднені результати масштабних досліджень, проведених Всесвітнім морським університетом у співпраці з різними партнерами. Це дослідження має на меті визначити вимоги до навчання та переваги користувачів, необхідні для успішного впровадження передових рішень електронної навігації на практиці.

Інтегрована морська система включає в себе кілька компонентів, які включають інерціальну навігаційну систему, приймач супутникової навігаційної системи (SNS), журнал і комп'ютер, призначений для обробки та моніторингу інформації. Аномальні дрейфи гіроскопа та зміщення акселерометра визначені як первинні помилки інформації, що спостерігаються в датчиках INS.

У науковій літературі широко розглядається проблема виявлення несправностей (FD) в інформаційних збоях і розробки систем, які можуть протистояти цим збоєм. Математична постановка проблеми, пов'язаної з інформаційно-вимірювальними системами (IMS) у контексті FD, спирається на принципи статистичних рішень. Це передбачає проведення перевірок гіпотез, щоб визначити наявність чи відсутність несправностей у системі. Серед методів, які використовуються для вирішення цієї проблеми, можна виділити два класи – знімок і послідовні методи. Перший покладається на окремі вимірювання для прийняття рішень, тоді як другий вимагає серії послідовних вимірювань. У статті [51] досліджено метод вирішення проблеми FD шляхом використання послідовності вимірювань. Щоб вирішити цю проблему, потрібно ввести динамічну модель для помилок IMS як у номінальному стані, так і в несправних станах, а також моделі переходу між станами. Як згадувалося раніше, розв'язання комбінованої проблеми перевірки гіпотези та оцінки невдачі є обов'язковим. Використовуючи апостеріорні ймовірності гіпотез, покращується відмовостійкість системи, на що вказує зважена оцінка параметрів.

Функція автономної навігації підтримується ідентифікованими компонентами системи, які забезпечують безпечне прийняття та виконання рішень. Ці компоненти охоплюють планування маршруту, керування рейсами, уникнення зіткнень та усвідомлення ситуації. Відсутність на борту екіпажу, який би керував навігацією, підвищує ризик серйозних навігаційних аварій, включаючи зіткнення з іншими суднами, надводними та підводними перешкодами та посадку на мілину. Цей ризик в першу чергу викликаний

збоями в програмному забезпеченні, апаратному забезпеченні та джерелі живлення автономної навігаційної системи (ANS). Щоб гарантувати безпеку досліджуваної системи, доцільно включити резервні заходи для основних компонентів ANS, таких як програмне забезпечення, апаратне забезпечення, джерело живлення, система ехолотування, ECDIS і мікрофон.

Резервування важливих для безпеки систем або датчиків дійсно може забезпечити достатній рівень безпеки для таких складних систем, як ANS. Однак цей спосіб не є найвигіднішим варіантом. Щоб підвищити продуктивність і ефективність, доцільно включати оновлені версії життєво важливих компонентів і датчиків, які забезпечують довший середній час напрацювання на відмову (MTBF). Крім того, використання інтелектуального програмного забезпечення, наприклад моніторингу працездатності датчиків, може допомогти вчасно виявити проблеми та спланувати необхідні завдання з технічного обслуговування. Наостанок, рівні безпеки концептуального програмного забезпечення, згаданого в досліджуваній системі, повинні бути визначені шляхом валідації та верифікації.

У сучасну епоху поширеність надлишкового обладнання зустрічається частіше, ніж його дефіцит, і часто це розумно. Несправність навігаційного обладнання може спричинити значні фінансові збитки як для судновласника, так і для вантажовідправника, що небажано, враховуючи високу вартість вантажу та судна. Вартість самого обладнання порівняно невелика порівняно із загальними витратами.

Загальноприйнятим методом оцінки ефективності технічних систем є використання теорії систем масового обслуговування. Ця теорія дозволяє розрахувати ймовірність різних умов у системах масового обслуговування (СМО) і встановити зв'язок між конкретними параметрами СМО та показниками їх ефективності.

З огляду на те, що всі канали в системі є базовими, процеси, які зазнає СМО, можна описати як марковський випадковий процес. Цей процес складається з дискретних станів і відбувається протягом безперервного часу.

У випадку, якщо процес задовольняє умови ергодицичності, досягається остаточний стаціонарний режим. У цьому режимі ймовірності станів та інші параметри процесу не залежать від часу. Дослідники часто зосереджуються на цих усталених і стійких рисах у власних дослідженнях.

Робота суднового офіцера розглядатиметься як одноканальна СМО, яка має тенденцію до збою. Для початку важливо визнати, що офіцер несе відповідальність за керування різними потоками запитів. Перебуваючи на службі, він повинен не тільки звертати увагу на навколишнє оточення, але й фіксувати приблизно 10 параметрів, включаючи курс, швидкість, потужність та інші. Нехтування негативними показниками деяких параметрів може бути наслідком зосередження всієї уваги на одному з них. Якщо виявлення негативних значень якихось параметрів буде несвоєчасним або запізнаним, то у цих обставинах необхідно буде швидко приймати рішення, що може викликати стресові ситуації, які в свою чергу можуть призвести до помилок.

Нерегулярний потік запитів і різний час їх обслуговування призводять до непослідовного завантаження СМО. Бувають випадки, коли необслуговані запити накопичуються на вході, що призводить до перевантаження СМО. І навпаки, бувають ситуації, коли на вході СМО є доступні канали, але немає запитів, що призводить до недостатнього завантаження СМО і стану бездіяльності його каналів. Вхід СМО – це місце, де накопичуються запити. Ці запити мають два можливі результати: вони або приєднуються до черги, або, якщо вони не можуть більше чекати в черзі, залишають СМО без обслуговування.

Отже, існує ймовірність того, що робочий канал (судновий офіцер) зіткнеться з помилками та певною мірою втратить ефективність роботи. Це може бути спровоковано різними факторами, такими як хвороба, втрата свідомості або сильний стрес, що призводить до психічного зависання. Здатність швидко оцінювати обставини та приймати оперативні рішення ненавмисно знижується.

У разі несправності каналу процес відновлення починається одразу після виникнення. Це може проявлятися у приході до тями, прийомі відповідних ліків для лікування хвороби або успішному одужанні після карантину.

Граф схеми «загибелі-розмноження» представляє стани системи та зображений наступним чином:

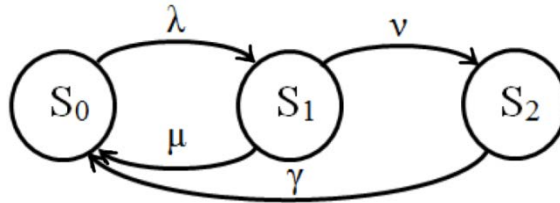


Рисунок 2.1 – Граф схеми стану СМО

де: S_0 – канал вільний;

S_1 – канал зайнятий (працює);

S_2 – канал вийшов з ладу, відновлюється.

Нехай найпростіший потік запитів досягає свого входу з інтенсивністю, позначеною λ . Час обслуговування – експоненціальний з параметром $\mu = \frac{1}{\bar{t}_{\text{обсл}}}$, де $\bar{t}_{\text{обсл}}$ – середній час обслуговування запиту. Це означає, що потік обслуговування є найпростішим, а саме стаціонарний пуассонівський процес, який можна описати параметром інтенсивності, який позначається як μ . Є ймовірність того, що функціональний канал може вийти з ладу – відмовити. Зробимо припущення, що інтенсивність ν є найпростішою формою по відношенню до потоку відмов. Відразу після збою каналу починається процес відновлення каналу. Час відновлення каналу має експоненціальний розподіл, який характеризується параметром, відомим як інтенсивність $\gamma = \frac{1}{t_p}$, де t_p – середній час відновлення (ремонт). Задача була виражена подібним чином у [52], зосереджуючись на судноводії як сервісному каналі. У даному дослідженні складність проблеми виникає з розгляду потенційного

виникнення відмови каналу у стані очікування та його впливу на стан очікування, що позначається інтенсивністю v' . Розумно припустити, що $v' < v$.

Граф схеми, що представляє статус СМО, матиме такий вигляд:

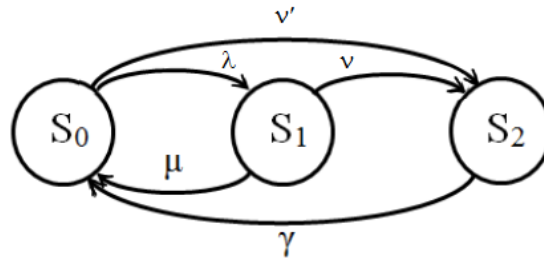


Рисунок 2.2 – Граф схеми стану СМО з можливістю відмови під час простою

де: S_0 – канал вільний;

S_1 – канал зайнятий (працює);

S_2 – канал вийшов з ладу, відновлюється.

Теорія системної надійності має різні підходи до розгляду надійності складного обладнання, такого як навігаційні системи або суднові механізми. Аналіз ефектів і критичності режиму відмови (FMESA) широко використовується в технічному обслуговуванні та аналізі ризиків, щоб забезпечити повне розуміння потенційних відмов, їх причин і можливих заходів з виправлення. Цей підхід окреслює способи, якими події можуть піти не так, визначає причини цих збоїв і пропонує розуміння стратегій виправлення чи пом'якшення. Аналіз критичності (СА) використовується для визначення подій, випадків або компонентів, які вимагають більшої уваги, щоб запобігти більш серйозним або катастрофічним ситуаціям. FMESA пропонує систематичну методологію для всебічного розуміння причин і наслідків несправностей конкретного обладнання чи системи, дотримуючись перспективи «знизу вгору». Вимірювання критичності за допомогою FMESA допомагає виявити найбільш важливу несправність компонента, таким чином підтримуючи дії з технічного обслуговування та планування, відкриваючи чітку інформацію. Суб'єктивні вхідні дані оператора, зібрані за допомогою

FMECA, можна описати двома способами. Одним з аспектів, на якому слід зосередитися, є оцінка налаштувань і пріоритетів оператора, зокрема щодо несправностей і проблем з обслуговуванням. Це включає аналіз таких факторів, як досвід, і визначення причин тривалих простоїв. Крім того, ця технологія слугує меті виявлення важливих несправностей в обслуговуванні та компонентах машин. З точки зору написання, другий аспект передбачає перевірку важливих компонентів, отриманих за допомогою якісного аналізу через динамічний аналіз дерева несправностей (DFTA). Для досягнення цих двох цілей за допомогою аналізу FMECA можна створити та розповсюдити анкету через програмне забезпечення Qualtrics.

Основна мета опитування полягає в тому, щоб визначити компоненти, які становлять найбільшу проблему для виконання робіт з технічного обслуговування на борту, використовуючи номер пріоритету ризику (RPN). RPN використовує три категоріальні змінні, а саме ідентифікацію, серйозність та ймовірність. Ці змінні зазвичай вимірюються на лінійній шкалі, що відображає їхню зростаючу важливість. Шкала, використана для аналізу, представлена в таблиці 2.1, яка показує лінійну шкалу та шкалу Лайкерта, що представляють відповідні значення шкали.

RPN визначається з урахуванням серйозності впливу збою, ймовірності його виникнення та того, наскільки легко його можна виявити для кожного режиму збою. Відповідно до наступної формули RPN виходить множенням цих трьох чисел:

$$RPN = S \times P \times D,$$

де S – тяжкість наслідків відмови;

P – ймовірність відмови;

D – легкість виявлення.

Незважаючи на те, що RPN може не мати значного впливу на визначення плану дій проти режимів відмови, він може допомогти у визначенні порогових значень, які визначають області, які потребують

найбільшої уваги. Інакше кажучи, аналіз і коригувальні дії повинні віддавати пріоритет режимам відмови з високим числом RPN.

Таблиця 2.1 – Визначення критеріїв [53]

<i>Лінійний масштаб (1–10)</i>	<i>Рівень тяжкості</i>	<i>Рівень критичності</i>	<i>Рівень ймовірності</i>	<i>Відсоток відмов</i>
1	Незначний: збій або подія, яка мало або не має значного впливу на можливості та доступність системи.	Незначний: збій компонента або подія, яка не має негайного впливу на платформу чи безпеку персоналу.	Незначний: збій малоїмовірний.	10^{-5} – 10^{-6}
2–3	Низький: збій або подія, яка може призвести до незначного погіршення можливостей системи, але не вплине на її доступність. Система може потребувати незначного ремонту.	Низький: збій або подія, яка може призвести до невеликої затримки/погіршення можливостей системи, але не вплине на її доступність.	Низький: ізолювана несправність, пов'язана з компонентом або обладнанням.	10^{-4} – 10^{-5}
4–6	Граничний (помірний): збій може призвести до погіршення можливостей системи, що може вимагати позапланового ремонту або може спричинити незначну загрозу здоров'ю чи травму користувача.	Граничний (помірний): збій, який може призвести до погіршення можливостей і готовності системи, що може вимагати позапланового ремонту, який може проводити персонал судна.	Помірний: випадковий збій, але не в великих пропорціях.	10^{-3} – 10^{-4}
7–8	Критичний (високий): збій спричиняє втрату можливостей і доступності системи або може спричинити серйозну загрозу здоров'ю чи травму користувача.	Критичний (високий): збій, який призводить до втрати можливостей системи та може вплинути на ефективну роботу інших систем.	Високий: зазвичай пов'язаний з компонентами або системою, які часто виходять з ладу.	10^{-2} – 10^{-3}
9–10	Значний (дуже високий): потенційний збій може призвести до повної втрати системи та/або смерті користувача(ів). Подія збою, яка може призвести до тривалого простою через запасні частини або допомогу OEM.	Значний (дуже високий): потенційний збій може призвести до повної втрати системи, що потребуватиме допомоги FSG або OEM.	Дуже високий: компонент або обладнання з дуже високим рівнем відмов.	10^{-1} – 10^{-2}

Перейдемо до визначення кінцевих ймовірностей станів системи, а також атрибутів її ефективності: A , що позначає абсолютну пропускну здатність, і Q , що представляє відносну пропускну здатність (ймовірність успішної обробки вхідного запиту).

Кінцеві ймовірності станів системи, граф якої зображено на рис. 2.2, визначаються в алгебраїчній системі рівнянь, що отримуються з диференціальних рівнянь Колмогорова шляхом дорівнювання їх лівих частин

(похідні ймовірностей станів за часом) до нуля. Відповідно система лінійних однорідних алгебраїчних рівнянь має наступний вигляд:

$$\begin{cases} (\lambda + \nu')p_0 = \mu p_1 + \gamma p_2 \\ (\mu + \nu)p_1 = \lambda p_0 \\ \gamma p_2 = \nu p_1 + \nu' p_0 \end{cases} \quad (2.1)$$

де: p_0 – ймовірність перебування системи у стані S_0 ;

p_1 – ймовірність перебування системи у стані S_1 ;

p_2 – ймовірність перебування системи у стані S_2 ;

γ – інтенсивність потоку відновлення;

λ – інтенсивність потоку запитів;

μ – інтенсивність потоку обслуговування;

ν – інтенсивність потоку відмов;

ν' – інтенсивність потоку відмов у стані очікування.

Щоб система мала єдине рішення, до неї додається умова нормування на одиницю:

$$p_0 + p_1 + p_2 = 1 \quad (2.2)$$

Завдання полягає в тому, щоб виявити передбачувані фінальні ймовірності:

$$p_0 = \left[1 + \frac{\lambda}{\mu + \nu} + \frac{\lambda\nu + \mu\nu' + \nu\nu'}{\gamma(\mu + \nu)} \right]^{-1} \quad (2.3)$$

$$p_1 = \frac{\lambda}{\mu + \nu} p_0 \quad (2.4)$$

$$p_2 = \frac{\lambda\nu + \mu\nu' + \nu\nu'}{\gamma(\mu + \nu)} p_0 \quad (2.5)$$

Для визначення відносної пропускної здатності застосовуємо принципи, наведені в [52]. Для цього помножимо ймовірність p_0 на ймовірність p' того, що вхідний запит буде виконано, тобто канал не дає збою під час обробки запиту:

$$p' = \int_0^{\infty} \mu e^{-\mu t} e^{-\nu t} dt = \int_0^{\infty} \mu e^{-(\mu+\nu)t} dt = \frac{\mu}{\mu + \nu} \quad (2.6)$$

$$Q = p_0 p' = p_0 \frac{\mu}{\mu + \nu} \quad (2.7)$$

Абсолютна пропускна здатність:

$$A = \lambda Q = p_0 \frac{\lambda \mu}{\mu + \nu} \quad (2.8)$$

Після спрощення виразу для Q (відносна пропускна здатність) його можна записати у формі, більш зручній для чисельного обчислення, наступним чином:

$$Q = \frac{\mu \gamma}{(\mu + \nu)(\gamma + \nu') + \lambda(\gamma + \nu)} \quad (2.9)$$

Імовірність обслуговування вхідного запиту Q визначається п'ятьма параметрами. Ці параметри є інтенсивностями відповідних потоків: λ , μ , γ , ν та ν' .

Тепер розрахуємо значення Q для різних комбінацій параметрів, згаданих вище.

Обчислення ймовірностей виконання вхідного запиту за різних умов плавання та інтенсивності потоків вхідних запитів, потоків відмов і потоків відновлення можна побачити на рис. 2.3–2.8.

Вихідні дані, отримані із досвіду морського плавання та аналізу практичних умов, виражають інтенсивність потоку подій в одиницю часу.

Рис. 2.3–2.4 ілюструють залежності, що спостерігаються під час сприятливих умов плавання, зокрема у відкритих морях і океанах. Інтенсивність потоку запитів зростає з 2 до 6 на годину, що призводить до зниження ймовірності виконання запитів. Щоб досягти високої ймовірності Q (близько 1), можна підвищити пропускну здатність як каналу обслуговування, так і каналу відновлення.

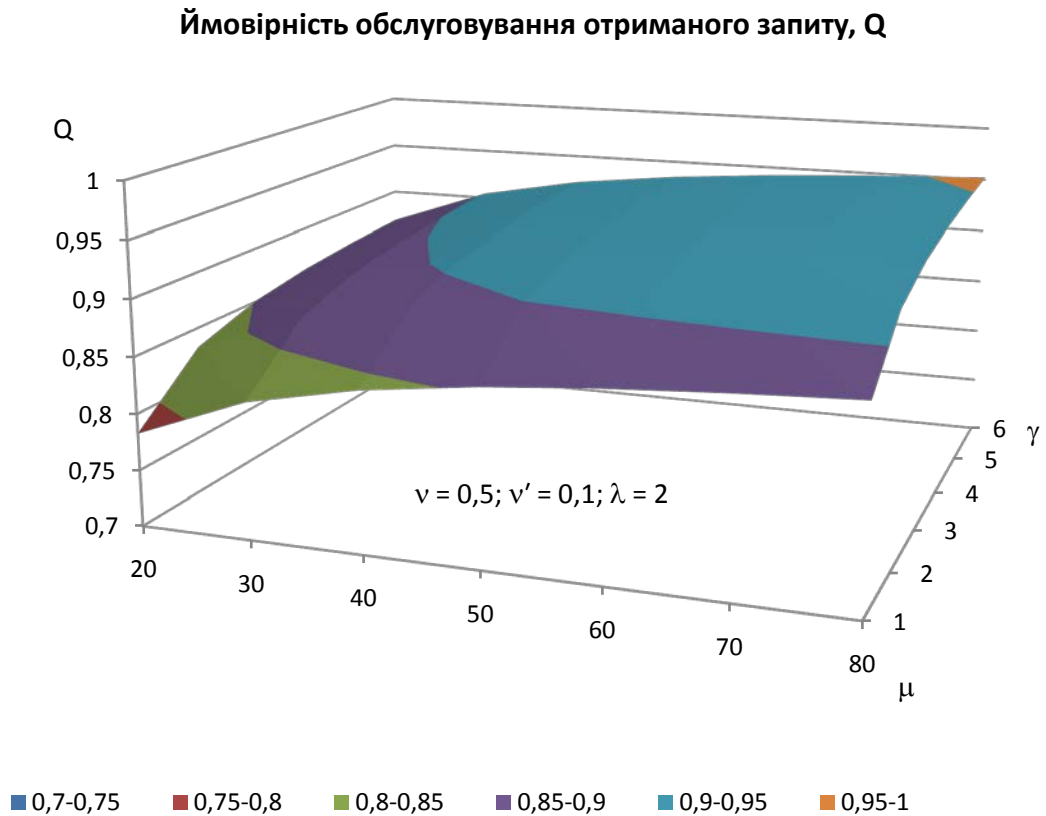


Рисунок 2.3 – Залежність між Q та λ , μ , γ , v , v' . Інтенсивності відповідних потоків такі: $v = 0,5$ за годину; $v' = 0,1$ за годину; $\lambda = 2$; μ від 20 до 80 на годину; γ від 1 до 6 на годину

$$Q = \frac{20 \cdot 1}{(20 + 0,5)(1 + 0,1) + 2(1 + 0,5)} = 0,7828$$

$$\begin{aligned}
 Q_T &= 0,6824 \pm 0,0079 + \\
 &+ (0,0474 \pm 0,0029)\gamma + (-0,0047 \pm 0,0004)\gamma^2 + \\
 &+ (0,0041 \pm 0,0003)\mu + (-2,7579 \times 10^{-5} \pm 0,2881 \times 10^{-5})\mu^2 \\
 R^2 &= 0,9765; \sigma = 0,0065.
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

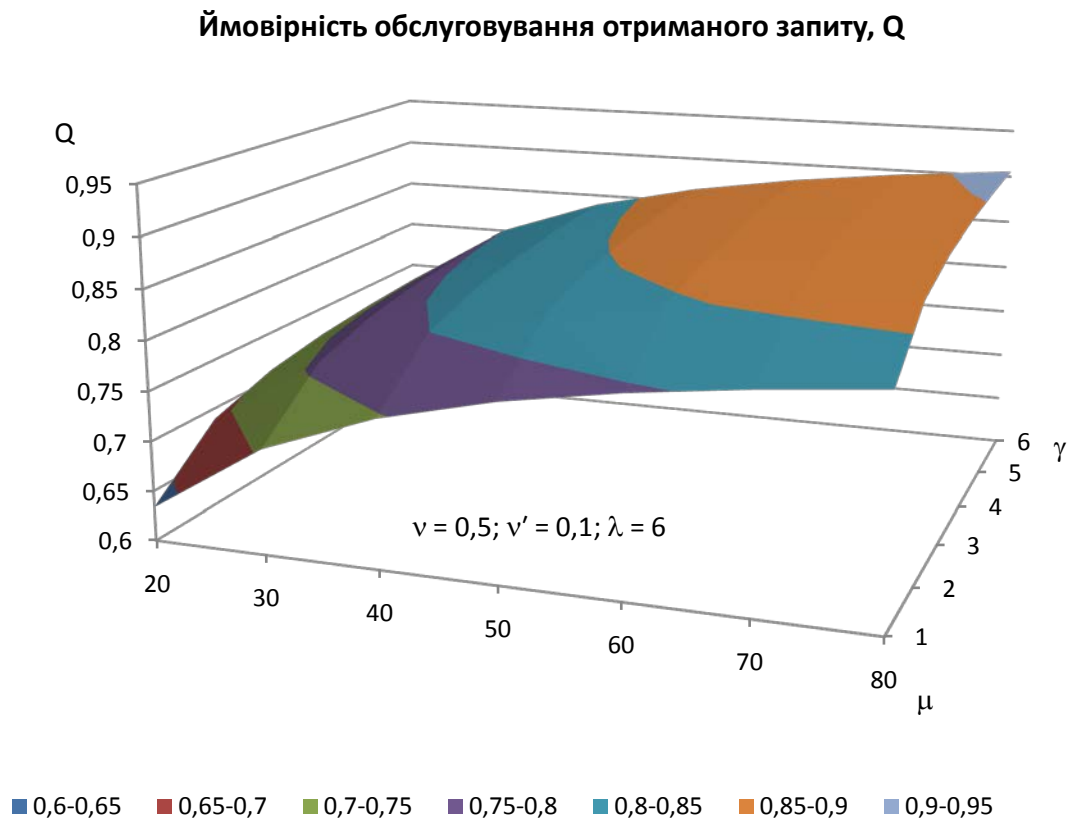


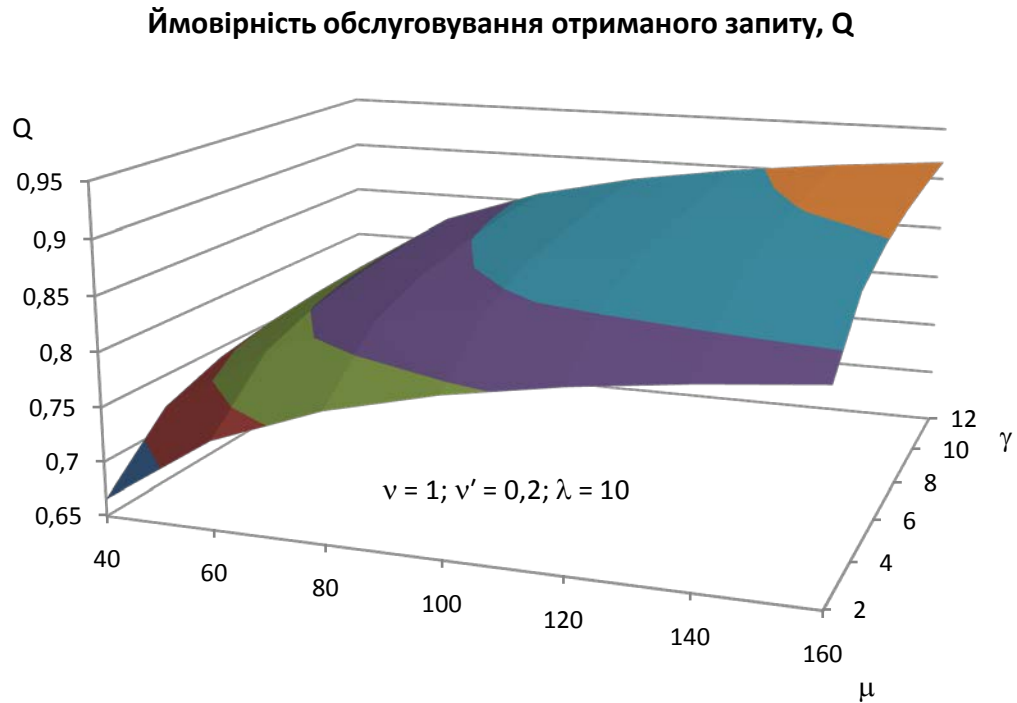
Рисунок 2.4 – Залежність між Q та λ , μ , γ , v , v' . Інтенсивності відповідних потоків такі: $v = 0,5$ за годину; $v' = 0,1$ за годину; $\lambda = 6$; μ від 20 до 80 на годину; γ від 1 до 6 на годину

$$Q = \frac{20 \cdot 1}{(20 + 0,5)(1 + 0,1) + 6(1 + 0,5)} = 0,6339$$

$$\begin{aligned} Q_T = & 0,4641 \pm 0,0104 + \\ & + (0,0525 \pm 0,0038)\gamma + (-0,0052 \pm 0,0005)\gamma^2 + \\ & + (0,008 \pm 0,0004)\mu + (-5,2609 \times 10^{-5} \pm 0,3793 \times 10^{-5})\mu^2 \\ & R^2 = 0,9855; \sigma = 0,0085. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Залежності для ускладнених умов плавання в прибережних зонах показані на рис. 2.5–2.6. У цьому сценарії інтенсивність потоку відмов зростає до 1, тоді як інтенсивність потоку запитів коливається від 10 до 20, як

показано на графіках. Отже, ймовірність виконання запитів зменшується порівняно з наведеними раніше даними.



■ 0,65-0,7 ■ 0,7-0,75 ■ 0,75-0,8 ■ 0,8-0,85 ■ 0,85-0,9 ■ 0,9-0,95

Рисунок 2.5 – Залежність між Q та λ , μ , γ , ν , ν' . Інтенсивності відповідних потоків такі: $\nu = 1$ за годину; $\nu' = 0,2$ за годину; $\lambda = 10$; μ від 40 до 160 на годину; γ від 2 до 12 на годину

$$Q = \frac{40 \cdot 2}{(40 + 1)(2 + 0,2) + 10(2 + 1)} = 0,6656$$

$$Q_T = 0,5098 \pm 0,01 + (0,0258 \pm 0,0018)\gamma + (-0,0013 \pm 0,0001)\gamma^2 + (0,0036 \pm 0,0002)\mu + (-1,2002 \times 10^{-5} \pm 0,0912 \times 10^{-5})\mu^2 \quad (2.12)$$

$$R^2 = 0,9839; \sigma = 0,0082.$$

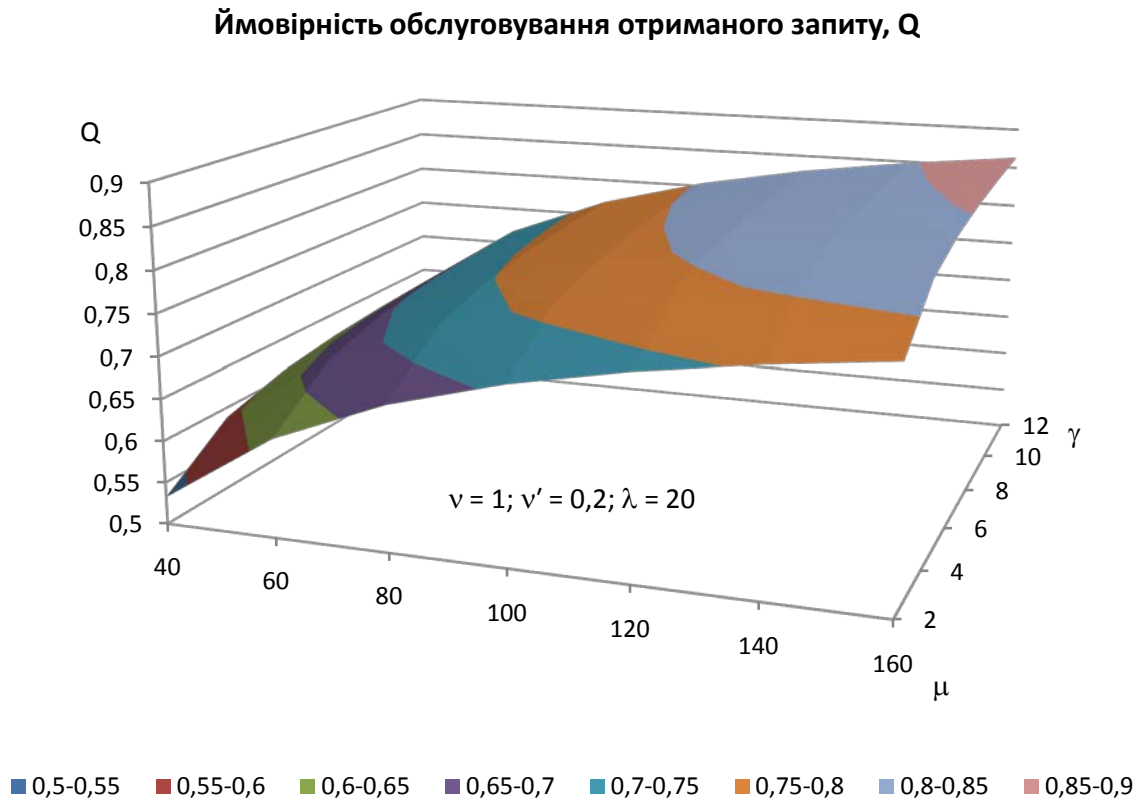


Рисунок 2.6 – Залежність між Q та λ , μ , γ , v , v' . Інтенсивності відповідних потоків такі: $v = 1$ за годину; $v' = 0,2$ за годину; $\lambda = 20$; μ від 40 до 160 на годину; γ від 2 до 12 на годину

$$Q = \frac{40 \cdot 2}{(40 + 1)(2 + 0,2) + 20(2 + 1)} = 0,5326$$

$$Q_T = 0,3222 \pm 0,011 + (0,0275 \pm 0,002)\gamma + (-0,0014 \pm 0,0001)\gamma^2 + (0,0051 \pm 0,0002)\mu + (-1,6011 \times 10^{-5} \pm 0,101 \times 10^{-5})\mu^2 \quad (2.13)$$

$$R^2 = 0,9897; \sigma = 0,0091.$$

У складних навігаційних умовах, таких як річки, порти, інтенсивний рух водного транспорту та погана видимість, рис. 2.7–2.8 ілюструють залежності, що спостерігаються під час таких умов плавання. Інтенсивність потоку відмов збільшується до 5, тоді як потік запитів коливається від 20 до

40, що призводить до подальшого зниження ймовірності виконання запиту порівняно з попередніми даними.

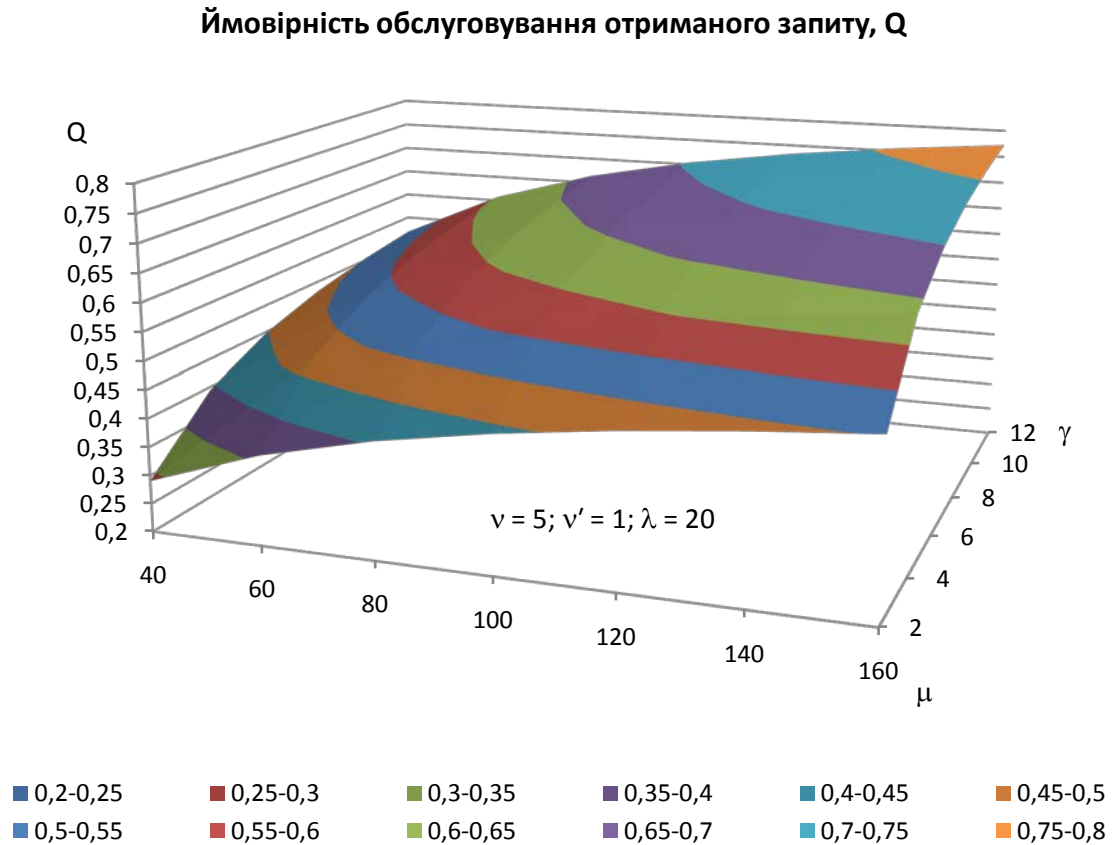


Рисунок 2.7 – Залежність між Q та λ , μ , γ , v , v' . Інтенсивності відповідних потоків такі: $v = 5$ за годину; $v' = 1$ за годину; $\lambda = 20$; μ від 40 до 160 на годину; γ від 2 до 12 на годину

$$Q = \frac{40 \cdot 2}{(40 + 5)(2 + 1) + 20(2 + 5)} = 0,2909$$

$$\begin{aligned}
 Q_T = & -0,0095 \pm 0,0163 + \\
 & + (0,0667 \pm 0,003)\gamma + (-0,0031 \pm 0,0002)\gamma^2 + \\
 & + (0,0049 \pm 0,0003)\mu + (-1,5023 \times 10^{-5} \pm 0,1487 \times 10^{-5})\mu^2
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

$R^2 = 0,989; \sigma = 0,0134.$

Ймовірність обслуговування отриманого запиту, Q

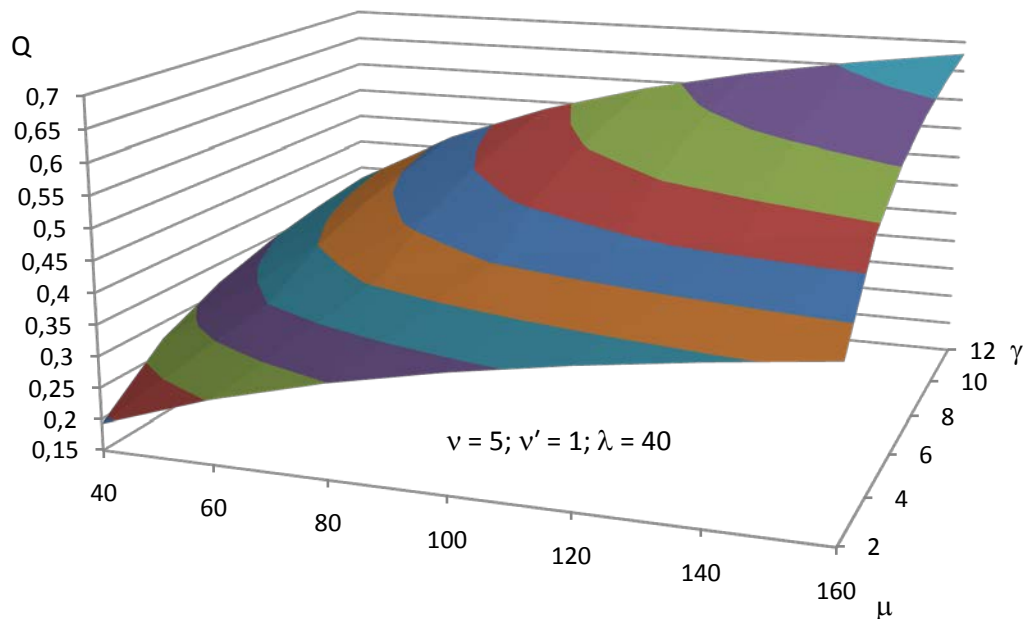


Рисунок 2.8 – Залежність між Q та λ , μ , γ , v , v' . Інтенсивності відповідних потоків такі: $v = 5$ за годину; $v' = 1$ за годину; $\lambda = 40$; μ від 40 до 160 на годину; γ від 2 до 12 на годину

$$Q = \frac{40 \cdot 2}{(40 + 5)(2 + 1) + 40(2 + 5)} = 0,1928$$

$$\begin{aligned}
 Q_T = & -0,1196 \pm 0,0171 + \\
 & + (0,0604 \pm 0,0031)\gamma + (-0,0027 \pm 0,0002)\gamma^2 + \\
 & + (0,005 \pm 0,0003)\mu + (-1,3831 \times 10^{-5} \pm 0,1561 \times 10^{-5})\mu^2
 \end{aligned} \quad (2.15)$$

$R^2 = 0,9886; \sigma = 0,014.$

Рівняння Q_T (математична модель) під кожним графіком отримано із застосуванням методу квадратичної двофакторної апроксимації. Високий рівень коефіцієнтів детермінації ($R^2=0,98-0,99$) свідчить про високу адекватність отриманих статистичних квадратичних моделей. Квадратичні

регресії демонструють надзвичайно низькі стандартні відхилення ($\sigma=0,006-0,014$), що вказує на їх виняткову точність. Отже, ці моделі можна впевнено використовувати для отримання високонадійних оцінок ймовірності.

Отримані за допомогою моделі дані також узгоджуються з наступними рекомендаціями щодо вахтової роботи на містку у різних складних навігаційних умовах.

Таблиця 2.2 – Вахтові умови на містку, які стосуються умов плавання [54]

	<i>Відкрита вода</i>	<i>Обмежений доступ до води, постановки на якір, посадки або висадки лоцмана</i>	<i>Вхід у порт або вихід з нього</i>
Ясна погода, мало або немає руху	I	II	III
Ясна погода, інтенсивний рух	II	II або III	III
Обмежена видимість, рух транспорту незначний або відсутній	II	II	III
Обмежена видимість, інтенсивний рух транспорту	II або III	II або III	III
Лоцманська проводка	I	I або II	II або III

Вахтовий стан на містку – I.

Щоб виконати цю умову, на містку повинні бути як вахтовий офіцер, так і спостерігач.

Вахтовий офіцер виконує регулярні обов'язки з несення вахти, а іноді бере на себе роль єдиного наглядача протягом дня. За обставин, які вимагають ручного керування, важливо зазначити, що керманич не може виконувати роль спостерігача. Таким чином, необхідно призначити додаткового члена екіпажу як спеціального спостерігача. Машинне відділення має можливість працювати як в пілотованому, так і в безпілотному режимах.

Вахтовий стан на містку – II.

Для виконання цієї вимоги необхідно, щоб на містку були присутні такі особи: капітан або старший помічник, вахтовий офіцер, спостерігач і керманич.

Безпечне плавання та загальна організація вахти екіпажу контролюється капітаном або старшим помічником. Допомагаючи капітану або старшому помічнику, вахтовий офіцер передає відповідну інформацію, здійснює навігацію на судні та контролює виконання наказів. У ситуаціях, які офіцери вважають за необхідне, або коли стикаються зі складними умовами, такими як інтенсивний рух, обмежена видимість, маневри в порту або посадка на борт лоцмана, керманіч бере на себе керування судном вручну.

Важливо, щоб у машинному відділенні завжди був доступний персонал, але в кінцевому підсумку капітан вирішує, призначати туди персонал чи ні.

Вахтовий стан на містку – III.

Для виконання цієї умови на містку необхідна присутність наступного персоналу: капітан, вахтовий, додатковий офіцер, спостерігач і керманіч.

У разі умови III вахтовий офіцер звільняється від обов'язків спостереження за зіткненнями, а додатковий офіцер бере на себе цей обов'язок, використовуючи системи AIS/ARPA. Вони надають вахтовому офіцеру відповідну навігаційну інформацію та дані щодо найближчих суден. Важливо, щоб у машинному відділенні був присутній і готовий персонал.

Цікавим є досвід Кореї у впровадженні систем електронної навігації. Корейська реалізація концепції електронної навігації ІМО, відомої як SMART-навігація, застосовується до корейських вод і на корейських афільюваних суднах. На додаток до сфери електронної навігації ІМО, SMART-навігація розширює свої послуги на судна, які не підпадають під SOLAS, такі як рибальські та нерибальські судна, що працюють у внутрішніх прибережних зонах. Це припущення виникає з різних причин, насамперед через те, що судна, які не відповідають вимогам SOLAS, більш сприйнятливі до аварій, ніж судна SOLAS. Цю сприйнятливість можна пояснити неадекватним навігаційним обладнанням, збільшенням робочого навантаження на борту та обмеженою інформацією про безпеку від берегових станцій.

Мета SMART-Navigation полягає в тому, щоб запропонувати суднам, які не відповідають вимогам SOLAS, додаткові спеціалізовані послуги, поряд із послугами електронної навігації IMO. Основне завдання служб – передбачити та попередити можливі причини аварій. Це досягається завдяки проактивній підтримці та управлінню територіями, які вважаються вразливими до аварій. Ці визначення виконуються шляхом аналізу статистики в реальному часі та даних про місцеву ситуацію, які отримані з берегових станцій. Ці послуги охоплюють:

- Підтримка прийняття рішень щодо запобігання нещасним випадкам є надзвичайно важливою.
- Аналіз факторів безпеки на морі з використанням великих даних.
- Судна, яким загрожує аварія, можуть отримувати надану їм інформацію про безпеку.
- Надання потокової послуги електронних навігаційних карт (ENC).
- Дистанційна підтримка та керування судновими командами з навчання безпеки є важливими для ефективної роботи.
- Здатність ефективно ідентифікувати та реагувати на всі морські сектори в кожному регіоні корейських вод є обов'язковою.
- Надання інформації про діяльність незаконного незареєстрованого нерегульованого рибальства.
- Подання подробиць щодо розливу нафти.
- Допоміжні заходи для запобігання незаконному скиданню відходів і забруднюючих речовин з суден.
- Надання допомоги для різноманітних заходів щодо безпеки на морі.

Для досягнення цих цілей метою SMART-навігації є створення мережі зв'язку LTE-Maritime як основи для суден, які не підпадають під SOLAS, щоб забезпечити розгортання основних служб електронної навігації. Крім того, комунікаційні мережі, необхідні для послуг електронної навігації, будуть оснащені структурою даних, що базується на Загальній структурі морських

даних (CMDS). Ця структура даних включатиме VHF обмін даними (VDE), а також цифровий HF/MF і супутниковий зв'язок.

Щоб оцінити вплив SMART-навігації на зменшення аварій, автори [50] провели комплексний аналіз даних про аварії в корейських водах для всіх суден і суден під корейським прапором у всьому світі з 2009 по 2013 роки. Дані, представлені в цій роботі, були отримано від Корейського суду з безпеки на морі (KMST). За результатами аналізу було обстежено 4871 аварійне судно. Виходячи з цього, автори визначили 3366 аварійних суден, щодо яких вони спеціально розглянули детальні прямі причини аварій, яких можна було запобігти за допомогою варіантів контролю ризиків (RCO), запропонованих електронною навігацією.

Таблиця 2.3 – Рейтинг RCO на основі потенційної втрати життя [55]

Тип нещасного випадку				Людські помилки	Технічний збій	Зовнішній фактор	Всього	
							Фактичний	Ефект
Нерибальські судна	Навігаційна аварія	SOLAS	Фактичний %	465 (13,8%)	–	14 (0,4%)	828 (24,6%)	14,8%
			Швидкість зниження ризику	65,1%	–	65%		
			Ефект	8,9%	–	0,3%		
		Не-SOLAS	Фактичний %	338 (10,0%)	–	11 (0,3%)		
			Швидкість зниження ризику	55,1%	–	55,0%		
			Ефект	5,5%	–	0,1%		
Нерибальські судна	Ненавігаційна	SOLAS	Фактичний %	163 (4,8%)	37 (1,1%)	4 (0,1%)	353 (10,5%)	6,2%
			Швидкість зниження ризику	65,3%	64,9%	65%		
			Ефект	3,1%	0,7%	–		
		Не-SOLAS	Фактичний %	119 (3,5%)	27 (0,8%)	3 (0,1%)		
			Швидкість зниження ризику	55,2%	54,9%	55%		
			Ефект	1,9%	0,4%	0,1%		
	Сума		Фактичний %	1,085 (32,2%)	64 (1,9%)	32 (0,95%)	1,181 (35,1%)	21,0%
			Ефект	19,4%	1,1%	0,5%		
Рибальські судна	Навігаційна аварія		Фактичний %	1,155 (34,3%)	2 (0,1%)	16 (0,5%)	1,173(34,8%)	19,1%
			Швидкість зниження ризику	54,9%	55%	54,9%		
			Ефект	18,8%	–	0,3%		

Таблиця 2.3 демонструє вплив SMART-навігації на зменшення випадків аварій. Ця оцінка була проведена за допомогою запропонованої формули, отриманої в результаті аналізу даних про аварії. Очікується, що скорочення перевищить 56,6% від загальної кількості аварій за участю 3366 суден, включаючи 13% суден SOLAS і 43,6% суден не SOLAS, зокрема рибальських суден. Очікується, що навігаційні аварії зменшаться більш ніж на 33,9%. Це включає зменшення на 14,8% для нерибальських суден і 19,1% для рибальських суден. Очікується, що кількість аварій, навіть без судноплавства, зменшиться на 22,7%. Це скорочення включає зменшення на 6,2% для нерибальських суден і 16,5% для рибальських суден. Очікуване зниження аварій, спричинених помилками людини, становить 50,2%. При цьому кількість аварій, спричинених технічними несправностями, передбачається зменшити на 5,4%, а аварій, спричинених зовнішніми факторами, – на 1% [56].

2.2. Побудова моделей навігаційних систем за даними експериментів (кореляційно-регресійний аналіз, побудова регресійних моделей, номограм, тощо)

Сумич та ін. [57] використали модель Маркова для дослідження надійності та доступності системи ECDIS з основною (головною) та вторинною підсистемами (резервною підсистемою). Основна та резервна системи створюють паралельну установку, у якій, якщо кожна підсистема може перебувати в робочому або нефункціональному стані, система може перебувати в одному з чотирьох станів. Використовуючи характеристики марковської моделі (де ймовірність майбутніх станів базується виключно на поточному стані; наступний стан визначається лише поточним станом, а не подіями, що ведуть до нього), надійність системи була розрахована як ймовірність того, що вона не перебуває в стані відмови. Основним висновком

дослідження було те, що запланований рівень надійності не був досягнутий. Це спонукало авторів запропонувати інший підхід, відомий як система холодного резервування, яка передбачає об'єднання систем резервного копіювання, з'єднаних послідовно або паралельно.

Використання теорії систем масового обслуговування є широко використовуваним способом оцінки ефективності технічних систем. Ця теорія дозволяє нам обчислити ймовірність різних станів у системі масового обслуговування (СМО) і встановити зв'язок між конкретними параметрами СМО та показниками її ефективності.

Якщо всі канали в системі розглядаються як базові канали, операцію СМО, яка проходить в даний момент, можна охарактеризувати як марковський випадковий процес. Ця процедура складається з окремих етапів і відбувається безперервно протягом певного періоду часу. Якщо виконується умова ергодичності, система досягає кінцевого стаціонарного стану. У цьому стані ймовірності станів та інші параметри процесу не залежать від часу. Дослідники часто зосереджуються на цих усталених, стійких рисах.

У разі збою каналу процес відновлення починається відразу. Це може включати пробудження, отримання необхідного лікування для зцілення або ефективне відновлення після інциденту.

На основі проведеного моделювання виконано кореляційно-регресійний аналіз отриманих залежностей за допомогою функції LINEST в Microsoft Excel. Проаналізовано рівняння, наведені нижче, при ускладненні умов судноплавства:

$$Q_T = 0,5098 \pm 0,01 + (0,0258 \pm 0,0018)\gamma + (-0,0013 \pm 0,0001)\gamma^2 + (0,0036 \pm 0,0002)\mu + (-1,2002 \times 10^{-5} \pm 0,0912 \times 10^{-5})\mu^2 \quad (2.12)$$

$$R^2 = 0,9839; \sigma = 0,0082.$$

$$Q_T = 0,3222 \pm 0,011 + (0,0275 \pm 0,002)\gamma + (-0,0014 \pm 0,0001)\gamma^2 + \\ + (0,0051 \pm 0,0002)\mu + (-1,6011 \times 10^{-5} \pm 0,101 \times 10^{-5})\mu^2 \quad (2.13) \\ R^2 = 0,9897; \sigma = 0,0091.$$

Аналіз рівнянь (2.12) і (2.13), отриманих при однакових значеннях $v=1,0$ і $v'=0,2$, але з різною інтенсивністю потоку запитів λ , показує, що збільшення λ від 10 до 20 зменшує ймовірність обслуговування вхідного запиту Q (відносна пропускна здатність) на 0,2.

При цьому коефіцієнти для μ і μ^2 збільшуються приблизно в півтора рази, а коефіцієнти для γ і γ^2 залишаються практично незмінними. Це означає, що збереження високого рівня Q значною мірою залежить від μ , а не від γ .

$$Q_T = -0,0095 \pm 0,0163 + \\ + (0,0667 \pm 0,003)\gamma + (-0,0031 \pm 0,0002)\gamma^2 + \\ + (0,0049 \pm 0,0003)\mu + (-1,5023 \times 10^{-5} \pm 0,1487 \times 10^{-5})\mu^2 \quad (2.14) \\ R^2 = 0,989; \sigma = 0,0134.$$

$$Q_T = -0,1196 \pm 0,0171 + \\ + (0,0604 \pm 0,0031)\gamma + (-0,0027 \pm 0,0002)\gamma^2 + \\ + (0,005 \pm 0,0003)\mu + (-1,3831 \times 10^{-5} \pm 0,1561 \times 10^{-5})\mu^2 \quad (2.15) \\ R^2 = 0,9886; \sigma = 0,014.$$

Водночас аналіз рівнянь (2.14) і (2.15) показує, що збільшення інтенсивності потоку відмов каналу v від 1 до 5 (v' від 0,2 до 1) при тій самій інтенсивності потоку запитів ($\lambda=20$) зменшує Q на 0,3. При цьому коефіцієнт для γ зростає в 2,4 рази (для γ^2 – у 2,2 рази), хоча коефіцієнти для μ і μ^2 практично не змінюються.

Це означає, що збереження високого рівня Q значною мірою залежить від інтенсивності потоку відновлення γ , а не від інтенсивності потоку обслуговування μ .

Таким чином, на збільшення інтенсивності потоку запитів λ система реагує збільшенням ролі інтенсивності потоку обслуговування μ і, навпаки, зі збільшенням інтенсивності потоку відмов ν система реагує підвищенням ролі інтенсивності потоку відновлення γ .

Отримані на основі моделювання дані також узгоджуються з наведеними вище (табл. 2.2) щодо вахтових режимів на містках у різних складних навігаційних умовах.

Також було проведено статистичне моделювання результатів чисельних експериментів, що представлені на рис. 2.3–2.8. З цією метою була побудована 4-факторна лінійна регресія для залежності величини Q від усіх 4 факторів (λ , ν , γ та μ). Отримане рівняння множинної регресії представлено нижче (2.16).

Побудова множинної лінійної регресії проводилася на основі 168 точок за 4 змінними.

$$\begin{aligned}
 Q_T = & 0,6377 \pm 0,0138 + \\
 & + (0,0157 \pm 0,001)\gamma + (0,0018 \pm 8,678 \times 10^{-5})\mu + \\
 & + (-0,0412 \pm 0,0024)\nu + (-0,0063 \pm 0,0004)\lambda \\
 R^2 = & 0,9329; \sigma = 0,045.
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

Отримане рівняння візуалізовано за допомогою побудованої номограми, яка представлена на рис. 2.9. Наведена номограма дозволяє швидко виконувати будь-які необхідні розрахунки та оцінки і має декілька варіантів застосування.

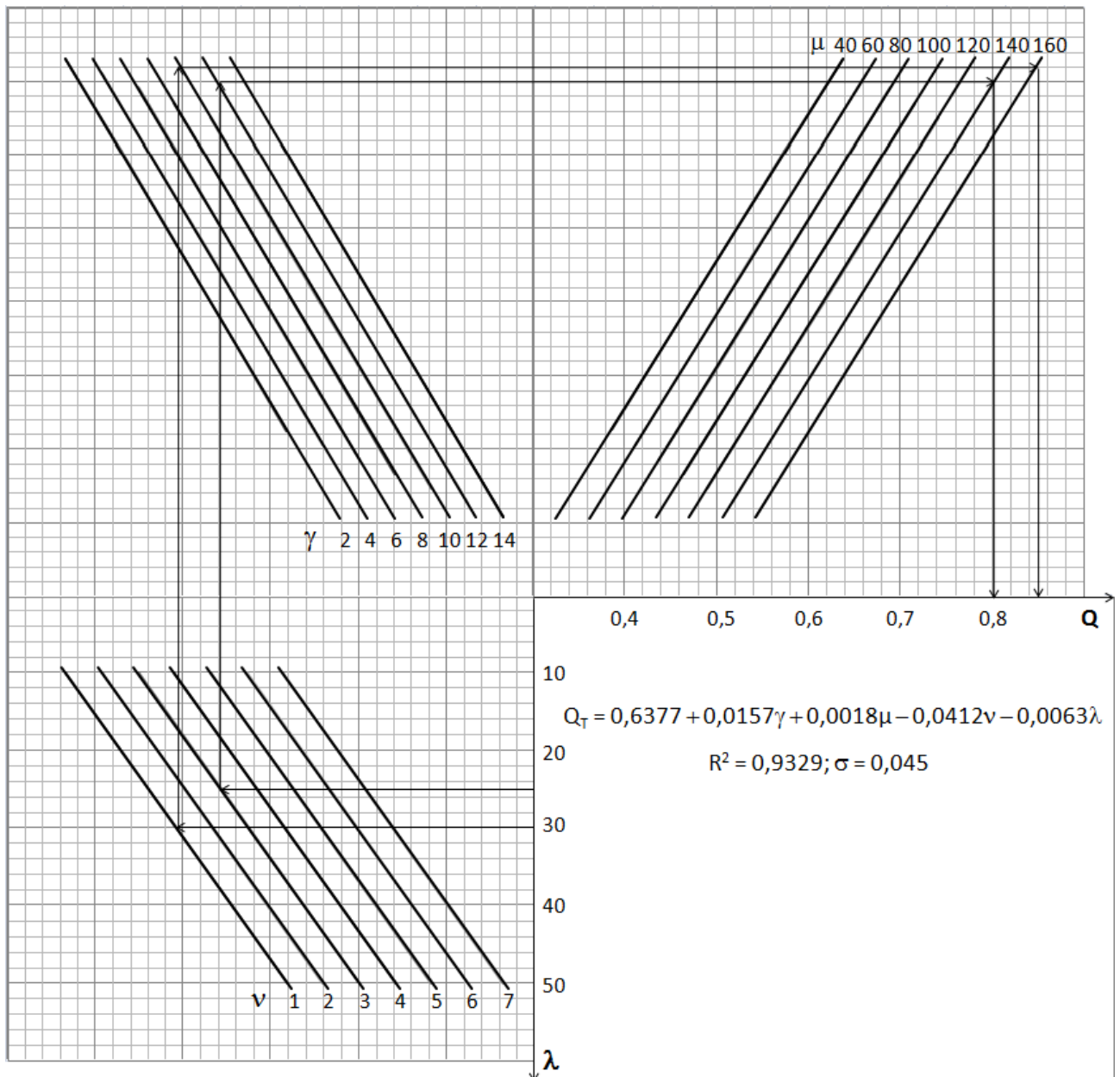


Рисунок 2.9 – Номограма чотирифакторної моделі для оцінки відносної пропускної здатності Q в залежності від змінних інтенсивностей λ , v , γ та μ

Дана модель має високий показник коефіцієнта детермінації $R^2=0,9329$, що свідчить про високу адекватність побудованої моделі та стандартне відхилення регресії $\sigma = 0,045$, прийнятне для практичного використання.

Наведемо кілька прикладів використання номограми.

Вибираємо значення λ (наприклад, 30), рухаємося в напрямку стрілки вліво, вибираємо значення v (в даному випадку це 1), рухаємося по стрілці вгору вибираємо значення γ (у наведеному прикладі 10), рухаючись по

стрілці вправо в першому квадранті вибираємо значення μ (в даному прикладі 160) і в самому кінці йдемо по стрілці вниз і на осі Q отримаємо його значення. Можливий і зворотний напрямок руху по номограмі, тобто розв'язування оберненої задачі: за заданими значеннями, крок за кроком рухаючись по номограмі проти стрілки часу, вибираємо значення вхідних параметрів моделі, які забезпечили б задане значення Q . Це завдання має багато можливих рішень і залежить від реальної можливості забезпечення конкретного рівня кожного з факторів, зрештою, від ступеня їх реальної досяжності.

Застосування номограм не обмежується наведеним випадком. Можливий і зустрічний рух: за вказаною схемою. Наприклад, визначивши цільове значення Q і відомі значення певних факторів моделі, можна ідентифікувати необхідні значення інших факторів для досягнення заданого Q . У цій постановці задачі номограма дозволяє оцінити існування розв'язку та, якщо воно є, визначити діапазон можливих значень ідентифікованих факторів разом із потенціалом їх заміни (у певних межах зменшення значення одного фактора може компенсуватися збільшенням значення іншого фактора).

Дана номограма пропонує численні можливості для оцінки потенційних меж значень Q за умови, що зрозуміло діапазон, у якому можуть коливатися вхідні коефіцієнти моделі. Іншими словами, якщо встановлені діапазони, в яких значення кожного фактора можна впевнено ідентифікувати, можна систематично переходити від одного фактора до іншого по заданій номограмі за допомогою «смуги» значень, де кожна «смушка» ілюструє межі варіації можливих значень цього фактора. Після завершення цього процесу отримаємо відповідну «смушку» значень Q , тобто матимемо оцінки потенційних відхилень від середнього прогнозованого значення Q (як песимістичні, так і оптимістичні прогнози) [58].

Висновки до II розділу

1. Аналізуючи результати моделювання, можна з'ясувати вплив початкових параметрів на ймовірність виконання вхідного запиту. Отже, стає можливим передбачити стабільність компонентів навігаційної системи. Отримані результати дають можливість розробити відповідні рекомендації щодо підвищення функціональної стійкості навігаційного комплексу. Результати моделювання демонструють, що зі збільшенням частоти відмов і збільшенням частоти запитів ймовірність виконання вхідних запитів різко знижується. Відповідно, погіршується працездатність навігаційного комплексу. У зв'язку зі значним зниженням шансів на безвідмовну роботу обладнання, важливо спланувати швидку заміну в навігаційній системі модулів і блоків, що вийшли з ладу. Такий підхід значно прискорить темпи відновлення. Крім того, в критичних ситуаціях обов'язково потрібно встановлювати «гарячий резерв», щоб гарантувати безперебійну роботу навігаційного комплексу. Крім того, існує ризик від'єднання внутрішніх компонентів системи. У гірокомпаса, наприклад, відсутні дані про швидкість судна, що викликає відхилення його показників. Якщо оператору бракує повного розуміння структури системи та її елементів, він не буде знати про цей факт. Як наслідок, це може призвести до помилок під час керування судном. Таким чином, розробляючи модель стійкості навігаційної системи, стає можливим моделювати різні аварійні ситуації. Моделювання виявило кореляцію між продуктивністю системи та її параметрами: λ , μ , γ , ν , ν' . Тобто, система характеризується широким набором внутрішніх з'єднань. При порушенні будь-якого з них може статися некоректна робота системи. Результати дослідження підкреслюють важливість визначення адекватного рівня дублювання навігаційних пристроїв для забезпечення надійності системи. Якщо значення Q падає нижче 0,7, це створює критичну ситуацію на борту судна. Ймовірність виконання запиту залежить від навігаційних умов плавання, як показано на рисунках 2.3–2.8. Отже, стає необхідним

впровадити заходи, які гарантують стабільність навігаційної системи під час складних обставин. Результати дослідження мають потенціал для покращення розуміння питань, пов'язаних з небезпекою та відповідного рівня ризику. Незважаючи на зростаючий інтерес до цієї галузі, про що свідчить зростання кількості публікацій, важливо визнати дефіцит літератури та наголосити на необхідності подальших досліджень. Стейкхолдерам рекомендується провести комплексний аналіз небезпек, класифікуючи небезпеки з більшою деталізацією. Цей підхід дозволяє глибше оцінити сприяючі фактори, що призводить до більш конкретних та ефективних стратегій управління ризиками.

2. Завдяки дослідженню результатів моделювання можна визначити, як початкові параметри впливають на ймовірність виконання вхідного запиту. Це дозволяє прогнозувати стабільність компонентів навігаційної системи. Отримані результати дають можливість створити відповідні пропозиції щодо підвищення функціональної стабільності навігаційних систем. Результати моделювання вказують на те, що ймовірність виконання вхідного запиту суттєво зменшується зі збільшенням частоти відмов і частоти запитів. Тому продуктивність навігаційного комплексу знижується. Таким чином, створення моделей стійкості для навігаційних систем дозволяє моделювати різні сценарії надзвичайних ситуацій, уможливлуючи швидкий розрахунок і оцінку різних можливостей за допомогою візуалізації номограми, отриманої за допомогою лінійної регресії. Моделювання виявило зв'язок між продуктивністю системи та її параметрами: λ , μ , γ , ν , ν' . Це означає, що збереження високого рівня Q значною мірою залежить від інтенсивності потоку відновлення γ , а не від інтенсивності потоку обслуговування μ . Таким чином, на збільшення інтенсивності потоку запитів λ система реагує збільшенням ролі інтенсивності потоку обслуговування μ і, навпаки, зі збільшенням інтенсивності потоку відмов ν система реагує підвищенням ролі інтенсивності потоку відновлення γ .

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ МОРСЬКОГО СУДНА

3.1. Визначення параметрів вибіркового контролю для виявлення стану елементів навігаційних систем (регламент вибіркового контролю)

Визначення та регулювання параметрів вибіркового контролю для виявлення стану елементів навігаційних систем передбачає встановлення системного підходу до моніторингу, діагностики та управління справністю цих систем. Вибірковий контроль зосереджено на визначенні окремих елементів навігаційних систем для детального аналізу, що забезпечує проактивне обслуговування та своєчасне втручання [59].

Ось покрокова інструкція щодо визначення та регулювання параметрів вибіркового контролю:

1. Визначення мети вибіркового контролю.

Мета: встановити основні цілі вибіркового контролю, такі як підвищення надійності системи, скорочення часу простою, підвищення безпеки або оптимізація зусиль з обслуговування.

Обсяг: визначити, які елементи навігаційних систем (наприклад, GPS, радар, AIS, гірокомпас) підлягатимуть вибіркового контролю.

2. Визначити критичні елементи.

Критичні компоненти: визначити найбільш критичні компоненти навігаційних систем, збій яких мав би найбільший вплив на роботу судна. Це можуть бути такі основні системи, як GPS, ECDIS, радар і системи зв'язку.

Вплив відмови: оцінити потенційний вплив відмови кожного компонента на безпеку навігації та ефективність експлуатації.

3. Визначення параметрів для вибіркового контролю.

Ключові параметри: визначити параметри, які необхідно контролювати, щоб оцінити справність кожного критичного компонента. Загальні параметри включають:

- Потужність сигналу: для систем GPS, радарів і AIS.
- Точність: позиційна точність для GPS та AIS.
- Час відгуку: час, необхідний системам для реакції на вхідні дані або зміни умов.
- Енергоспоживання: для компонентів, чутливих до коливань потужності.
- Умови навколишнього середовища: температура, вологість і вібрація, які можуть вплинути на продуктивність системи.
- Коди помилок: спеціальні діагностичні коди, створені системою, що вказують на можливі проблеми.

4. Встановлення порогових значень та допусків.

Порогові рівні: встановити порогові рівні для кожного параметра, які вказують на нормальне чи ненормальне функціонування. Ці порогові значення можуть ґрунтуватися на:

- Специфікації виробника: рекомендовані робочі діапазони, надані виробниками обладнання.
- Історичні дані: дані попередніх операцій, які визначають нормальні діапазони для кожного параметра.
- Галузеві стандарти: відповідність морським стандартам, таким як стандарти ІМО або Міжнародної електротехнічної комісії (ІЕС).

Межі допуску: визначити межі допуску, за якими запускається попередження, що сигналізує про можливе погіршення чи збій системи.

5. Розроблення стратегії моніторингу та контролю.

Постійний моніторинг: запровадити безперервний моніторинг ідентифікованих параметрів за допомогою датчиків, діагностичних інструментів і систем програмного забезпечення.

Планові перевірки: доповнити постійний моніторинг регулярними перевітками вручну, особливо для компонентів, які можуть не мати автоматизованої діагностики.

Моніторинг на основі стану: застосовувати моніторинг на основі стану, коли системи перевіряються частіше, якщо вони працюють у важких умовах або мають ознаки зносу.

Адаптивне керування: використовувати адаптивні алгоритми керування, які регулюють робочі параметри в режимі реального часу на основі даних моніторингу, щоб запобігти збоєм системи.

6. Впровадження інструментів збору та аналізу даних.

Реєстрація даних: використати системи реєстрації даних для збору та зберігання даних усіх контрольованих параметрів. Ці дані повинні мати мітку часу та класифіковані за компонентами системи.

Діагностичне програмне забезпечення: запровадити діагностичне програмне забезпечення, здатне аналізувати дані в режимі реального часу, порівнювати їх із визначеними пороговими значеннями та виявляти потенційні проблеми.

Прогнозна аналітика: використати прогнозу аналітику для прогнозування потенційних збоїв на основі тенденцій у зібраних даних, що дозволяє проводити попереджувальне обслуговування.

7. Регулювання вибірових заходів контролю.

Системи сповіщень: розробити багаторівневу систему сповіщень, яка класифікує проблеми на основі серйозності:

- Попередження низького рівня: вказують на незначні відхилення від нормальної роботи, вказуючи на необхідність ретельного моніторингу системи.
- Попередження середнього рівня: вказують на значні відхилення, які потребують обслуговування або негайної уваги.
- Попередження високого рівня: вказують на критичні збої, які можуть вимагати відключення системи або негайного втручання.

Автоматичні відповіді: де це можливо, автоматизувати відповіді на певні сповіщення, такі як перемикання на резервні системи, коригування робочих параметрів або ініціювання самодіагностики.

Перевизначення вручну: переконатися, що судноводії можуть вручну перевизначати автоматичне керування, якщо це необхідно, особливо в критичних ситуаціях.

8. Валідація та тестування.

Симуляційне тестування: запустити моделювання, щоб перевірити ефективність вибірових контрольних параметрів і порогових значень за різних сценаріїв, включаючи нормальні та екстремальні умови.

Морські випробування: проведення випробувань під час фактичних операцій на судні, щоб підтвердити ефективність системи вибірового контролю в реальних умовах.

Цикл зворотного зв'язку: використати результати тестування для точного налаштування параметрів, порогових значень і стратегій керування для підвищення надійності та продуктивності системи.

9. Документація та звітність.

Звіти про контроль: створити звіти з детальною інформацією про продуктивність систем вибірового контролю, включаючи кількість сповіщень, типи виявлених проблем і вжиті дії реагування.

Перегляд параметрів: регулярно переглядати та оновлювати параметри, порогові значення та стратегії контролю на основі останніх операційних даних і технологічних досягнень.

Відповідність нормативним вимогам: переконатися, що всі заходи вибірового контролю задокументовані відповідно до вимог морського законодавства та що судно залишається відповідним стандартам безпеки.

10. Навчання та постійне вдосконалення.

Навчання екіпажу: навчання судноводіїв системам вибірового контролю, включно з тим, як інтерпретувати сповіщення, керувати ручними блокуваннями та проводити перевірки.

Постійне вдосконалення: регулярна оцінка ефективності вибіркового заходів контролю та за потреби вносити покращення, враховуючи уроки, отримані з минулих інцидентів, і нові розробки в навігаційних технологіях.

Систематично встановлюючи та регулюючи параметри для вибіркового контролю, можна підвищити надійність і безпеку навігаційних систем на морському судні, забезпечивши виявлення й усунення потенційних проблем до того, як вони перетворяться у критичні збої [60-73].

Електронні транспортні системи відіграють роль у багатьох транспортних системах. Безпека та ефективність перевезення людей і вантажу значною мірою залежить від їх ефективної роботи. Загрози безпеці можуть виникнути через ненадійність електрообладнання та помилки операторів. Концепція ненадійності зосереджена на вивченні того, як пошкодження обладнання та помилки оператора впливають на конкретні показники ненадійності. Теорія безпеки зосереджується на результатах шкоди та помилок, які призводять до ризиків для безпеки. Правильна ідентифікація допустимих і неприпустимих станів у системі має вирішальне значення з точки зору безпеки.

Стан загрози безпеці іноді можна змінити, вживши заходів для відновлення повної придатності, наприклад діагностику пошкоджень і спробу ремонту, виправлення помилок оператора або нейтралізацію зовнішніх подій. Контрзахід має бути здійснено протягом доступного часу. Якщо контрзахід не працює або діє надто повільно, система переходить із стану безпеки до стану небезпеки, також відомого як стан ненадійності безпеки.

Підвищення параметрів надійності електронних транспортних систем може призвести до підвищення рівня їх безпеки. Підвищення надійності може бути результатом підвищення надійності компонентів або впровадження резервних структур. Початкове рішення спрямоване на уникнення шкоди. У другому сценарії використання подвійного або потрійного резервування може збільшити розмір системи, але дозволяє

прийняти будь-які пошкодження, які можуть виникнути. Резервування може застосовуватися до компонентів пристроїв, системних модулів і комп'ютерів, які контролюють транспортні операції. Важливість даних, отриманих датчиками, для систем також має вирішальне значення. Деякі дослідники пропонують використовувати нечітку логіку або штучні нейронні мережі.

Розуміння надійності системи має вирішальне значення для ефективних стратегій технічного обслуговування, пропонуючи цінну інформацію про продуктивність обладнання та наслідки збоїв на готовність обладнання, поширюючись на вплив усієї системи. Інструменти аналізу надійності зазвичай використовуються для допомоги у визначенні стратегій технічного обслуговування, які відповідають цілям організації. Вони зазвичай оцінюють вплив і потенціал відмови, аналізуючи як кількісні, так і якісні аспекти технічного обслуговування та експлуатаційних даних машин.

Для моделювання планування технічного обслуговування використовуються різні методи, такі як байєсівські мережі, моделювання Монте-Карло, ланцюги Маркова, мережі Петрі та аналіз Вейбулла. І навпаки, аналіз надійності складних систем, які включають недвійкові входи та безперервну стохастичну поведінку відмов, вимагав би унікального підходу до розгляду тимчасового стану системи або ремонтоздатної механічної системи, яка може нормально функціонувати навіть у разі погіршення. Останні дослідження також були зосереджені на виявленні аномалій у судновому обладнанні в режимі реального часу для діагностики несправностей; використання байєсівського та машинного навчання для виявлення та діагностики несправностей; оцінка керованого даними в режимі реального часу заміни відсутніх даних у короткострокових даних датчиків з морських систем; і створення методу зображення часових рядів для класифікації несправностей. Отже, буде потрібна більша гнучкість для створення моделі, яка представляє всі можливі фактори.

У результаті дослідники звернулися до різних інструментів для вирішення системних залежностей і складнощів у мультисистемних

установках. Цей підхід дозволяє використовувати різні типи даних для проведення аналізу надійності та використання інструментів у більш адаптований спосіб. Було проведено ретельну оцінку, щоб вивчити плюси та мінуси інструментів надійності, які використовувалися.

Вважається, що справжню частоту відмов фізичного процесу можна визначити за допомогою байєсівського аналізу, а не традиційного методу. Незважаючи на те, що довірчий розподіл може бути створений шляхом розширення традиційної ідеї довірчого інтервалу, цей метод не був повністю формалізований згідно з Фрейзером [74]. Перевага використання байєсівського підходу полягає в тому, що він забезпечує більш інтуїтивно зрозумілий спосіб представлення апостеріорного розподілу оціненого випадкового параметра. Крім того, врахування цього фактора як постійно змінюваного та непередбачуваного спрощує аналіз ситуацій, у яких метод підходить.

Розглянемо задачу оцінки байєсівської апостеріорної ймовірності відмови для системи з двома вузлами. Проведемо математичне моделювання байєсівських ймовірностей гіпотез в залежності від ймовірності безвідмовної роботи кожного вузла.

Навігаційний комплекс морського судна являє собою складну систему взаємопов'язаних пристроїв, вузлів і елементів, вихід з ладу кожного з яких може призвести до цілого ряду наслідків, що істотно погіршить надійність і стійкість системи в цілому.

У зв'язку з цим для розрахунку ймовірності відмов або ймовірності безвідмовної роботи як окремих елементів, так і навігаційного комплексу в цілому необхідно використовувати поняття повної ймовірності та байєсівської ймовірності відповідних гіпотез.

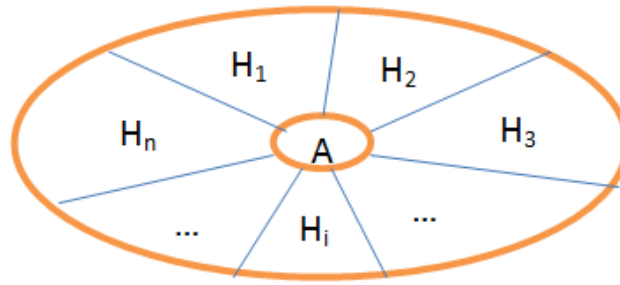


Рис. 3.1 – Подія A і гіпотези $H_1, H_2, \dots H_i, \dots H_n$.

Якщо можна висунути n взаємовиключних гіпотез $H_1, H_2, \dots H_i, \dots H_n$ щодо обставин функціонування системи (у даному випадку елементів навігаційного комплексу) і якщо подія A , яка цікавить (наприклад, збій системи), може з'явитися разом з однією з цих гіпотез, повна ймовірність цієї події $P(A)$ обчислюється за так званою формулою повної ймовірності:

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(H_i)P_{H_i}(A) \quad (3.1)$$

де $P(H_i)$ – ймовірність гіпотези H_i , а $P_{H_i}(A)$ – умовна ймовірність події A за цією гіпотезою.

По суті (3.1) є сумою добутків ймовірностей гіпотези на умовну ймовірність події за цією гіпотезою.

Якщо в результаті експерименту сталася подія A , то нові (умовні) ймовірності гіпотез $P_A(H_i)$ можна розрахувати за формулою Байєса:

$$P_A(H_i) = \frac{P(H_i)P_{H_i}(A)}{\sum_{i=1}^n P(H_i)P_{H_i}(A)} \quad (3.2)$$

Початкові (доекспериментальні) ймовірності гіпотез $P(H_i)$ називаються апріорними, а післяекспериментальні, розраховані за Байєсом, $P_A(H_i)$ — апостеріорними.

Спираючись на наведену вище теорію, розглянемо наступну задачу. Розглянемо пристрій, що складається з двох вузлів, в якому функціонування

обох вузлів необхідно для роботи пристрою в цілому. Нехай надійність (ймовірність безвідмовної роботи протягом заданого часу) першого пристрою P_1 , а другого P_2 . Нехай прилад перевіряють і виявилось, що він несправний.

Знайдемо наступні ймовірності:

1. Вийшов з ладу тільки перший вузол, другий працює;
2. Другий вузол вийшов з ладу, перший працює;
3. Обидва вузли вийшли з ладу.

До тесту вірогідними були такі гіпотези роботи навігаційної системи:

$H_0 = \{\text{обидва вузли працюють}\}$

$H_1 = \{\text{перший вузол вийшов з ладу, другий працює}\}$

$H_2 = \{\text{другий вузол вийшов з ладу, перший працює}\}$

$H_3 = \{\text{обидва вузли відмовили}\}$

Визначимо апіорні ймовірності гіпотез:

$$P(H_0) = P_1 P_2; \quad P(H_1) = (1 - P_1) P_2 \quad (3.3)$$

$$P(H_2) = P_1 (1 - P_2); \quad P(H_3) = (1 - P_1) (1 - P_2)$$

де: P_1 – ймовірність безвідмовної роботи першого пристрою;

P_2 – ймовірність безвідмовної роботи другого пристрою.

Спостерігалася подія $A = \{\text{відмова пристрою}\}$, і оскільки умовні ймовірності в цьому випадку дорівнюють $P_{H_0}(A) = 0$, $P_{H_1}(A) = P_{H_2}(A) = P_{H_3}(A) = 1$, то повна ймовірність $P(A)$ дорівнює:

$$P(A) = \sum_{i=1}^3 P(H_i) P_{H_i}(A) = \quad (3.4)$$

$$= (1 - P_1) P_2 + P_1 (1 - P_2) + (1 - P_1) (1 - P_2) = 1 - P_1 P_2$$

Тоді апостеріорні ймовірності гіпотез, відповідно до формули Байєса:

$$P_A(H_1) = \frac{(1 - P_1)P_2}{1 - P_1P_2} \quad (3.5)$$

$$P_A(H_2) = \frac{P_1(1 - P_2)}{1 - P_1P_2} \quad (3.6)$$

$$P_A(H_3) = \frac{(1 - P_1)(1 - P_2)}{1 - P_1P_2} \quad (3.7)$$

Таким чином, апостеріорні ймовірності гіпотез збільшуються в $(1 - P_1P_2) - 1$ разів, тобто чим ближче P_1 і P_2 до 1, тим більшим є цей множник.

У роботі вирази (3.5) – (3.7) протабульовані для різних значень P_1 і P_2 , а на рис. 3.2–3.7 вони візуалізовані та порівняні з апіорними ймовірностями $P(H_i)$ ($i=1, 2, 3$).

Видно, що поверхні апостеріорних ймовірностей $P_A(H_i)$ розташовані значно вище апіорних.

Також видно, що апіорна та апостеріорна ймовірності гіпотези H_1 зменшуються зі зростанням P_1 і збільшуються зі зростанням P_2 , а ймовірності гіпотези H_2 , навпаки, зменшуються зі зростанням P_2 і збільшуються зі зростанням P_1 .

Імовірність гіпотези H_3 зменшується як зі зростанням P_1 , так і зі зростанням P_2 .

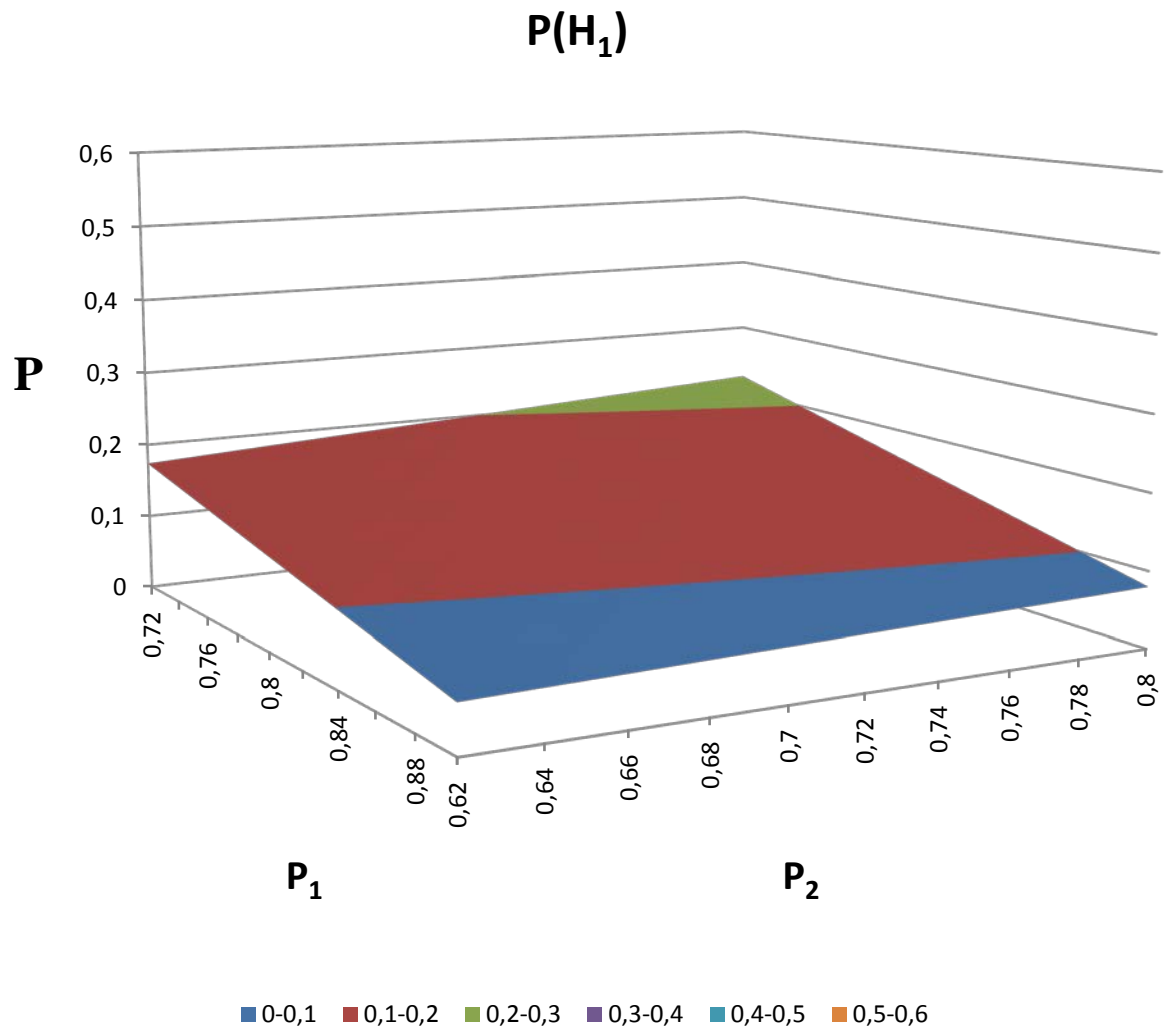


Рисунок 3.2 – Априорні ймовірності гіпотези H_1

$$P(H_1) = (1 - 0,72)0,8 = 0,224$$

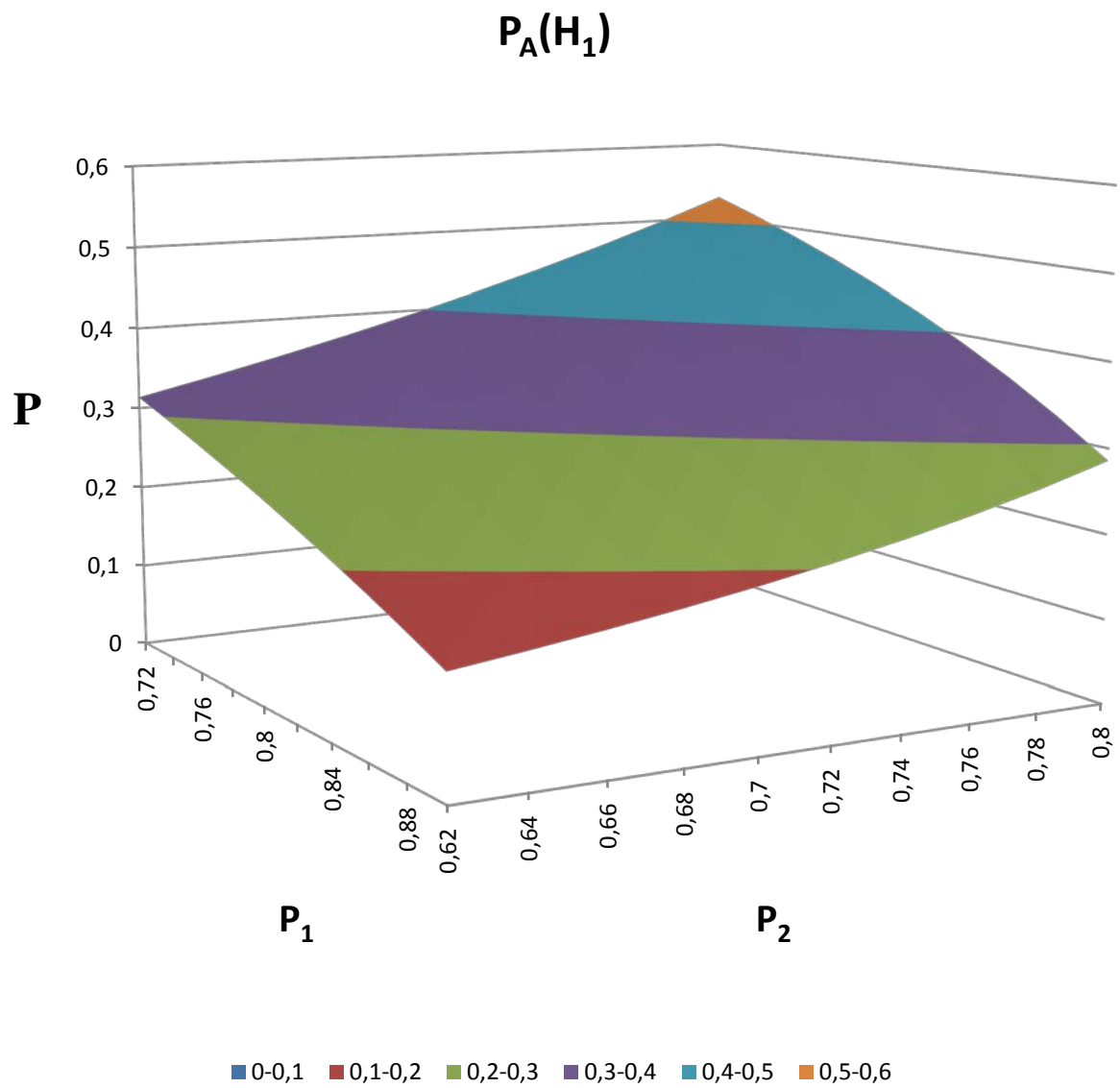


Рисунок 3.3 – Апостеріорні ймовірності гіпотези H_1

$$P_A(H_1) = \frac{(1 - 0,72)0,8}{1 - 0,72 \cdot 0,8} = 0,5283$$

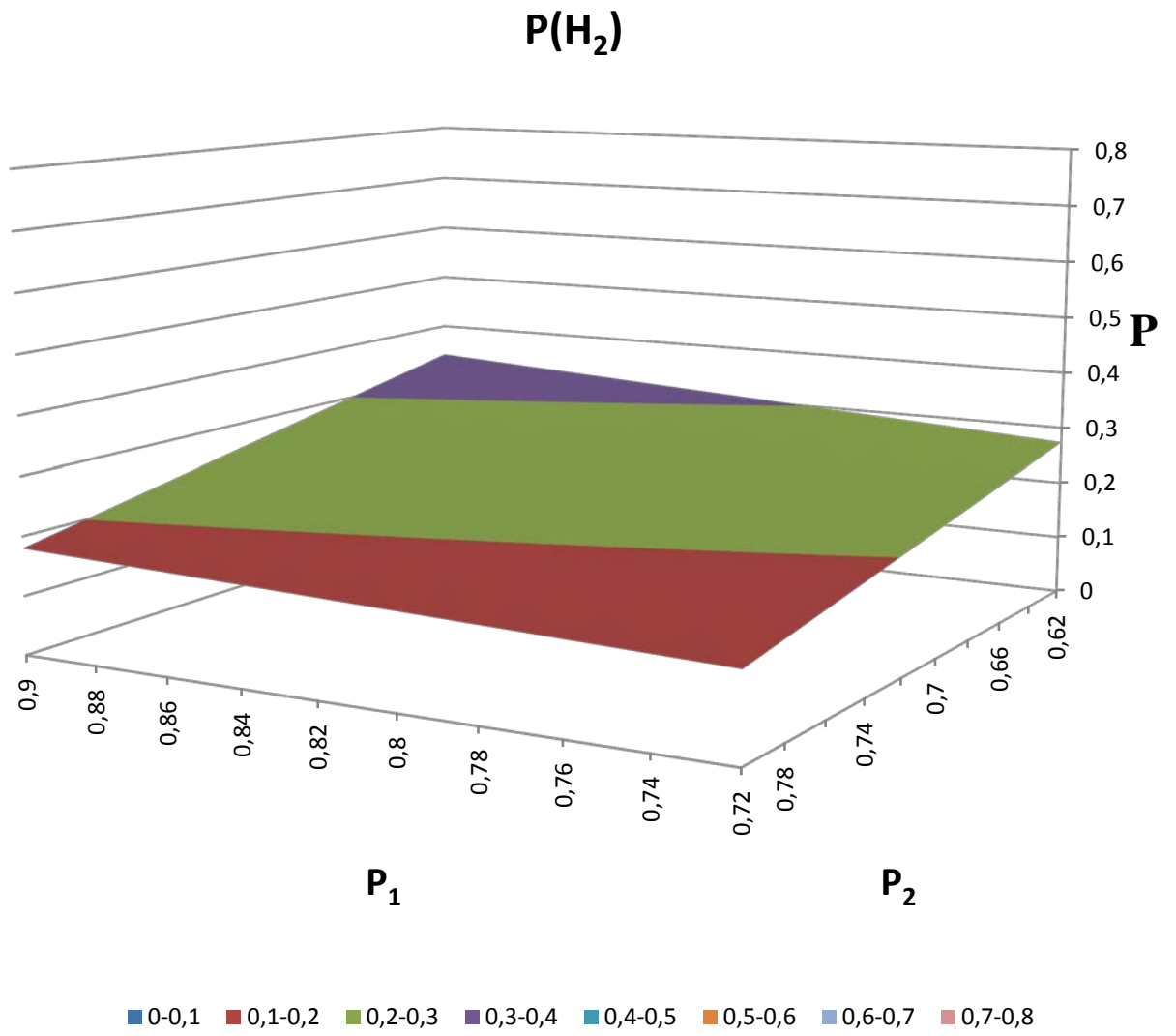


Рисунок 3.4 – Априорні ймовірності гіпотези H_2

$$P(H_2) = 0,9(1 - 0,62) = 0,342$$

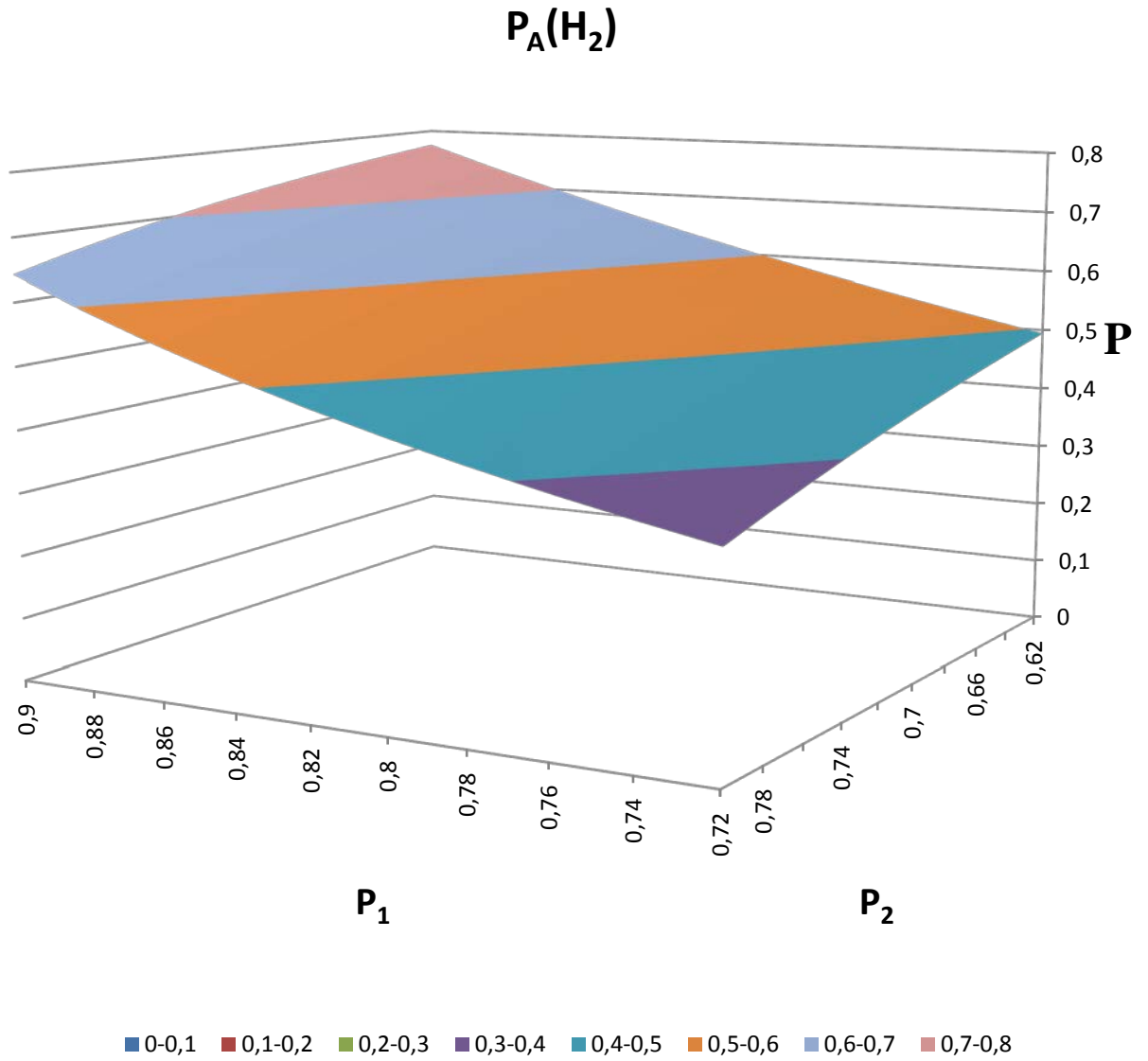


Рисунок 3.5 – Апостеріорні ймовірності гіпотези H_2

$$P_A(H_2) = \frac{0,9(1 - 0,62)}{1 - 0,9 \cdot 0,62} = 0,7738$$

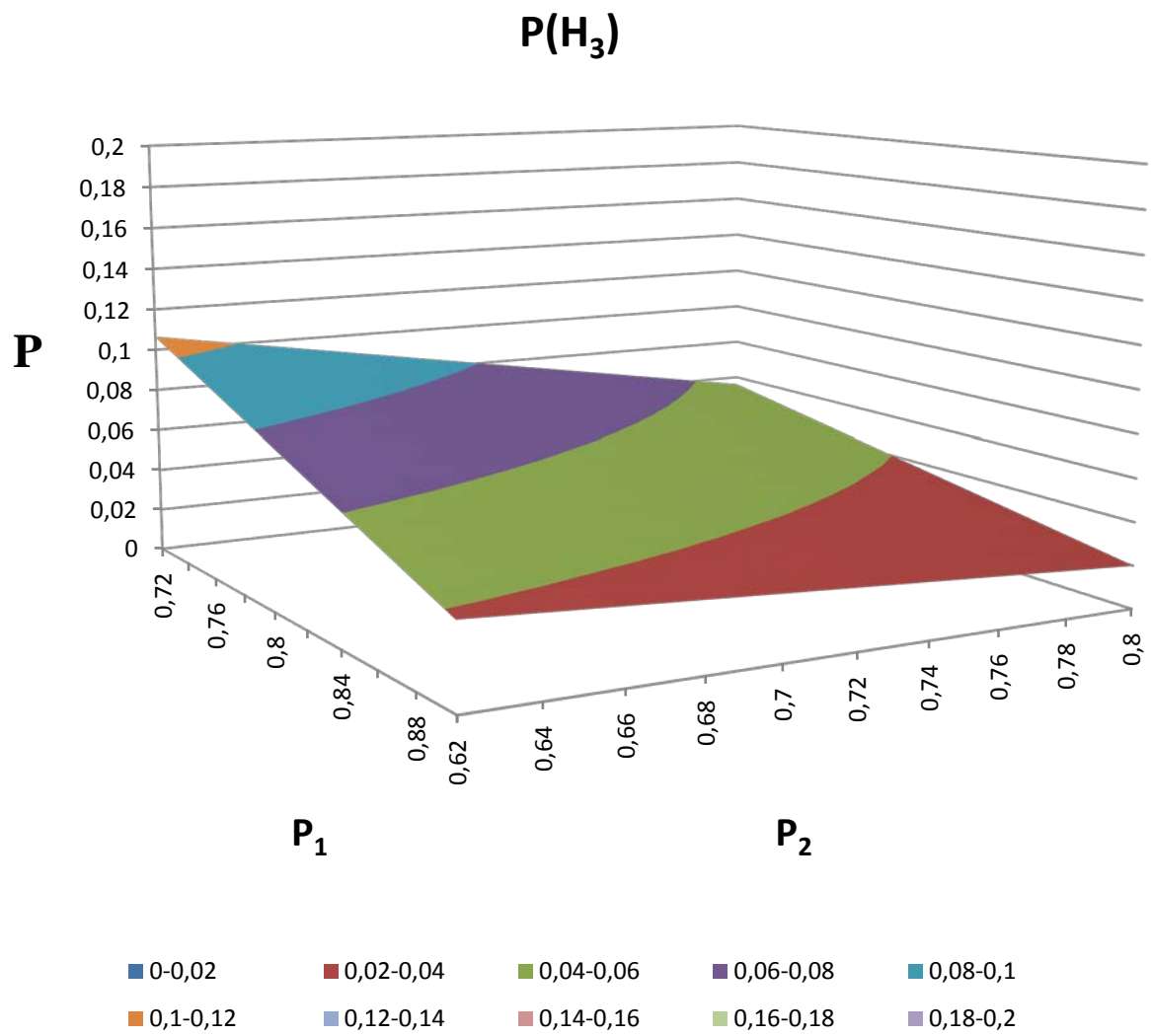


Рисунок 3.6 – Априорні ймовірності гіпотези H_3

$$P(H_3) = (1 - 0,72)(1 - 0,62) = 0,1064$$

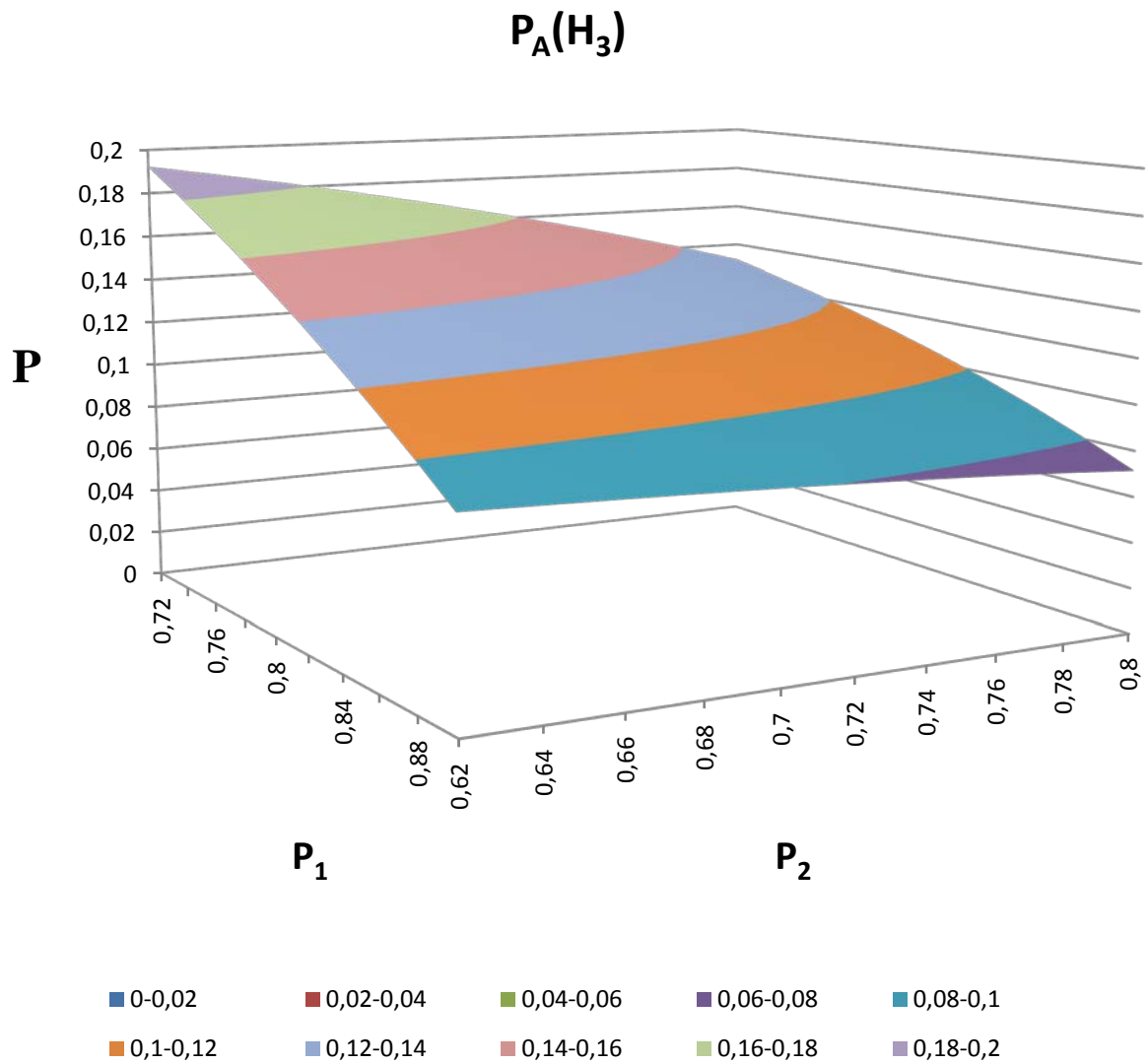


Рисунок 3.7 – Апостеріорні ймовірності гіпотези H_3

$$P_A(H_3) = \frac{(1 - 0,72)(1 - 0,62)}{1 - 0,72 \cdot 0,62} = 0,1922;$$

Отримані значення апостеріорних ймовірностей гіпотез важливі, оскільки їх можна використовувати для розрахунку ймовірностей майбутніх подій.

Так, якщо після експерименту, в результаті якого відбулася подія A , проводиться експеримент, в результаті якого відбувається або не відбувається подія B , то умовна ймовірність події B розраховується за формулою повної ймовірності, в якій початкові (апріорні) ймовірності

гіпотез $P(H_i)$, замінюються новими (апостеріорними) ймовірностями гіпотез $P_A(H_i)$:

$$P_A(B) = \sum_{i=1}^n P_A(H_i)P_{H_iA}(B) \quad (3.8)$$

Тому формулу (3.8) називають формулою ймовірностей майбутніх подій, яку можна використовувати для прогнозування ймовірності відмови навігаційного обладнання на основі наявної інформації про його надійність [75].

3.2. Визначення необхідності і ступеня дублювання для найбільш вразливих елементів навігаційних систем

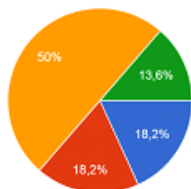
Метою даного розділу дослідження є визначення методу підвищення надійності систем навігаційного комплексу шляхом дублювання його елементів (вузлів, блоків, модулів) за різними схемами. Основні задачі: 1) оцінка і моделювання надійності при різних схемах дублювання елементів системи; 2) оцінка надійності системи, що складається з рівнонадійних складових елементів; 3) оцінка надійності системи, що складається з нерівнонадійних складових елементів.

З метою визначення рівня надійності навігаційного обладнання методом експертної оцінки було проведено анкетування 22 капітанів та старших помічників капітана зі стажем роботи від 5 до 8 років. На основі отриманих відповідей було створено діаграми, які ілюструють частоту збоїв кожного компонента навігаційної системи судна (рис. 3.8) та доцільність дублювання для кожного компонента системи (рис. 3.9).

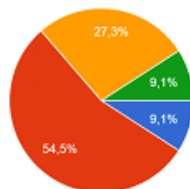
1) Вкажіть, будь ласка, як часто кожний компонент навігаційного обладнання морського судна виходить із ладу, базуючись на Вашому досвіді? (один випадок на скільки років) / Please indicate how often each component of a marine vessel's navigation equipment fails based on your experience? (one case in how many years)

- Один раз на 1 рік
- Один раз на 2 роки
- Один раз на 5 років
- Один раз на 10 років

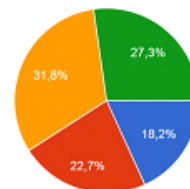
Гірокомпас (Gyro compass)
22 відповідей



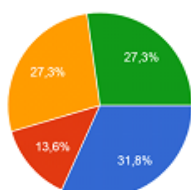
Радар (Radar)
22 відповідей



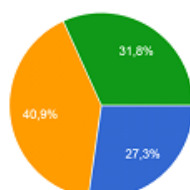
Магнітний компас (Magnetic compass)
22 відповідей



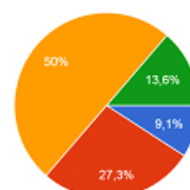
Авторульовий (Autopilot)
22 відповідей



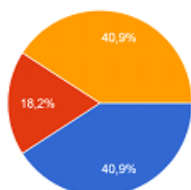
Лар (Speed and Distance Log Device)
22 відповідей



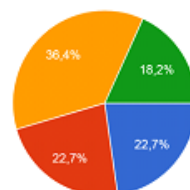
Ехолот (Echo sounder)
22 відповідей



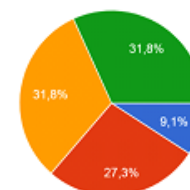
Електронні карти (ECDIS)
22 відповідей



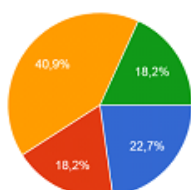
GPS приймач (GPS receiver)
22 відповідей



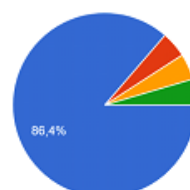
Автоматична ідентифікаційна система (AIS)
22 відповідей



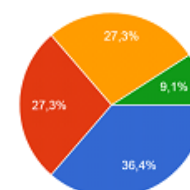
GMDSS обладнання (GMDSS equipment)
22 відповідей



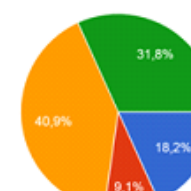
Навігаційні вогні (Navigation lights)
22 відповідей



Звуковий тифон (Ship whistle)
22 відповідей



Системи дальньої ідентифікації та контролю розташування суден (LRIT system)
22 відповідей



Реєстратор даних рейсу (Voyage Data Recorder, VDR)
22 відповідей

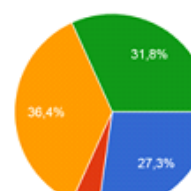


Рис. 3.8 – Результати опитування щодо вірогідності відмови

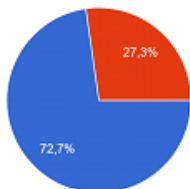
Таблиця 3.1 – Результати опитування щодо вірогідності відмови

	Гірокомпас	Радар	Магнітний компас	Авторульовий	Лар	Ехолот	ECDIS	GPS приймач	AIS	GMDSS обладнання	Система LRIT	VDR	Навігаційні вогні	Звуковий тифон
Один раз на 1 рік	4	2	4	7	6	2	9	5	2	5	4	6	19	8
Один раз на 2 роки	4	12	5	3	0	6	4	5	6	4	2	1	1	6
Один раз на 5 років	11	6	7	6	9	11	9	8	7	9	9	8	1	6
Один раз на 10 років	3	2	6	6	7	3	0	4	7	4	7	7	1	2

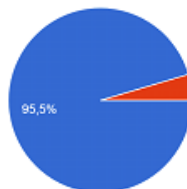
2) Вкажіть, будь ласка, чи доцільно було б дублювання кожного з компонентів навігаційного обладнання морського судна? (так або ні) / Please indicate whether it would be advisable to duplicate each of the components of the navigation equipment of a marine vessel? (yes or no)

● Так / Yes
● Ні / No

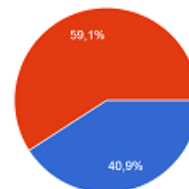
Гірокомпас (Gyro compass)
22 відповідей



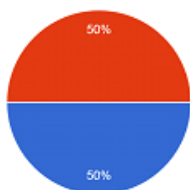
Радар (Radar)
22 відповідей



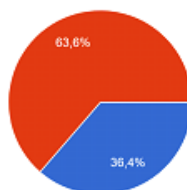
Магнітний компас (Magnetic compass)
22 відповідей



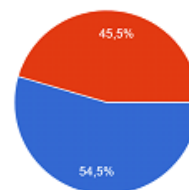
Авторульовий (Autopilot)
22 відповідей



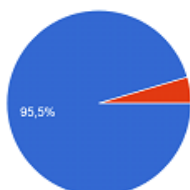
Лар (Speed and Distance Log Device)
22 відповідей



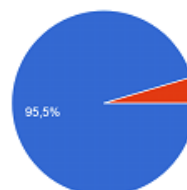
Ехолот (Echo sounder)
22 відповідей



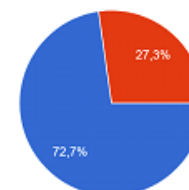
Електронні карти (ECDIS)
22 відповідей



GPS приймач (GPS receiver)
22 відповідей



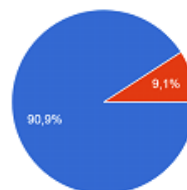
Автоматична ідентифікаційна система (AIS)
22 відповідей



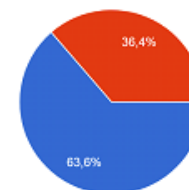
GMDSS обладнання (GMDSS equipment)
22 відповідей



Навігаційні вогні (Navigation lights)
22 відповідей



Звуковий тифон (Ship whistle)
22 відповідей



Системи дальньої ідентифікації та контролю розташування суден (LRIT system)
22 відповідей



Регістратор даних рейсу (Voyage Data Recorder, VDR)
22 відповідей



Рис. 3.9 – Результати опитування щодо доцільності дублювання

Таблиця 3.2 – Результати опитування щодо доцільності дублювання

	Гірокомпас	Радар	Магнітний компас	Авторульовий	Лар	Ехолот	ECDIS	GPS приймач	AIS	GMDSS обладнання	Система LRIT	VDR	Навігаційні вогні	Звуковий тифон
Один раз на 1 рік	4	2	4	7	6	2	9	5	2	5	4	6	19	8
Один раз на 2 роки	4	12	5	3	0	6	4	5	6	4	2	1	1	6
Один раз на 5 років	11	6	7	6	9	11	9	8	7	9	9	8	1	6
Один раз на 10 років	3	2	6	6	7	3	0	4	7	4	7	7	1	2

Як видно з наведених вище діаграм, деякі компоненти навігаційного обладнання недостатньо надійні і тому необхідно підвищити їх надійність.

Широко використовуваним підходом підвищення надійності обладнання є реалізація різного ступеня дублювання його елементів. Процедура дублювання особливо важлива в ситуаціях, коли первинна надійність елементів комплексу обладнання є недостатньою. Якщо відсутні принципові технологічні можливості підвищення якості, а отже, і надійності елементної бази обладнання, то прийоми дублювання є чи не єдиним підходом до підвищення загальної експлуатаційної надійності обладнання

системи. Методи теорії ймовірностей дозволяють теоретично оцінити надійність резервованих систем і проаналізувати ефективність різних підходів до дублювання їх компонентів. Розглянемо кілька існуючих проблем щодо надійності навігаційних систем, зосередивши увагу на надмірності їх окремих компонентів.

1. Оцінка та моделювання надійності різних методів дублювання компонентів системи.

Розглянемо комплекс (систему) навігаційного обладнання, що складається з n елементів, імовірність безвідмовної роботи якого позначена як p . Для забезпечення ефективної роботи обладнання важливо, щоб усі його складові частини працювали без збоїв. Для підвищення надійності обладнання проводиться дублювання системи, для чого призначається n додаткових компонентів.

Розглянемо два потенційні методи дублювання в цьому контексті:

а) дублювання кожного компонента

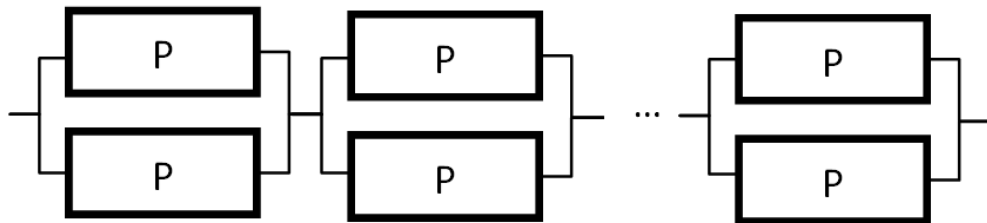


Рисунок 3.10 – Схема дублювання кожного компонента

б) дублювання системи в цілому

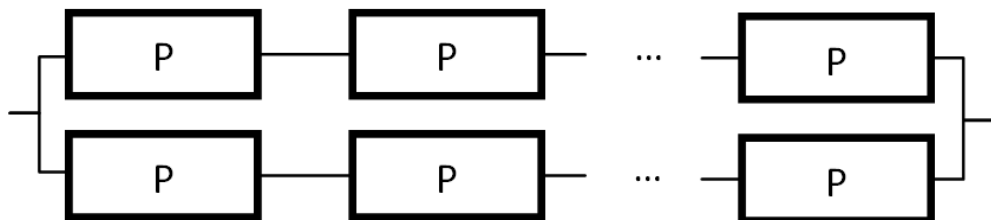


Рисунок 3.11 – Схема дублювання системи в цілому

Проведемо необхідні розрахунки та чисельне моделювання, щоб визначити, яка схема резервування забезпечує більшу експлуатаційну надійність.

Надійність P_a (що представляє ймовірність безвідмовної роботи), досягнута шляхом дублювання на основі схеми «а», виражається таким чином:

$$P_a = [1 - (1 - p)^2]^n \quad (3.9)$$

Відповідний вираз P_b для схеми «б» виражається таким чином:

$$P_b = 1 - (1 - p^n)^2 \quad (3.10)$$

Здійснюючи порівняння (3.9) і (3.10), покажемо, що $P_a > P_b$.

Переформулюємо вирази (3.9) і (3.10):

$$P_a = [1 - (1 - p)^2]^n = p^n (2 - p)^n \quad (3.11)$$

$$P_b = 1 - (1 - p^n)^2 = p^n (2 - p^n) \quad (3.12)$$

Доведемо нерівність:

$$(2 - p)^n > 2 - p^n \quad (3.13)$$

Зважаючи, що $q = 1 - p$, нерівність (3.13) буде мати наступний вигляд:

$$(2 - 1 + q)^n > 2 - (1 - q)^n, \text{ або} \quad (3.14)$$

$$(1 + q)^n + (1 - q)^n > 2 \quad (3.15)$$

Застосовуючи формулу бінома, отримаємо:

$$\begin{aligned} & (1 + q)^n + (1 - q)^n = \\ & = 1 + nq + \frac{n(n-1)}{2!}q^2 + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!}q^3 + \dots \\ & \dots + 1 - nq + \frac{n(n-1)}{2!}q^2 - \frac{n(n-1)(n-2)}{3!}q^3 + \dots = \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$= 2 + n(n-1)q^2 + 0\left(\frac{n(n-1)(n-2)(n-3)}{12}q^4\right) > 2$$

Таким чином, $(2-p)^n > 2-p^n$. Це свідчить про те, що схема «а» є кращою та більш надійною порівняно зі схемою «б»; іншими словами, дублювання кожного компонента системи забезпечує більшу надійність, ніж дублювання всієї системи.

Аналіз нерівності (3.16) показує, що переваги схеми «а» стануть більш вираженими, коли вихідна надійність компонентів недостатня, зокрема, коли значення ймовірності p значно менші за одиницю. І навпаки, коли p наближається до одиниці, розбіжність між схемами «а» і «б» зменшується, і надійність (ймовірність безвідмовної роботи) обох схем все більше наближається до одиниці.

Продемонструємо результати, отримані шляхом чисельного моделювання за допомогою рівнянь (3.11) і (3.12) для різних значень n і широкого діапазону варіацій значення p (від 0,7 до 0,99).

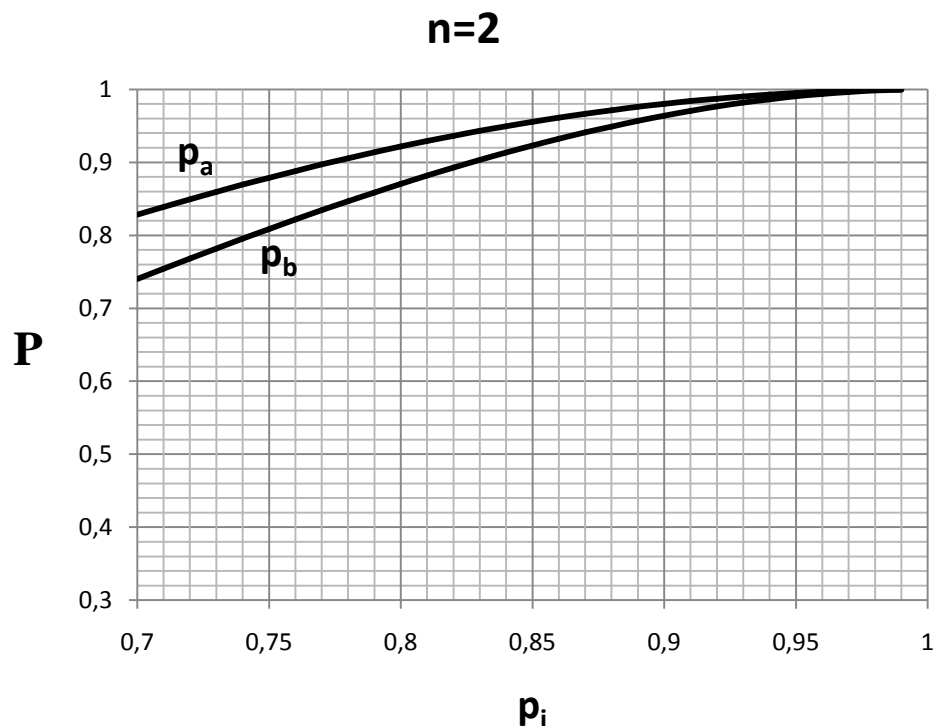
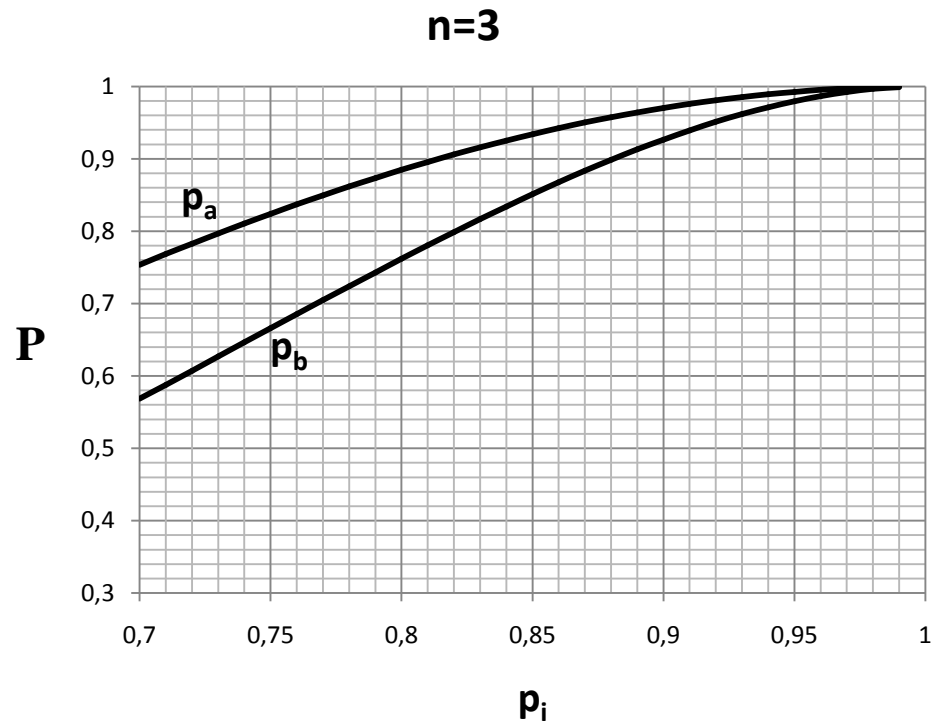
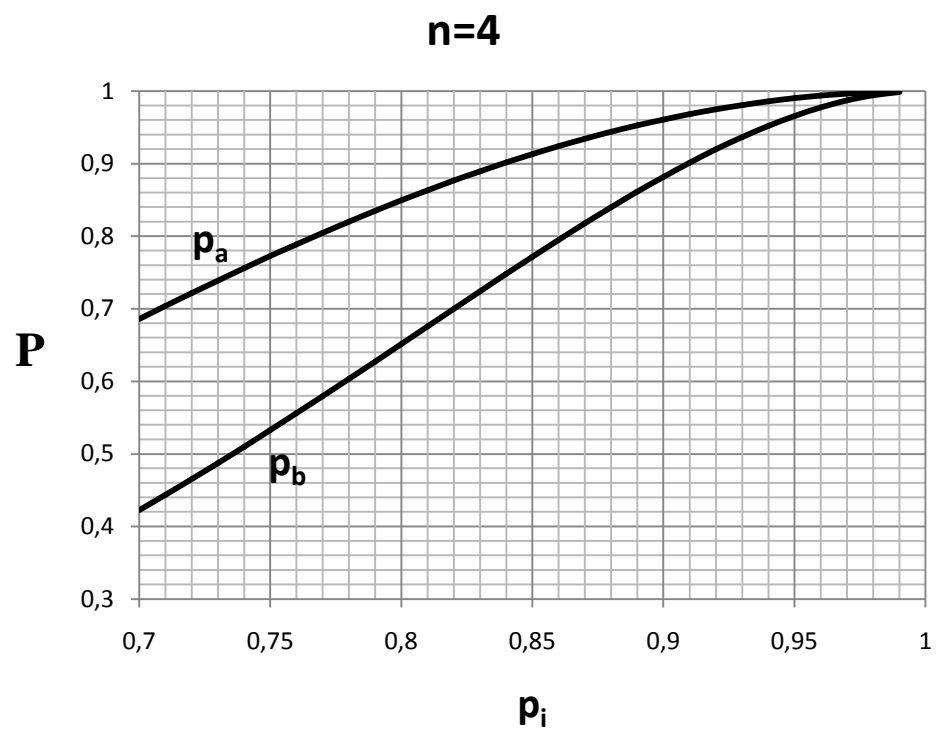


Рисунок 3.12 – Результати моделювання системи при $n=2$

Рисунок 3.13 – Результати моделювання системи при $n=3$ Рисунок 3.14 – Результати моделювання системи при $n=4$

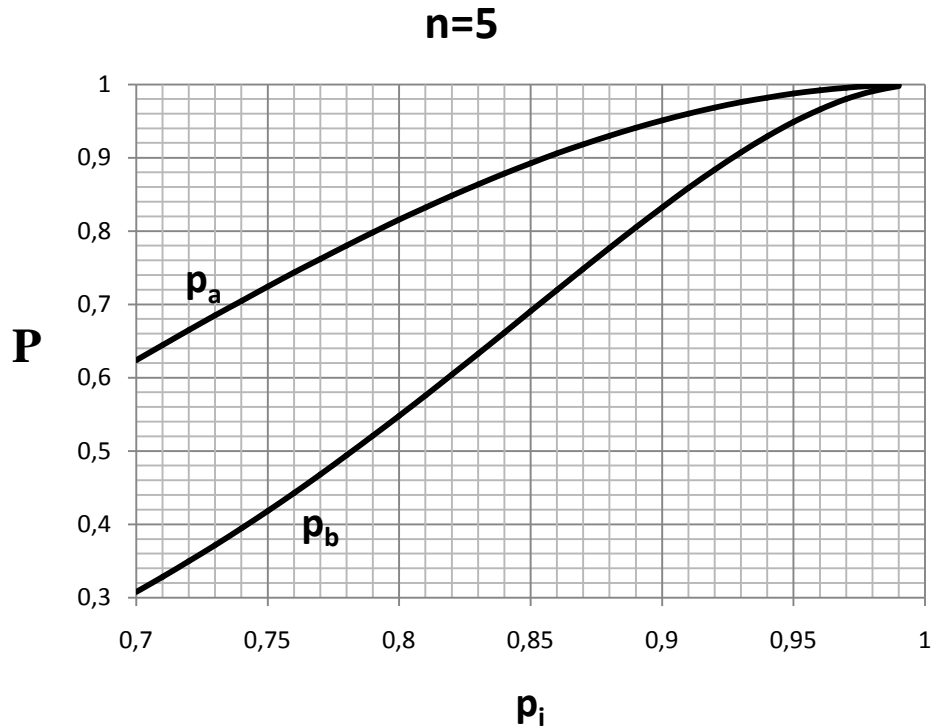


Рисунок 3.15 – Результати моделювання системи при $n=5$

На рис. 3.12–3.15 показано результати моделювання, які підтверджують висновки, отримані в результаті перевірки нерівності (3.16). Однак несподіваним і неочевидним результатом є те, що зі збільшенням n схема «б» забезпечує помітно нижчу надійність, ніж вихідна надійність елементів p , за умови, що останні не перевищують діапазон 0,85–0,9. Іншими словами, якщо значення p недостатньо високі, то дублювання за схемою «б» не тільки не підвищить надійність системи, але й погіршить її.

Криві надійності за схемою «б» на рис. 3.12–3.15 свідчать про наявність точок перегину. Загальновідомо, що їх знаходження вимагає обчислення другої похідної виразу (3.12) і дорівнювання її нулю.

$$P'_6 = 2np^{n-1}(1 - p^n) \quad (3.17)$$

$$P''_6 = 2n[(n-1)p^{n-2}(1 - p^n) - np^{2(n-1)}] \quad (3.18)$$

Дорівнюючи останній вираз нулю, маємо:

$$p^{2n}(2n-1) - (n-1)p^n = 0 \quad (3.19)$$

Таким чином:

$$p^n(2n-1) = n-1 \quad (3.20)$$

Тобто вираз для точки перегину має вигляд:

$$P = \left(\frac{n-1}{2n-1} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.21)$$

Таким чином: $n = 2$; $p = \sqrt{\frac{1}{3}} \approx 0,577$; $n = 3$; $p = \left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{1}{3}} \approx 0,737$;

$n = 4$; $p = \left(\frac{3}{7}\right)^{\frac{1}{4}} \approx 0,809$; $n = 5$; $p = \left(\frac{4}{9}\right)^{\frac{1}{5}} \approx 0,850$

Порівняння розрахованих координат точок перегину з кривими для P_6 на рис. 3.12–3.15 свідчить про точність розрахунку. Знання координат точки перегину для схеми «б» може виступати певним критерієм, за яким надійність цієї схеми поступово досягне одиниці.

Здається важливим розглянути дві задачі щодо надійності технічної системи з n компонентів, припускаючи, що її окремі компоненти однаково надійні, а також у випадку, якщо вони не є такими.

2. Оцінка надійності системи з однаково надійними компонентами.

Схема технічної системи, що складається з однаково надійних компонентів, де функціонування кожного є важливим для загальної роботи системи, показано на рис. 3.16:



Рисунок 3.16 – Система з однаково надійних компонентів

Якщо технічна система складається з n однаково надійних компонентів, де відмова будь-якого окремого компонента призводить до відмови всієї системи, тоді загальна надійність системи (ймовірність безвідмовної роботи) P :

$$P = p^n \quad (3.22)$$

звідки надійність p кожного компонента, щоб гарантувати загальну надійність P , повинна дорівнювати:

$$p = \sqrt[n]{P} \quad (3.23)$$

Можна визначити порогове значення для кількості елементів n з надійністю p , щоб гарантувати задану надійність системи P :

$$n = \text{int}\left[\frac{\ln P}{\ln p}\right] \quad (3.24)$$

де $\text{int}[x]$ - ціла частина x .

Продемонструємо вищезгадану залежність:

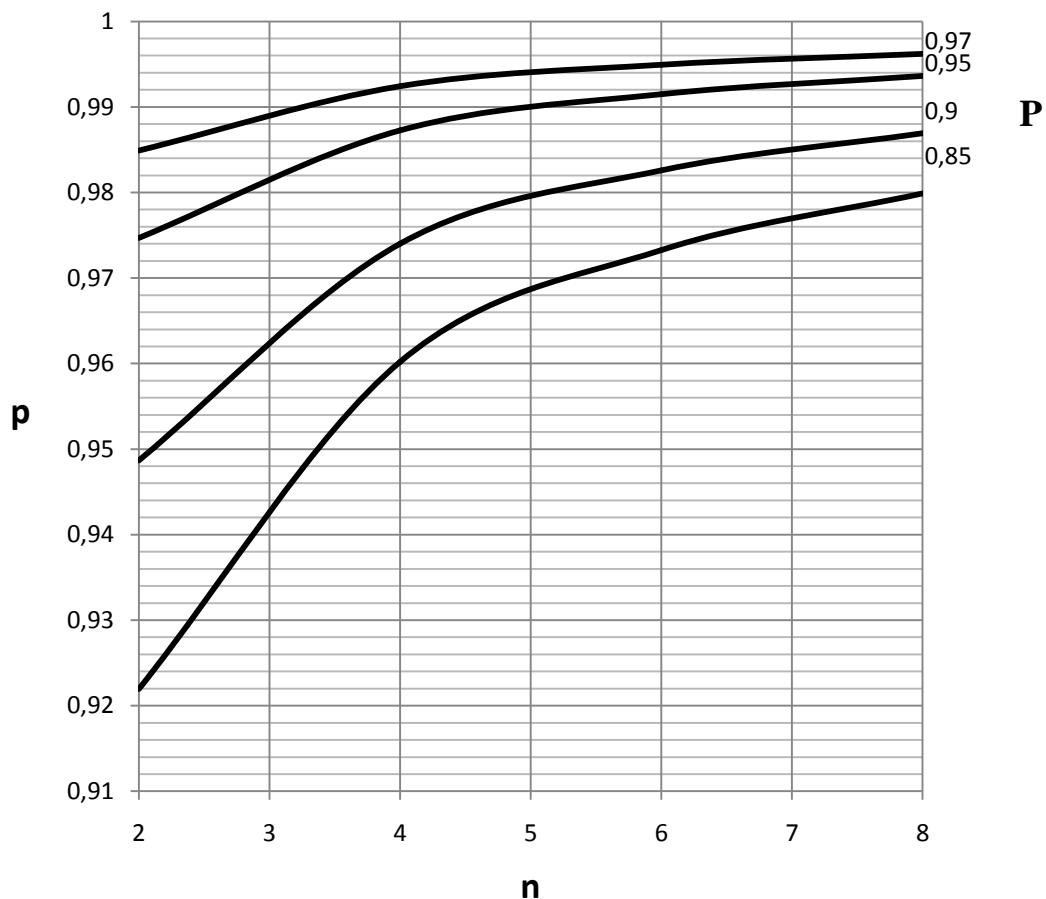


Рисунок 3.17 – Залежність (3.23) необхідної надійності компонентів p на основі загальної (заданої) надійності системи P і кількості компонентів n в ній

Очевидно, що зі збільшенням надійності системи P і кількості компонентів n в ній зростає вимога до надійності складових компонентів системи p .

3. Оцінка надійності системи з неоднаково надійними компонентами.

Якщо система складається з неоднаково надійних компонентів (що зазвичай трапляється на практиці), оцінити ймовірність того, що кожен компонент функціонуватиме без збоїв, досить складно, і вони часто замінюються приблизним середнім значенням:

$$\bar{p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \quad (3.25)$$

Оцінимо достовірність такої заміни і як будуть змінюватися ймовірності на безвідмовну роботу системи, розраховані з використанням фактичних значень p_i і їх середнього значення.

Якби були відомі ймовірності p_i кожного компонента, що працює без збоїв, тоді, припускаючи, що збої кожного компонента є незалежними, точна ймовірність того, що вся система функціонує без збоїв, була б:

$$P = \prod_{i=1}^n p_i \quad (3.26)$$

Розрахункове значення \bar{P} , отримане із середньої ймовірності \bar{p} , матиме вигляд:

$$\bar{P} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \right)^n \quad (3.27)$$

Таким чином, потрібно порівняти величини (3.26) та (3.27).

Зрозуміло, що середнє геометричне різних додатних значень нижче їх середнього арифметичного:

$$\sqrt[n]{\prod_{i=1}^n p_i} < \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \quad (3.28)$$

звідки випливає, що:

$$\prod_{i=1}^n p_i < \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \right]^n \quad (3.29)$$

Тобто $P < \bar{P}$. Це вказує на те, що оцінка ймовірності безвідмовної роботи системи \bar{P} , отримана із середніх значень для p_i , буде постійно дещо завищена порівняно з фактичною ймовірністю.

Виходячи з попередніх міркувань, виявляється, що на це розрізнення має впливати дисперсія набору значень p_i .

Проведемо чисельні експерименти з наступним масивом як зразком:

p_i : 0,55; 0,6; 0,65; 0,7; **0,75**; 0,8; 0,85; 0,9; 0,95.

Будемо систематично аналізувати групи з 3, 5, 7 і 9 компонентів разом із їх середнім значенням $\bar{p} = \mathbf{0,75}$.

Дисперсії обчислимо за відомими формулами:

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2 \quad (3.30)$$

Відповідно середньоквадратичне відхилення (стандартна помилка):

$$s = \sqrt{s^2} \quad (3.31)$$

Також обчислимо коефіцієнт варіації γ як міру відносної похибки та відносну похибку δ між значеннями \bar{P} і P :

$$\gamma = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (3.32)$$

$$\delta = \frac{\bar{P} - P}{P} \cdot 100\% \quad (3.33)$$

Отримані результати відображені в таблиці 3.3.

Наведемо приклад визначення першого рядка таблиці при $n = 3$: 0,7; **0,75**; 0,8.

$$P = 0,7 \cdot 0,75 \cdot 0,8 = 0,42; \quad \bar{P} = 0,75^3 = 0,422$$

$$s^2 = \frac{1}{3}(0,49 + 0,5625 + 0,64) - 0,5625 = 0,00167$$

$$s = 0,041; \gamma = \frac{0,041}{0,75} \cdot 100\% = 5,47\%$$

$$\delta = \frac{0,422 - 0,42}{0,42} \cdot 100\% = 0,48\%$$

Таблиця 3.3 – Значення P, \bar{P} та помилок s, γ і δ для наборів з 3, 5, 7 і 9 компонентів

n	P	\bar{P}	s	$\gamma, \%$	$\delta, \%$
3	0,42	0,422	0,041	5,47	0,48
5	0,232	0,237	0,071	9,47	2,16
7	0,1253	0,1335	0,1	13,3	6,54
9	0,0655	0,0751	0,1292	17,23	14,7

Очевидно, що зі збільшенням дисперсії значень p_i відносна похибка δ значно зростає, причому значення перевищують 10%, що ставить під сумнів доцільність заміни масиву p_i їх середнім значенням.

4. Приклад схеми дублювання для системи, що складається з неоднаково надійних компонентів.

Якщо система складається з неоднаково надійних компонентів, важливо вирішити проблему дублювання компонентів із недостатньою надійністю, оскільки вони впливають на загальну надійність системи. Ефективність дублювання найменш надійних компонентів системи можна продемонструвати в наступному прикладі.

Розглянемо технічну систему, що складається з п'яти компонентів, їх надійність (імовірність безвідмовного функціонування) наступна: $p_1 = 0,85; p_2 = 0,75; p_3 = p_4 = 0,95; p_5 = 0,75$. Очевидно, що 1-й, 2-й і 5-й компоненти потребують дублювання через недостатню надійність, а для 2-го і 5-го компонентів необхідно застосувати трикратне дублювання (рис. 3.18).

При відсутності дублювання надійність системи становить:

$$\bar{P} = [1 - (1 - p_1)] \cdot [1 - (1 - p_2)] \cdot [1 - (1 - p_3)] \cdot [1 - (1 - p_4)] \cdot [1 - (1 - p_5)] = 0,85 \cdot 0,75 \cdot 0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,75 = 0,418$$

Якщо визначити надійність за середнім значенням $\bar{p} = 0,85$, то вона буде, як і передбачалося, трохи завищена:

$$\bar{P} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i\right)^n = 0,85^5 = 0,444$$

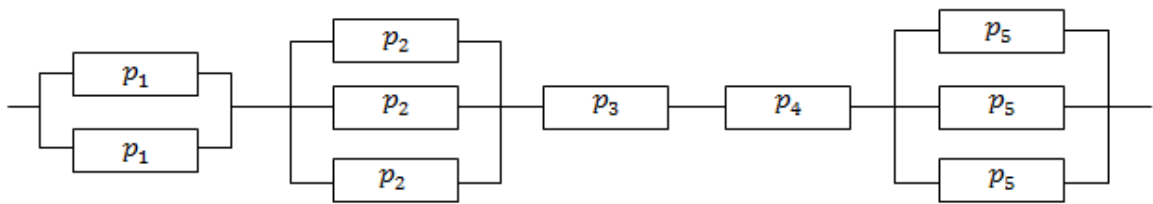


Рисунок 3.18 – Схема продубльованої системи

Надійність продубльованої системи (рис. 3.18) становить:

$$P = [1 - (1 - p_1)^2] \cdot [1 - (1 - p_2)^3] \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot [1 - (1 - p_5)^3] = 0,9775 \cdot 0,984 \cdot 0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,984 = 0,854$$

Очевидно, що надійність системи з відповідним чином продубльованими компонентами зростає більш ніж вдвічі і перевищує 85% [76].

Висновки до III розділу

1. Продемонстровано ефективність байєсівського підходу в оцінці надійності навігаційного комплексу. Такий підхід дозволяє досліджувати причинно-наслідкові зв'язки, поглибити розуміння проблемної області та прогнозувати ймовірність відмови навігаційного обладнання при виході з ладу його компонентів. Очевидно, що апостеріорні ймовірності гіпотез значно перевищують апріорні, і це перевищення тим більше, чим ближче до одиниці добуток ймовірностей безвідмовної роботи вузлів. Як показано на

рис. 3.2-3.7, отримані результати відображають низку закономірностей: ймовірності того, що перший вузол вийшов з ладу, а другий працює, зменшуються зі збільшенням надійності першого пристрою та зростають із збільшенням надійності другого; і навпаки, ймовірності того, що другий вузол вийшов з ладу, а перший працює, зменшуються зі збільшенням надійності другого пристрою і зростають зі збільшенням надійності першого; у свою чергу, ймовірність того, що обидва вузли відмовили, зменшується як зі збільшенням надійності першого пристрою, так і зі збільшенням надійності другого, що видно за результатами розрахунків. Байєсівський підхід дуже ефективний в оцінці надійності навігаційного комплексу завдяки його здатності справлятися з невизначеністю, включати попередні знання та оновлювати оцінки надійності, коли нова інформація стає доступною.

2. Оцінено ефективність різних методів дублювання компонентів навігаційної системи та проведено їх математичне моделювання. Отримані результати дозволили зробити кілька висновків щодо ймовірності безвідмовної роботи системи при застосуванні певної схеми дублювання. Якщо система складається з компонентів однакової надійності, то дублювання кожного компонента є більш ефективним методом підвищення надійності, ніж дублювання всієї системи. Крім того, якщо початкове значення надійності компонентів становить 0,85 або нижче, то дублювання всієї системи разом з кожним новим дублюючим компонентом значно знизить надійність системи. Підвищення надійності системи шляхом дублювання кожного компонента з недостатньою початковою надійністю буде більш ефективним, якщо ці компоненти мають значення надійності нижче 0,85. Якщо система складається з неоднаково надійних компонентів, тоді, коли оцінка ймовірності безвідмовної роботи для кожного компонента окремо є неможливою, заміна їхніх значень середнім значенням стає сумнівною (зокрема, коли існує велика варіація значень). Це можна пояснити високою дисперсією ймовірностей безвідмовної роботи компонентів системи, що призводить до значного зростання відносної похибки, яка може

перевищувати 10%. Дублювання найменш надійних компонентів системи з неоднаково надійними компонентами може підвищити загальну надійність системи більш ніж у два рази, за умови, що це виконується з урахуванням ймовірності безвідмовної роботи кожного компонента.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ НАВІГАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ ЯК СИСТЕМИ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ (СМО)

4.1. Математичне моделювання навігаційного комплексу на основі теорії СМО

Теоретичні основи математичного моделювання навігаційного комплексу на основі теорії систем масового обслуговування (СМО) значною мірою спираються на декілька математичних дисциплін, включаючи теорію масового обслуговування, стохастичні процеси, оптимізацію та теорію систем [77]. Нижче наведено дослідження цих теоретичних основ:

1. Теорія масового обслуговування.

Основна концепція: теорія масового обслуговування — це математичне дослідження черг очікування. Вона моделює системи, в яких об'єкти (наприклад, судна) прибувають, чекають обслуговування, а потім обслуговуються деякими ресурсами (наприклад, засобами навігації, системами керування).

Ключові елементи:

Процес надходження: описує, як об'єкти надходять до системи, часто моделюється як процес Пуассона, який передбачає, що надходження є незалежними та рівномірно розподіленими в часі.

2. Показники продуктивності.

Пропускна здатність: швидкість, з якою об'єкти обслуговуються системою.

Середній час очікування: середній час, який суб'єкт проводить в очікуванні в черзі, перш ніж отримати обслуговування.

Використання системи: частка часу, протягом якого ресурси (наприклад, засоби навігації) активно задіяні в обслуговуванні об'єктів.

Розподіл довжини черги: розподіл ймовірностей кількості об'єктів у черзі, що допомагає зрозуміти перевантаження системи.

3. Теоретичні завдання.

Масштабованість: забезпечення того, що модель може працювати з великими складними системами з багатьма об'єктами та ресурсами.

Складні взаємозалежності: Навігаційні комплекси часто включають взаємозалежні підсистеми, що ускладнює моделювання.

Обмеження реального часу: моделі часто повинні працювати в реальному часі, вимагаючи ефективних алгоритмів, які можуть швидко надавати рішення.

Нестационарна поведінка: поведінка багатьох навігаційних систем змінюється в часі, що вимагає моделей, здатних адаптуватися до мінливих умов.

4. Застосування.

Контроль морського руху: оптимізація руху суден у перевантажених водних шляхах і портах.

Мережі автономних транспортних засобів: керування флотом автономних суден, забезпечення плавного руху суден та мінімізація затримок.

Теоретичні основи математичного моделювання навігаційного комплексу як системи масового обслуговування поєднують теорію масового обслуговування, стохастичні процеси, теорію систем та оптимізацію. Ці моделі спрямовані на оптимізацію роботи складних великомасштабних навігаційних систем, гарантуючи, що вони можуть обробляти великі обсяги трафіку, зберігаючи ефективність, безпеку та надійність [78].

4.2. Визначення числових характеристик для систем навігаційного комплексу судна як систем СМО (інтенсивності потоків заявок, обслуговування, тощо)

Визначення числових характеристик суднового навігаційного комплексу як системи масового обслуговування (СМО) передбачає аналіз

таких ключових показників, як інтенсивність потоків прибуття (потоків заявок), інтенсивність обслуговування та інші показники ефективності [79]. Ці характеристики необхідні для оптимізації роботи та ефективності навігаційного комплексу.

1. Інтенсивність потоку прибуття (λ) [80].

Визначення: інтенсивність потоку прибуття, позначена λ , представляє середню швидкість, з якою навігаційні запити прибувають до системи для обслуговування. Зазвичай це вимірюється в кількості запитів на одиницю часу (наприклад, запитів на годину).

Розрахунок:

Якщо потік запитів відповідає процесу Пуассона, λ — це очікувана кількість запитів за певний період часу.

$$\lambda = \frac{N}{T},$$

де N - загальна кількість запитів, що спостерігаються за період T .

Приклад: якщо, наприклад, 120 запитів прибувають до системи протягом 24 годин, інтенсивність прибуття становить:

$$\lambda = \frac{120}{24} = 5 \text{ запитів на годину.}$$

2. Інтенсивність обслуговування (μ) [81].

Визначення: інтенсивність обслуговування, позначена μ , є середньою швидкістю, з якою судна обслуговуються системою. Вимірюється як кількість суден, обслужених за одиницю часу.

Розрахунок:

Якщо час обслуговування має експоненціальний розподіл, μ є величиною, зворотною середньому часу обслуговування $E[S]$.

$$\mu = \frac{1}{E[S]},$$

де $E[S]$ — очікуваний час обслуговування.

Якщо середній час проходження запиту через систему становить 2 години, то інтенсивність обслуговування $\mu = \frac{1}{2} = 0,5$ запитів на годину.

3. Інтенсивність руху (ρ) [82].

Визначення: інтенсивність потоку, позначена ρ , є відношенням інтенсивності прибуття запитів до інтенсивності обслуговування, що представляє навантаження на систему.

Розрахунок:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$$

Для стабільної системи потрібне $\rho < 1$, тобто система може обробляти швидкість надходження без утворення нескінченної черги.

Приклад: при $\lambda=5$ запитів/годину та $\mu=6$ запитів/годину, $\rho = \frac{5}{6} \approx 0,83$.

Це свідчить про помірну навантаженість системи.

4. Довжина черги (Lq) [83].

Визначення: середня кількість запитів, які очікують у черзі на обслуговування.

Розрахунок:

Для системи М/М/1 (один сервер):

$$Lq = \frac{\rho^2}{1 - \rho}$$

Для системи М/М/с (кілька серверів) розрахунок є більш складним і включає формулу Erlang В або С.

Приклад: для односерверної системи при $\rho=0,83$:

$$Lq = \frac{0,83^2}{1-0,83} = \frac{0,6889}{0,17} \approx 4,05 \text{ запитів.}$$

5. Середній час очікування в черзі (Wq) [84].

Визначення: середній час, який запит витрачає на очікування в черзі перед обслуговуванням.

Розрахунок:

$$Wq = \frac{Lq}{\lambda}$$

Для системи М/М/1:

$$W_q = \frac{\rho}{\mu(1 - \rho)}$$

Приклад: при $L_q=4,05$ запитів і $\lambda=5$ запитів/годину, $W_q = \frac{4,05}{5} \approx 0,81$ години (або приблизно 49 хвилин).

6. Середня кількість запитів у системі (L).

Визначення: середня кількість запитів у системі, включаючи як ті, що очікують у черзі, так і ті, що обслуговуються.

Розрахунок:

$$L = L_q + \frac{\lambda}{\mu}$$

Для системи M/M/1:

$$L = \frac{\rho}{1 - \rho}$$

Приклад: при $L_q=4,05$ і $\lambda=5$, $L = 4,05 + \frac{5}{6} = 4,05 + 0,83 = 4,88$ запитів.

7. Середній час у системі (W).

Визначення: середній час, який запит проводить у системі, включаючи час очікування та обслуговування.

Розрахунок:

$$W = W_q + \frac{1}{\mu}$$

Для системи M/M/1:

$$W = \frac{1}{\mu(1 - \rho)}$$

Приклад: при $W_q=0,81$ години та $\mu=0,5$ запитів/год, $W = 0,81 + 2 = 2,81$ годин.

8. Використання системи (U) [85].

Визначення: частка часу, протягом якого службові ресурси системи зайняті.

Розрахунок:

$U = \rho$ для односерверної системи.

Для багатосерверних систем:

$$U = \frac{\lambda}{c \cdot \mu},$$

де c — кількість серверів.

Приклад: при $\lambda=5$ запитів/годину та $\mu=6$ запитів/годину, і припускаючи систему з одним сервером, $U = 0.83$ або 83%.

9. Ймовірність n суден у системі (P_n).

Визначення: ймовірність того, що саме n запитів є в системі.

Розрахунок:

Для системи M/M/1:

$$P_n = (1 - \rho)\rho^n$$

Приклад: ймовірність того, що в системі рівно 3 запити, коли $\rho = 0,83$ є $P_3 = (1 - 0,83) \times 0,83^3 = 0,17 \times 0,573 = 0,097$, або 9,7%.

Визначення числових характеристик навігаційного комплексу судна передбачає розрахунок ключових показників, таких як інтенсивність прибуття, інтенсивність обслуговування, інтенсивність руху та показники продуктивності системи. Ці показники життєво важливі для забезпечення ефективної роботи навігаційного комплексу, мінімізації затримок і оптимізації розподілу ресурсів. Теорія масового обслуговування та пов'язані з нею математичні моделі забезпечують основу для цих розрахунків, дозволяючи детально аналізувати та оптимізувати навігаційні системи [86].

4.3. Визначення відповідних характеристик ефективності СМО (абсолютна і відносна пропускна здатність, ймовірність відмови, довжина черги, час обслуговування, тощо)

Визначення відповідних характеристик ефективності системи масового обслуговування (СМО) передбачає оцінку різних показників ефективності. Ці показники допомагають оцінити, наскільки добре система керує вхідними

запитами і наскільки ефективно вона використовує ресурси [87]. Ось детальне пояснення цих характеристик:

1. Абсолютна пропускна здатність (A) [88].

Визначення: абсолютна пропускна здатність — це загальна кількість об'єктів (наприклад, навігаційних запитів), які система може обслуговувати за певний період часу.

Розрахунок:

$A = \lambda$, де λ — швидкість надходження, припускаючи, що система може обробляти всі прибулі об'єкти.

У випадках, коли система використовується не повністю,

$$A = \lambda(1 - P_{\text{fail}}),$$

де P_{fail} є ймовірністю відмови.

Приклад: якщо 100 запитів прибувають на день і система може обслуговувати їх усі, абсолютна пропускна здатність $A = 100$ запитів/день.

2. Відносна пропускна здатність (Q).

Визначення: відносна пропускна здатність – це відношення кількості фактично обслугованих об'єктів до кількості прибулих об'єктів.

Розрахунок:

$$Q = \frac{\text{Кількість обслуговуваних об'єктів}}{\text{Кількість прибулих об'єктів}}$$

$Q = 1 - P_{\text{fail}}$, де P_{fail} — ймовірність відмови.

Приклад: якщо прибуває, наприклад, 100 запитів, але обслуговується лише 95 (5 відхилено або затримано), відносна пропускна здатність

$$Q = \frac{95}{100} = 0,95$$

3. Ймовірність відмови (P_{fail}) [89].

Визначення: ймовірність відмови – це ймовірність того, що прибулий об'єкт не буде обслуговуватися негайно (наприклад, через те, що система повністю зайнята або перевантажена).

Розрахунок:

Для черги M/M/1 P_{fail} можна інтерпретувати як $P_{\text{queue} \geq N}$, де N — це потужність системи.

Для черги M/M/c P_{fail} зазвичай визначається за допомогою формули Erlang B для систем із втратами або формули Erlang C для систем із чергами.

Приклад: у системі з одним сервером із $\rho = 0,8$ ймовірність відмови або заповнення системи може бути $P_{\text{fail}}=0,2$.

4. Середня довжина черги (L_q).

Визначення: середня кількість об'єктів, які очікують у черзі на обслуговування.

Розрахунок для системи M/M/1:

$$L_q = \frac{\rho^2}{1 - \rho}$$

Для системи M/M/c (кілька серверів) L_q визначається за формулою Erlang C.

Приклад: якщо $\rho=0,8$ у системі M/M/1,

$$L_q = \frac{0,8^2}{1-0,8} = \frac{0,64}{0,2} = 3,2 \text{ об'єктів в середньому.}$$

5. Середній час обслуговування ($E[S]$).

Визначення: середній час, необхідний для обслуговування запиту, від часу початку обслуговування до його завершення.

Розрахунок:

$$E[S] = \frac{1}{\mu},$$

де μ — швидкість обслуговування.

Приклад: Якщо швидкість обслуговування μ становить 5 запитів на годину, тоді

$$E[S] = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ години, або 12 хвилин.}$$

6. Середній час очікування в черзі (W_q).

Визначення: середній час, який об'єкт проводить в очікуванні в черзі до початку обслуговування.

Розрахунок:

$$Wq = \frac{\rho}{\mu(1 - \rho)}$$

Для системи М/М/1:

$$Wq = \frac{Lq}{\lambda},$$

де Lq – середня довжина черги, а λ – швидкість надходження.

Приклад: Якщо $\rho = 0,8$ і $\mu = 5$ запитів/годину,

$$Wq = \frac{0,8}{5(1-0,8)} = \frac{0,8}{1} = 0,16 \text{ годин (або 9,6 хвилин)}.$$

7. Середня кількість запитів у системі (L).

Визначення: загальна середня кількість запитів у системі, включно з обслуговуваними та чекаючими в черзі.

Розрахунок:

$$L = Lq + \frac{\lambda}{\mu}$$

Для системи М/М/1:

$$L = \frac{\rho}{1 - \rho}$$

Приклад: при $Lq = 3,2$ і $\lambda = 4$ запитів/годину, $L = 3,2 + \frac{4}{5} = 3,2 + 0,8 = 4$ запитів.

8. Середній час у системі (W).

Визначення: середній час, який запит проводить у системі, включаючи час очікування в черзі та час обслуговування.

Розрахунок:

$$W = Wq + \frac{1}{\mu}$$

Для системи М/М/1:

$$W = \frac{1}{\mu(1 - \rho)}$$

Приклад: при $Wq = 0,16$ години та $\mu=5$ запитів/годину, $W = 0,16 + 0,2 = 0,36$ години (або 21,6 хвилин).

9. Використання системи (ρ).

Визначення: частка часу, протягом якого система зайнята, або відношення швидкості надходження до швидкості обслуговування.

Розрахунок для системи М/М/1:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$$

Для системи М/М/с:

$$\rho = \frac{\lambda}{c \cdot \mu},$$

де с – кількість серверів.

Приклад: якщо $\lambda = 4$ запитів/годину та $\mu = 5$ запитів/годину в системі з одним сервером $\rho = \frac{4}{5} = 0,8$, тобто система зайнята 80% часу.

10. Імовірність n запитів у системі (P_n).

Визначення: ймовірність того, що в системі в будь-який момент часу є рівно n об'єктів.

Розрахунок для системи М/М/1:

$$P_n = (1 - \rho) \rho^n$$

Для системи М/М/с, P_n розраховується за більш складними формулами в залежності від кількості серверів і конкретного стану.

Приклад: для $\rho = 0,8$ у системі М/М/1, ймовірність того, що в системі рівно 3 запити, становить $P_3 = (1 - 0,8) \times 0,8^3 = 0,2 \times 0,512 = 0,1024$, або 10,24%.

Ці показники забезпечують повне розуміння ефективності системи масового обслуговування. Розраховуючи ці характеристики, розробники та оператори системи можуть оптимізувати продуктивність навігаційного комплексу, забезпечуючи ефективне використання ресурсів, мінімізований час очікування та здатність системи обробляти вхідний трафік без надмірних затримок або збоїв [90-111].

Висновки до IV розділу

1. Обґрунтовано теоретичні основи математичного моделювання навігаційного комплексу на основі теорії СМО. Концепція навігаційного комплексу як системи масового обслуговування передбачає аналіз та оптимізацію роботи навігаційної системи морського судна, надійність функціонування якої є критично важливою для безпеки судноплавства.

2. Визначено числові характеристики для систем навігаційного комплексу судна як систем СМО (інтенсивності потоків заявок, обслуговування, тощо) та відповідні характеристики ефективності СМО (абсолютна і відносна пропускна здатність, імовірність відмови, довжина черги, час обслуговування, тощо). Наведено детальне пояснення цих характеристик та приклади числових розрахунків відповідних параметрів.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-технічна задача – підвищення функціональної стійкості навігаційного комплексу морських суден методами теорії масового обслуговування, дублювання та байєсівського підходу. Вирішення науково-технічної задачі полягає у розробці відповідних рекомендацій щодо регламенту підвищення функціональної стійкості навігаційного комплексу.

У роботі отримані наступні теоретичні та практичні результати:

1. Розроблено модель стійкості навігаційної системи, яка дає можливість моделювати різні аварійні ситуації. Моделювання виявило кореляцію між продуктивністю системи та її параметрами: λ , μ , γ , ν , ν' . Під час сприятливих умов плавання, зокрема у відкритих морях і океанах, інтенсивність потоку відмов дорівнює 0,5, тоді як інтенсивність потоку запитів коливається від 2 до 6, ймовірність виконання запитів Q коливається від 0,63 до 0,95. При ускладнених умовах плавання в прибережних зонах інтенсивність потоку відмов зростає до 1, тоді як інтенсивність потоку запитів коливається від 10 до 20, що призводить до зниження ймовірності виконання запитів, тому значення Q коливається від 0,53 до 0,92. У складних навігаційних умовах, таких як річки, порти, інтенсивний рух водного транспорту та погана видимість, інтенсивність потоку відмов збільшується до 5, тоді як потік запитів коливається від 20 до 40, що призводить до подальшого зниження ймовірності виконання запиту, значення Q коливається від 0,19 до 0,77. Якщо значення Q падає нижче 0,7, це створює критичну ситуацію на борту судна. Ймовірність виконання запиту залежить від навігаційних умов плавання, як було показано на відповідних тривимірних графіках. Отже, стає необхідним впровадити заходи, які гарантують стабільність навігаційної системи під час складних обставин.

2. На основі результатів моделювання визначено, як початкові параметри впливають на ймовірність виконання вхідного запиту. Аналіз

рівнянь, отриманих при однакових значеннях $v=1,0$ і $v'=0,2$, але з різною інтенсивністю потоку запитів λ , показує, що збільшення λ від 10 до 20 зменшує ймовірність обслуговування вхідного запиту Q (відносна пропускна здатність) на 0,2. При цьому коефіцієнти для μ і μ^2 збільшуються приблизно в 1,5 рази, а коефіцієнти для γ і γ^2 залишаються практично незмінними. Це означає, що збереження високого рівня Q значною мірою залежить від μ , а не від γ . Водночас аналіз рівнянь показує, що збільшення інтенсивності потоку відмов каналу v від 1 до 5 (v' від 0,2 до 1) при тій самій інтенсивності потоку запитів ($\lambda=20$) зменшує Q на 0,3. При цьому коефіцієнт для γ зростає в 2,4 рази (для γ^2 – у 2,2 рази), хоча коефіцієнти для μ і μ^2 практично не змінюються. Результати моделювання вказують на те, що ймовірність виконання вхідного запиту суттєво зменшується зі збільшенням частоти відмов і частоти запитів. Тому продуктивність навігаційного комплексу знижується. Високий рівень коефіцієнтів детермінації ($R^2=0,98-0,99$) свідчить про високу адекватність отриманих статистичних квадратичних моделей. Квадратичні регресії демонструють надзвичайно низькі стандартні відхилення ($\sigma=0,006-0,014$), що вказує на їх виняткову точність. Отже, ці моделі можна впевнено використовувати для отримання високонадійних оцінок ймовірності.

3. Продемонстровано ефективність байєсівського підходу в оцінці надійності навігаційного комплексу. Виявлено, що апостеріорні ймовірності гіпотез значно перевищують апіорні у 1,8...3,6 разів, і це перевищення тим більше, чим ближче до одиниці добуток ймовірностей безвідмовної роботи вузлів. Як було показано вище, отримані результати відображають низку закономірностей: ймовірності того, що перший вузол вийшов з ладу, а другий працює, зменшуються зі збільшенням надійності першого пристрою та зростають із збільшенням надійності другого; і навпаки, ймовірності того, що другий вузол вийшов з ладу, а перший працює, зменшуються зі збільшенням надійності другого пристрою і зростають зі збільшенням надійності першого; у свою чергу, ймовірність того, що обидва вузли

відмовили, зменшується як зі збільшенням надійності першого пристрою, так і зі збільшенням надійності другого, що видно за результатами розрахунків.

4. Оцінено ефективність різних методів дублювання компонентів навігаційної системи та проведено їх математичне моделювання. Отримані результати дозволили зробити кілька висновків щодо ймовірності безвідмовної роботи системи при застосуванні певної схеми дублювання. Якщо система складається з компонентів однакової надійності, то дублювання кожного компонента є більш ефективним методом підвищення надійності, ніж дублювання всієї системи. Крім того, якщо початкове значення надійності компонентів становить 0,85 або нижче, то дублювання всієї системи разом з кожним новим дублюючим компонентом значно знизить надійність системи. Підвищення надійності системи шляхом дублювання кожного компонента з недостатньою початковою надійністю буде більш ефективним, якщо ці компоненти мають значення надійності нижче 0,85. Якщо система складається з неоднаково надійних компонентів, тоді, коли оцінка ймовірності безвідмовної роботи для кожного компонента окремо є неможливою, заміна їхніх значень середнім значенням стає сумнівною (зокрема, коли існує велика варіація значень). Це можна пояснити високою дисперсією ймовірностей безвідмовної роботи компонентів системи, що призводить до значного зростання відносної похибки, яка може перевищувати 10%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Behbood I. Z. (2022). Analysis of European Union Maritime Casualties Crisis Management Prospective. The 12th International Conference on Recent Development in Managements and Industrial Engineering: Dusseldorf, Germany. DOI: 10.5281/zenodo.8134918.
2. IALA (1989). Guide to the Availability and Reliability of Aids to Navigation. International Association of Lighthouse and Aids to Navigation Authorities: Saint-Germain-en-Laye, France.
3. Specht, C. (2003). Availability, Reliability and Continuity Model of Differential GPS Transmission. *Annu. Navig.* 5, 85.
4. Jaskólski, K. (2011). Application of Markov Chains to Analyse the AIS Availability. *Annu. Navig.* 18, 5–16.
5. Paś, J., Rosiński, A. (2017). Selected issues regarding the reliability-operational assessment of electronic transport systems with regard to electromagnetic interference. *Ekspluat. Niezawodn. Maint. Reliab.* 19, 375–381.
6. Resolution MSC.252(83) (2007). Adoption of the revised performance standards for integrated navigation systems (INS). URL: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.252%2883%29.pdf>
7. Resolution MSC.192(79) (2004). Adoption of the revised performance standards for radar equipment. URL: http://rise.odessa.ua/texts/MSC192_79e.php3
8. Resolution MSC.192(79) (2004). Adoption of the revised performance standards for radar equipment. URL: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.192%2879%29.pdf>
9. A Guide to Best Practice for Navigational Assessments and Audits (First edition 2018). The Oil Companies International Marine Forum (OCIMF). URL: <https://www.ocimf.org/document-library/88-a-guide-to-best-practice-for-navigational-assessments-and-audits/file>

10. ECDIS – guidance for good practice MSC.1/Circ.1503/Rev.1. URL: <https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/activities/statutory/ism/imo/msc1-circ1503-rev1.pdf>

11. Navigational requirements and procedures of the vessel train. Netherlands Maritime Technology Foundation. URL: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?appId=PPGMS&documentIds=080166e5bd1182bd>

12. Another step for maritime safe navigation using EGNOS. URL: <https://edas-maritime.gsc-europa.eu/news-events/news/another-step-maritime-safe-navigation-using-egnos>

13. The Autonomous Navigation System. Maritime Robotics : веб-сайт. URL: <https://www.maritimerobotics.com/autonomous-navigation-system> (дата звернення: 12.12.2024)

14. Marine navigation. Wikipedia, the free encyclopedia : веб-сайт. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Marine_navigation (дата звернення: 12.12.2024)

15. Tong Y., Zhen R., Dong H., Liu J. (2023). Identifying influential ships in multi-ship encounter situation complex network based on improved WVoteRank approach, Ocean Engineering, Volume 284, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115192>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801823015767>

16. 21 Types of Navigation Equipment onboard Ships in Maritime. Marine Digital : веб-сайт. URL: https://marine-digital.com/article_21types_of_navigation_equipment (дата звернення: 12.12.2024)

17. Плотніков В.І., Макачук Д.В. (2021). Базові аспекти стійкості навігаційного комплексу сучасного морського судна. Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI–2021): Матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції, м. Херсон, 3-5 листопада 2021 р., с. 133-136.

18. Вагущенко Л.Л. (2004). Судові навігаційно-інформаційні системи. Одеса, Латстар, 302 с.

19. Chatelier J.-M., Nzengu W.N., Cocito R. (2017). Stability and seakeeping of river-sea vessels: Classification rules. Proceedings of the 16th International Ship Stability Workshop, 5-7 June 2017, Belgrade, Serbia. URL: https://shipstab.org/files/Proceedings/ISSW/ISSW_2017_Belgrade_Serbia/Papers/Session_6_Stability_and_safety_of_inland_and_river-sea_ships/6_2_Chatelier_et_al_ISSW2017.pdf

20. Hanzu-Pazara R., Duse, Varsami C., Andrei C., Dumitrache R. (2016). The influence of ship's stability on safety of navigation, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 145. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/145/8/082019/pdf>

21. Manderbacka T., Themelis N., Bačkalov I., Boulougouris E., Eliopoulou E., Hashimoto H., Konovessis D., Leguen J.-F., González M.M., Rodríguez C.A., Rosén A., Ruponen P., Shigunov V., Schreuder M., Terada D. (2019). An overview of the current research on stability of ships and ocean vehicles: The STAB2018 perspective, Ocean Engineering, Volume 186, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.05.072>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801819302914>

22. Understanding Stability of Cruise Ships. Marine Insight - The Maritime Industry Guide : веб-сайт. URL: <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/understanding-stability-of-cruise-ships/> (дата звернення: 12.12.2024)

23. Pietrzykowski Z., Wołęjsza P., Nozdrzykowski Ł., Borkowski P., Banaś P., Magaj J., Chomski J., Mąka M., Mielniczuk S., Pańka A., Hatłas-Sowińska P., Kulbiej E., Nozdrzykowska M. (2022). The autonomous navigation system of a sea-going vessel, Ocean Engineering, Volume 261, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112104>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801822014275>

24. Understanding Ship Hierarchies: Ranks and Roles Explained. Primo Nautic - Best Online Maritime Courses STCW & IMO : веб-сайт. URL: <https://primonautic.com/blog/understanding-ship-hierarchies-ranks-and-roles-explained/> (дата звернення: 12.12.2024)

25. Bridge of a Ship – Design And Layout. Marine Insight - The Maritime Industry Guide : веб-сайт. URL: <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/bridge-of-a-ship-design-and-layout/> (дата звернення: 13.12.2024)

26. Navigation Control. StudySmarter The #1 learning app for university & school : веб-сайт. URL: <https://www.studysmarter.co.uk/explanations/engineering/aerospace-engineering/navigation-control/> (дата звернення: 13.12.2024)

27. Suzuki S., Kamps F.S., Dilks D.D., Treadway M.T. (2021). Two scene navigation systems dissociated by deliberate versus automatic processing. *Cortex*. Jul;140:199-209. DOI: 10.1016/j.cortex.2021.03.027. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8608425/>

28. Performance Analysis and Histograms. SIMPLIS Technologies : веб-сайт. URL: https://www.simplistechnologies.com/documentation/simplis/user_manual/topics/graphs_probesanddataanalysis_performanceanalysisandhistograms.htm (дата звернення: 13.12.2024)

29. Simanenko A., Doshchenko H., Chymshyr V., Kononenko A., Terz H., Smyrnova I. (2024). Vessel Dynamic Positioning System Mathematical Model. *WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS and CONTROL*, Volume 19. DOI: 10.37394/23203.2024.19.10. URL: <https://wseas.com/journals/sac/2024/a205103-008%282024%29.pdf>

30. Huang L. (2023). A Mathematical Modeling and an Optimization Algorithm for Marine Ship Route Planning, *Hindawi Journal of Mathematics*, Volume 2023, DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/5671089>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2023/5671089>

31. Zinchenko S. M., Nosov P. S., Mateichuk V. M., Mamenko P. P., Grosheva O. O. (2019). Use of navigation simulators for development and testing ship control systems. Міжнародна науково-практична конференція FS-2019. URL: http://rep.ksma.ks.ua:8080/jspui/bitstream/123456789/452/1/Nosov_Use_of_navigation.pdf

32. Wang Z., Wu Y., Chu X., Liu C., Zheng M. (2023). Risk Identification Method for Ship Navigation in the Complex Waterways via Consideration of Ship Domain. *Journal of Marine Science and Engineering*; 11(12):2265. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse11122265>. URL: <https://www.mdpi.com/2077-1312/11/12/2265>

33. Navigation and vessel motions. PRDW – Consulting Port and Coastal Engineers : веб-сайт. URL: <https://prdw.com/navigation-and-vessel-motions/> (дата звернення: 13.12.2024)

34. Autonomous Navigation. ShippingLab – Driving Future Maritime Technology : веб-сайт. URL: <https://shippinglab.dk/t2-2-autonomous-navigation/> (дата звернення: 13.12.2024)

35. Wang Y., Chen X., Wu Y., Zhao J., Postolache O., Liu S. (2024). Visual Navigation Systems for Maritime Smart Ships: A Survey. *Journal of Marine Science and Engineering*; 12(10):1781. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12101781>. URL: <https://www.mdpi.com/2077-1312/12/10/1781>

36. Jurdziński M. (2018). Changing the Model of Maritime Navigation TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 12(1):35-41. DOI: 10.12716/1001.12.01.03. URL: https://www.researchgate.net/publication/324010445_Changing_the_Model_of_Maritime_Navigation

37. Dai Y., He Y., Huang L., Zhao X. (2024). Autonomous navigation decision-making for ships in complex estuarine waters: Methodology and validation, *Ocean Engineering*, Volume 309, Part 2, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118474>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801824018122>

38. Ince A.N., Topuz E. (2004). Modelling and Simulation for Safe and Efficient Navigation in Narrow Waterways. *Journal of Navigation* 57(01):53 – 71. DOI:10.1017/S0373463303002510. URL:

https://www.researchgate.net/publication/231843750_Modelling_and_Simulation_for_Safe_and_Efficient_Navigation_in_Narrow_Waterways

39. Fan Y., Agand P., Chen M., Park E.J., Kennedy A., Bae C. (2024). Sequential Modeling of Complex Marine Navigation: Case Study on a Passenger Vessel (Student Abstract). The Thirty-Eighth AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-24). URL: <https://ojs.aaai.org/index.php/AAAI/article/view/30439/32526>

40. Alenzi Z., Alenzi E., Alqasir M., Alruwaili M., Alhmiedat T., Alia O.M. (2022) A Semantic Classification Approach for Indoor Robot Navigation. Electronics; 11(13):2063. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics11132063>. URL: https://www.mdpi.com/2079-9292/11/13/2063?type=check_update&version=2

41. Ung S.Y., Zhong J.Y., Goh S.K. (2024). Optimal Classification and Visualization of Navigation Strategy Users through Machine Learning. Conference: 1st International Conference on Smart Manufacturing Technology, Electrical Engineering, and Robotics (STEER2024). URL: https://www.researchgate.net/publication/382657003_Optimal_Classification_and_Visualization_of_Navigation_Strategy_Users_through_Machine_Learning

42. Kuffner Dos Anjos R., Pereira J., Gaspar J. (2018). A navigation paradigm driven classification for video-based rendering techniques, Computers & Graphics, Volume 77, Pages 205-216, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cag.2018.10.017>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S009784931830178X>

43. Galimulina F.F., Barsegyan N.V. (2024). Application of Mass Service Theory to Economic Systems Optimization Problems—A Review. Mathematics; 12(3):403. DOI: <https://doi.org/10.3390/math12030403>. URL: <https://www.mdpi.com/2227-7390/12/3/403>

44. Terentyev A., Marusin A., Evtyukov S., Marusin A., Shevtsova A., Zelenov V. (2023). Analytical Model for Information Flow Management in Intelligent Transport Systems. Mathematics; 11(15):3371. DOI:

<https://doi.org/10.3390/math11153371>. URL: <https://www.mdpi.com/2227-7390/11/15/3371>

45. Regression Analysis for Marketing Mix Modeling. MASS Analytics - Marketing Mix Modeling Solutions Provider : веб-сайт. URL: <https://mass-analytics.com/marketing-mix-modeling-blogs/regression-analysis-for-marketing-mix-modeling/> (дата звернення: 14.12.2024)

46. Analytical Models. Preface Marketing Research : веб-сайт. URL: https://bookdown.org/mike/marketing_research/analytical-models.html (дата звернення: 14.12.2024)

47. Mass haul analysis. Take-Off Professionals Civil Engineering Consultants : веб-сайт. URL: <https://www.takeoffpros.com/services/mass-haul-analysis/> (дата звернення: 14.12.2024)

48. Design and Simulate Inertial Navigation Systems. MathWorks - Maker of MATLAB and Simulink : веб-сайт. URL: <https://se.mathworks.com/videos/design-and-simulate-inertial-navigation-systems-1625235854630.html> (дата звернення: 14.12.2024)

49. U. Kayasal (2007). "Modeling and simulation of a navigation system with an IMU and a Magnetometer," M.S. - Master of Science, Middle East Technical University. URL: <https://open.metu.edu.tr/handle/11511/16974>

50. Baldauf, M., Hong, S.-B. (2016). Improving and assessing the impact of e-navigation applications. International Journal of e-Navigation and Maritime Economy, 4, 1-12. DOI: 10.1016/j.enavi.2016.06.001.

51. Dmitriev, S.P., Osipov, A.V., Koshaev, D.A. (2006). Detection of information failures in marine navigation systems and their reconditioning. 6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, 39(13). DOI: 10.3182/20060829-4-CN-2909.00248.

52. Abramov G.S., Makarchuk D.V., Nosov P.S., Zinchenko S.M. (2021). The ship officer as a failure-prone single-channel queueing system: Materials of the 13th international scientific and practical conference, Kherson, May 21-27, 2021. – 364 p.

53. Daya, A.A., Lazakis, I. (2023). Developing an advanced reliability analysis framework for marine systems operations and maintenance. *Ocean Engineering*, 272, 1-17. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.113766.

54. Columbia Shipmanagement (2018). Bridge Operations Manual BOPR-01.2.

55. Development of an e-navigation strategy implementation plan. Report of the Correspondence Group on e-navigation to NAV 59. URL: https://legacy.iho.int/mtg_docs/com_wg/CPRNW/S100_NWG/2014/NAV%2059-6_eNav_ReportCG_Norway-1.pdf

56. Plotnikov V. I., Dudchenko S.V., Abramov G.S., Makarchuk D.V. (2023). Mathematical modeling and analysis of the reliability of the navigation complex. *Науковий вісник ХДМА*, № 1-2 (26-27), с. 82-95. DOI: 10.33815/2313-4763.2023.1-2.26-27.082-095.

57. Sumic, D., Perakovic, D., Jurcevic, M. (2014). Contribution to ECDIS reliability using Markov Model. *Trans. Marit. Sci.* 3, 149–157.

58. Abramov G.S., Plotnikov V. I. (2024). Analysis of the reliability of the navigation complex and recommendations for increase of reliability. *Науковий вісник ХДМА*, № 1 (28), с. 68-78. DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.068-078.

59. Le T.D., Le H.V., Nguyen L.T., Nguyen T.K.T., Le D.T. (2020). Application of correlation and regression analysis between GPS - RTK and environmental data in processing the monitoring data of cable - stayed bridge. *Journal of Mining and Earth Sciences* Vol. 61, Issue 6 (2020) 59 – 72. URL: https://tapchi.humg.edu.vn/images/paper/2020/61_6/07.Le%20Duc%20Tinh%2059-72.pdf

60. Powell C.E., Ruf C.S., McKague D.S., Wang T., Russel A. (2024). An Instrument Error Correlation Model for Global Navigation Satellite System Reflectometry. *Remote Sensing*; 16(5):742. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16050742>. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/5/742>

61. Jialun Liu, Fan Yang, Shijie Li, Yaqiong Lv, Xinjue Hu. (2024). Testing and evaluation for intelligent navigation of ships: Current status, possible solutions, and challenges, *Ocean Engineering*, Volume 295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.116969>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801824003068>
62. Nosov P.S., Palamarchuk I.V., Zinchenko S. M., Nahrybelnyi Y. A. (2020). Development of means for experimental identification of navigator attention in ergatic systems of maritime transport. *Bulletin of the Karaganda University Physics Series*, 97(1):58-69. DOI: 10.31489/2020Ph1/58-69. URL: https://www.researchgate.net/publication/349242314_Development_of_means_for_experimental_identification_of_navigator_attention_in_ergatic_systems_of_maritime_transport
63. Popovych I. S., Cherniavskyi V. V., Dudchenko S. V., Zinchenko S. M., Nosov P. S., Yevdokimova O. O., Burak O. O., Mateichuk V. M. Experimental Research of Effective “The Ship’s Captain and the Pilot” Interaction Formation by Means of Training Technologies. URL: <https://ekhsuir.kspu.edu/bitstream/handle/123456789/10473/7.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
64. Shi Y., Yin J., Han X., Guo L. (2023). Experimental setup and investigation of deep-sea navigation and positioning network, *Applied Acoustics*, Volume 202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.109127>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X22005011>
65. Chan, J. P., Pazouki, K., & Norman, R. A. (2022). An experimental study into the fault recognition of onboard systems by navigational officers. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 22(2), 101–110. DOI: <https://doi.org/10.1080/20464177.2022.2143312>. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/20464177.2022.2143312>
66. Nosov P.S., Zinchenko S.M., Plokhikh V., Popovych I. (2021). Development And Experimental Study Of Analyzer To Enhance Maritime Safety. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 4(112):27-35. DOI:

10.15587/1729-4061.2021.239093.

URL:

https://www.researchgate.net/publication/354282803_Development_And_Experimental_Study_Of_Analyzer_To_Enhance_Maritime_Safety

67. B. Bacca, J. Salvi, X. Cufí. (2013). Long-term mapping and localization using feature stability histograms, *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 61, Issue 12, Pages 1539-1558. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.07.003>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092188901300122X>

68. What Is Kanban Throughput? Speed Up Team Performance. Businessmap (formerly Kanbanize) Strategy Execution Software : веб-сайт. URL: <https://businessmap.io/kanban-resources/kanban-analytics/throughput-histogram> (дата звернення: 14.12.2024)

69. Li W., Chen W., Guo Y., Hu S., Xi Y., Wu J. (2024). Risk Performance Analysis on Navigation of MASS via a Hybrid Framework of STPA and HMM: Evidence from the Human–Machine Co-Driving Mode. *Journal of Marine Science and Engineering*; 12(7):1129. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12071129>. URL: <https://www.mdpi.com/2077-1312/12/7/1129>

70. Marine Navigation Systems. Inertial Navigation Systems for Sea, Land & Air : веб-сайт. URL: <https://www.advancednavigation.com/marine-navigation-systems/> (дата звернення: 15.12.2024)

71. Abbas F. (2022). Master thesis: Vessel Performance Analysis using High Frequency Operational Data. University of Rostock. URL: https://matheo.uliege.be/bitstream/2268.2/16491/4/MasterThesis_ABBAS_MMG.pdf

72. Specht M. (2024). Testing and Analysis of Selected Navigation Parameters of the GNSS/INS System for USV Path Localization during Inland Hydrographic Surveys. *Sensors*; 24(8):2418. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24082418>. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/8/2418>

73. Navigation Tuning. ArduPilot Documentation Air : веб-сайт. URL: <https://ardupilot.org/plane/docs/navigation-tuning.html> (дата звернення: 15.12.2024)

74. Fraser D.A.S. (2011). Is Bayes Posterior just quick and dirty confidence? Statistical Science. Vol. 26. Pp. 299-316.

75. Abramov G.S., Plotnikov V. I. (2024). Application of Bayesian approach for determining the reliability of the navigation complex. Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки, №2 (49), с. 127-137.

76. Абрамов Г. С., Плотніков В.І. (2024). Моделювання процесів підвищення надійності навігаційного комплексу за допомогою дублювання його елементів. Науковий вісник ХДМА, №2 (29).

77. Resolution MSC.252(83) (2007). Adoption of the revised performance standards for integrated navigation systems (INS). URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.252\(83\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.252(83).pdf)

78. Gryzun L.E., Shcherbakov O.V., Bida B.O. Development of the information system for navigation in modern university campus. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3364/paper20.pdf>

79. Dual use communication, navigation and surveillance approach. EUROCONTROL Supporting European Aviation : веб-сайт. URL: <https://www.eurocontrol.int/initiative/dual-use-communication-navigation-and-surveillance-approach> (дата звернення: 15.12.2024)

80. International Maritime Organization (IMO). International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974.

81. Jackson S., Ferris T.L.J. (2013). Resilience Principles for Engineered Systems. Syst. Eng. Vol. 16, P. 152–164.

82. Jackson S., Ferris T.L.J. (2016). Designing Resilient Systems. In Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Resilience-Based

Approaches to Critical Infrastructures Safeguarding, Azores, Portugal, 26–29 June 2016. P. 121–144.

83. Woods D.D. (2015). Four concepts for resilience and the implication for the future resilience. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* Vol. 141, P. 5–9.

84. Sterbenz J.P.G., Hutchison D., Cetinkaya E.K., Jabbar A., Rohrer J., Schöller M., Smith P. (2010). Resilience and survivability in communication networks: Strategies, principles, and survey of disciplines. *Comput. Netw.* Vol. 54, P. 1245–1265.

85. Sterbenz J.P.G., Hutchison D., Cetinkaya E.K., Jabbar A., Rohrer J., Schöller M., Smith P. (2014). Redundancy, diversity, and connectivity to achieve multilevel network resilience, survivability, and disruption tolerance. *Telecommun. Syst.* Vol. 56, P. 17–31.

86. Martinek V., Zemlicka M. (2010). Complex Navigation Systems - Some Issues and Solutions. *International Journal on Advances in Intelligent Systems*, vol. 3 no. 3 & 4. URL: https://personales.upv.es/thinkmind/dl/journals/intsys/intsys_v3_n34_2010/intsys_v3_n34_2010_9.pdf

87. Kleineberg, K.K., Helbing, D. (2017). Collective navigation of complex networks: Participatory greedy routing. *Sci Rep* 7, 2897. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02910-x>. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-017-02910-x>

88. Zhang H. (2021). Navigation service with perspectives of digital technology developments in maritime sector. World Maritime University, Dalian, China. URL: https://commons.wmu.se/cgi/viewcontent.cgi?article=1329&context=msem_dissertations

89. Gao M., Kang Z., Zhang A., Liu J., Zhao F. (2022). MASS autonomous navigation system based on AIS big data with dueling deep Q networks prioritized replay reinforcement learning, *Ocean Engineering*, Volume 249, DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110834>. URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801822002785>

90. Wang S., Zhang Y., Zhang X., Gao Z. (2023). A novel maritime autonomous navigation decision-making system: Modeling, integration, and real ship trial, *Expert Systems with Applications*, Volume 222, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119825>. URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417423003263>

91. Heiskala M., Tiitonen J., Sievänen M., Paloheimo K.-S. (2010). Choice navigation modeling concepts for mass customized solutions. Conference: In: Anisic, Z. et al.(eds.). *Proceedings of the 4th International Conference on Mass Customization and Personalization in Central Europe (MCP-CE 2010)*, September 23-24, Novi Sad, Serbia. URL: https://www.researchgate.net/publication/235653166_Choice_navigation_modeling_concepts_for_mass_customized_solutions

92. Mama M. (2008). *Mathematical Modelling of The Global Positioning System Tracking Signals*. Master Thesis, Mathematical Modeling and Simulation, Thesis no: 2008 - 6 May 2008. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:831645/FULLTEXT01.pdf>

93. Mathematical Modeling. Supply & Demand Optimisation Complexica : веб-сайт. URL: <https://www.complexica.com/narrow-ai-glossary/mathematical-modeling> (дата звернення: 15.12.2024)

94. Planned maintenance system for technical ship management - ShipManager Technical. When trust matters – DNV : веб-сайт. URL: <https://www.dnv.com/services/planned-maintenance-system-for-technical-ship-management-shipmanager-technical-1509/> (дата звернення: 15.12.2024)

95. Maintenance. Señales marítimas y ayudas a la navegación – Mesemar : веб-сайт. URL: <https://mesemar.com/en/services/maintenance/> (дата звернення: 16.12.2024)

96. Navigational equipment. Sharky Maritime Marine Survey Company: веб-сайт. URL: <https://sharkymaritime.com/services/navigational-equipment/> (дата звернення: 16.12.2024)

97. Service and maintenance. Mr. Marine Your Global Beacon : веб-сайт. URL: <https://mr-marinegroup.com/instruments-controls/service-and-maintenance/> (дата звернення: 16.12.2024)

98. Communication & Navigation. Blessed Marine Automation: Global Solutions for Maritime Needs : веб-сайт. URL: <https://www.blessedmarineautomation.com/service/navigation> (дата звернення: 16.12.2024)

99. How Maintenance of Navigation Lights is Done On Ships? Marine Insight - The Maritime Industry Guide : веб-сайт. URL: <https://www.marineinsight.com/marine-electrical/how-maintenance-of-navigation-lights-is-done-on-ships/> (дата звернення: 16.12.2024)

100. Repair and maintenance of radio navigation equipment. Ship supply and maritime services Shiphandler for sea and river fleet - MARKO Ltd : веб-сайт. URL: <https://markogroup.com/en/service/repair-and-maintenance-of-radio-navigation-equipment/> (дата звернення: 17.12.2024)

101. Maintenance of radio and navigational equipment. Knowledge Of Sea We will keep you updated : веб-сайт. URL: <https://knowledgeofsea.com/maintenance-of-radio-and-navigational-equipment/> (дата звернення: 17.12.2024)

102. Features of a Mass Production System: Efficiency at Scale. MBA Mastery: In-Depth Blogs for Every Subject MBA Hub : веб-сайт. URL: <https://themba.institute/management-of-machines-and-materials/features-of-a-mass-production-system/> (дата звернення: 17.12.2024)

103. Properties of Services. SEBoK Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge : веб-сайт. URL: https://sebokwiki.org/wiki/Properties_of_Services (дата звернення: 17.12.2024)

104. Mass Production: Examples, Advantages, and Disadvantages. Investopedia : веб-сайт. URL: <https://www.investopedia.com/terms/m/mass-production.asp> (дата звернення: 17.12.2024)

105. Service Delivery Management: Optimizing Customer Satisfaction. SaaS solutions for mobile professionals : веб-сайт. URL: <https://www.nomadia-group.com/en/resources/blog/service-delivery-management-optimizing-customer-satisfaction/> (дата звернення: 18.12.2024)

106. Height Reference System Modernization. Canadian Geodetic Vertical Datum of 2013 (CGVD2013). Natural Resources Canada (NRCan). URL: [https://natural-resources.canada.ca/sites/nrcan/files/files/pdf/Height_reference_system_modernization_\(EN\).pdf](https://natural-resources.canada.ca/sites/nrcan/files/files/pdf/Height_reference_system_modernization_(EN).pdf)

107. GPS modernization.Delays Continue in Delivering More Secure Capability for the Warfighter. Report to Congressional Committees, September 2024, GAO-24-106841, United States Government, Accountability Office, Accessible Version. URL: <https://www.gao.gov/assets/gao-24-106841.pdf>

108. Navigating Complex Regulations And Laws. The global venture builder and online incubator – FasterCapital : веб-сайт. URL: <https://fastercapital.com/topics/navigating-complex-regulations-and-laws.html> (дата звернення: 18.12.2024)

109. Construction Programme of Works: Navigating Complex Regulatory Environments. Archdesk - #1 Construction Project Management Software : веб-сайт. URL: <https://archdesk.com/blog/programme-of-works-regulatory-environments/> (дата звернення: 18.12.2024)

110. Navigating regulatory compliance. Strategy Activation Through People - TiER1 Performance : веб-сайт. URL: <https://tier1performance.com/navigating-regulatory-compliance/> (дата звернення: 18.12.2024)

111. Navigating Regulatory Complexity in Tech. KPMG the Netherlands - KPMG Netherlands : веб-сайт. URL:

<https://kpmg.com/nl/en/home/industries/technology-media-telecom/navigating-regulatory-complexity-in-tech.html> (дата звернення: 18.12.2024)

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ЗАТВЕРДЖУЮ

директор ТОВ «Херсонський
Морський спеціалізований
Тренажерний Центр»



ЗАТВЕРДЖУЮ

проректор ХДМА з НТР к.т.н., професор



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ


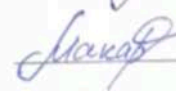
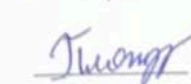
Даний акт складений в тому, що впродовж 2024-2025 року за спільної участі з товариством з обмеженої відповідальності «Херсонський морський спеціалізований тренажерний центр» (м. Херсон, Україна) і співробітниками та аспірантом Херсонської державної морської академії (м. Херсон, Україна) проведено дослідну перевірку та впровадження методів математичного моделювання функціональної стійкості навігаційного комплексу морських суден.

Впровадження зазначених методів підвищило ефективність оцінки функціональної стійкості навігаційного комплексу, оптимізувавши процедури прийняття рішень в умовах навігаційної діяльності, аварійних ситуацій на 10% та вдосконалило систему підготовки фахівців морської галузі, а саме продукт «Tropical storm and heavy weather navigation» (DS-101-35-KMSTC).

Від ТОВ ХМСТЦ

 Дудченко С.В.
 Мірзе О.О.

Від ХДМА

 Абрамов Г.С.
 Макаручук Д.В.
 Плотніков В.І.

ДОДАТОК Б

ЗАТВЕРДЖУЮ

проректор ХДМА з ННР к.т.н., професор

07.03



Акт

про використання результатів дисертаційної роботи

ПЛОТНІКОВА Владислава Ігоровича

на тему «Підвищення функціональної стійкості навігаційного комплексу морських суден методами математичного моделювання» в освітньому процесі Херсонської державної морської академії

Ми, що нижче підписалися, Нагрибельний Я.А., Петровський А.В., Гудирева О.М., склали цей акт в тому, що результати наукових досліджень дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії здобувача Плотнікова В.І. на тему «Підвищення функціональної стійкості навігаційного комплексу морських суден методами математичного моделювання» впроваджені в освітній процес, кафедри судноводіння, при викладанні освітньої компоненти «Математична статистика та теоретичні засади судноводіння» та «Сучасні методи експериментальних досліджень та обробки даних» для здобувачів денної форми навчання 5м курсу освітнього ступеня магістр, факультету судноводіння, а саме:

- Методи математичного моделювання, які полягають в розрахунку і візуалізації небезпечних областей параметрів навігаційної системи, що ведуть до помилкового функціонування, порівняння даних при ускладнених навігаційних умовах плавання та розробка рекомендацій щодо регламенту підвищення функціональної стійкості навігаційного комплексу.

Декан факультету судноводіння

д.п.н, професор Ярослав НАГРИБЕЛЬНИЙ

Заступник завідувача
кафедри судноводіння

к.т.н., доцент Андрій ПЕТРОВСЬКИЙ

Доцент кафедри судноводіння

к.т.н., доцент Олена ГУДИРЕВА

ДОДАТОК В

ОПУБЛІКОВАНІ ПРАЦІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Публікації у фахових виданнях категорії «Б»:

1. Plotnikov V.I., Dudchenko S.V., Abramov G.S., Makarchuk D.V. Mathematical modeling and analysis of the reliability of the navigation complex. *Науковий вісник ХДМА*, 2023, № 1-2 (26-27), с. 82-95. DOI: 10.33815/2313-4763.2023.1-2.26-27.082-095. (Внесок автора: конкретизація математичних моделей навігаційного комплексу)
2. Abramov G.S., Plotnikov V. I. Analysis of the reliability of the navigation complex and recommendations for increase of reliability. *Науковий вісник ХДМА*, 2024, № 1 (28), с. 68-78. DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.068-078. (Внесок автора: аналіз параметрів надійності навігаційного комплексу)
3. Abramov G.S., Plotnikov V.I. Application of Bayesian approach for determining the reliability of the navigation complex. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*, 2024, №2 (49), с. 127-137. DOI: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321374. (Внесок автора: обчислення апіорних та апостеріорних вірогідностей)
4. Абрамов Г.С., Плотніков В.І. Моделювання процесів підвищення надійності навігаційного комплексу за допомогою дублювання його елементів. *Науковий вісник ХДМА*, 2024, №2 (29), с. 164-177. DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.164-177. (Внесок автора: побудова математичних моделей)
5. Abramov G.S., Plotnikov V.I. Mathematical modeling of the processes of increasing the reliability of the navigation complex through redundancy. *Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій*, 2024, № 3 (41), с. 147-158. DOI: 10.33298/2226-8553.2024.3.41.17. (Внесок автора: статистична обробка результатів обчислення)

Тези доповідей:

1. Плотніков В.І., Макарчук Д.В. Базові аспекти стійкості навігаційного комплексу сучасного морського судна. Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI–2021): Матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції, м. Херсон, 3-5 листопада 2021 р., с. 133-136. (Внесок автора: опис основних параметрів надійності навігаційного комплексу)

2. Plotnikov V.I., Abramov G.S., Makarchuk D.V. Analysis of the stability of marine navigation complex systems from the point of view of the QS. Modern information and innovation technologies in transport (MINTT–2023): Materials of the 15th international scientific and practical conference, Kherson, May 24-25, 2023, pp. 244-249. (Внесок автора: обробка результатів обчислення)

3. Abramov G.S., Plotnikov V.I., Zinoviev V.I. Analysis of the reliability of the navigation complex and its influence on the functioning of the maritime logistics system. “Transport, port, logistics, security: modern-day challenges and development prospects”: Materials of the 1st International Scientific and Practical Conference, Kherson, September 28, 2023, pp. 16-29. (Внесок автора: аналіз надійності функціонування навігаційного комплексу)

4. Plotnikov V.I. Implementation of e-navigation concept. Modern information and innovation technologies in transport (MINTT–2024): Materials of the 16th international scientific and practical conference, Odesa, May 29-31, 2024, pp. 149-152. (Внесок автора: аналіз сучасних технологій запровадження е-навігації)

5. Plotnikov V.I. Use of bayesian data analysis to monitor the condition of navigation devices. Problems of sustainable development of the maritime industry (PSDMI–2024): Materials of the 4th International Scientific and Practical Conference, Odesa, November 28-29, 2024, pp. 39-41. (Внесок автора: опис застосування байєсівського аналізу даних)