

Г. С. АБРАМОВ, Д. В. МАКАРЧУК

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ НАВІГАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ МЕТОДАМИ ТЕОРІЇ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

У статті розглядається навігаційний комплекс судна як система масового обслуговування та досліджується зв'язок між складністю морських умов і можливостями системи. Проведено математичне моделювання та аналіз надійності суднового навігаційного комплексу з позицій теорії масового обслуговування. Представлена робота є однією з перших кроків у застосуванні теорії масового обслуговування в аналізі проблем безпечного судноплавства. Розроблену математичну модель було реалізовано в чисельних експериментах в широкому діапазоні вхідних даних. Отримані результати візуалізували та математично обробили, побудувавши апроксимаційні рівняння другого порядку, які пов'язують ймовірність робочого стану системи з відповідними інтенсивностями потоків відмов та обслуговування. Лінеаризована модель доведена до побудови номограми, яка може мати широке практичне використання. Математичне моделювання здійснено для різних умов навігаційної складності (від берегової до прибережної навігації та портових маневрів). Це забезпечує високу практичну важливість результатів моделі при розробці відповідних морських правил та оцінці переваг електронної навігації.

Ключові слова: системи навігації, стабільність системи, надійність, системи масового обслуговування, відмова та відновлення системи, квадратична апроксимація, номограма.

G. S. ABRAMOV, D. V. MAKARCHUK

MATHEMATICAL MODELING OF THE RELIABILITY OF THE NAVIGATION COMPLEX USING QUEUEING SYSTEMS THEORY

This article examines the navigation complex as a queueing system and defines the relationship between the difficulty of navigation conditions and the system's capacity. A mathematical model was developed to calculate and analyze the reliability of the ship's navigational complex using queueing systems theory. This work is one of the first steps in using queueing systems theory to analyze issues with safe shipping. The mathematical model was implemented with experimentation across a wide range of input data. The results are visualized and mathematically processed, building approximation equations of the second order, which tie the probability of the system's functional state to the corresponding intensities of failure and servicing streams. The linearized model is taken to build a nomogram, which may have broad practical uses. Mathematical modeling is done for various conditions of navigational difficulty (from coastal to littoral navigation and port maneuvers). This ensures the practical importance of the model's results when developing relevant naval rules and judging the benefits of electronic navigation.

Key words: navigation systems, system stability, reliability, queueing systems, system failure and recovery, flow of requests, quadratic approximation, nomogram.

Вступ. Безпека на морі повністю залежить від безпечного стану судна та його механізмів. Щоб досягти цього мореплавці, аналітики та дослідники повинні мати глибокі технічні знання та досвід. Відповідно до звітів *Ради з розслідування морських аварій (МАІВ)* з 1993 по 2012 рік, 6692 морські аварії були спричинені лише технічними факторами, а 69 % аварій пов'язані з комбінацією інших факторів. Технічні фактори включають різні аспекти, такі як основні/допоміжні/палубні механізми, процедури містка, маневреність, зіткнення/контакт, електричні системи, захист від пожежі та вибуху, ризик затоплення, загальні засоби контролю та процедури, бортові дії, ризик заземлення тощо. Протягом історії людства одним із найпоширеніших підходів було отримання цінної інформації з минулих несприятливих подій, яка може допомогти людям подолати потенційні рецидиви [1].

Резервування критично важливих для безпеки систем і датчиків може фактично забезпечити достатній рівень безпеки для складних систем, таких як *ANS*. Однак цей спосіб не є найвигіднішим варіантом. Щоб покращити продуктивність і ефективність, часто рекомендується інтегрувати оновлені версії ключових компонентів і датчиків, які збільшують середній час напрацювання на відмову (*MTBF*). Крім того, інтелектуальне програмне забезпечення, таке як моніторинг стану датчиків, може допомогти вчасно виявити проблеми та спланувати необхідні операції з обслуговування. Нарешті, рівень безпеки концептуального програмного забезпечення в досліджуваній системі повинен бути визначений шляхом верифікації та валідації [2, 3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Було виявлено кілька підходів до аналізу надійності електронних навігаційних систем, головним чином зосереджених на визначенні характеристик надійності системи та її підсистем [4]. Деякі дослідження щодо надійності навігаційної системи посилаються на її визначення, яке стверджує, що навігаційний пристрій або певна система чи компонент (якщо доступний) є схильними до помилок протягом певного періоду часу за певних умов. У такому разі надійність – це ймовірність виконання певної функції без виникнення відмов. Унікальним параметром, який використовується для характеристики надійності, є середній час напрацювання на відмову (*MTBF*). Це середній час між послідовними відмовами системи або частини системи. На додаток до надійності *IALA* [5] також визначає доступність, яка визначається як ймовірність того, що допоміжний засіб або допоміжна система виконуватиме необхідну функцію за певних умов у випадково вибраній час. Параметром, який використовується для оцінки доступності, є середній час до ремонту (*MTTR*).

Що стосується аналізу надійності диференціальних систем глобального позиціонування (*DGPS*), *Шпехт* [6] ввів структуру надійності системи та її підсистем у зв'язку з їх функціями та взаємозв'язками. Потім компонен-

там і системам було призначено два стани, пов'язані з їхньою функціональністю: 0, якщо компонент або система вийшли з ладу; 1, якщо компонент або система функціонує нормально. Крім того, надійність навігаційної системи з урахуванням її структури визначається як ймовірність часу виживання системи. Припускаючи експоненціальний розподіл тривалості служби та часу простою, було визначено надійність навігаційної системи та її граничну надійність протягом певного інтервалу часу.

Аналіз доступності системи АІС, запроваджений Яскольським [7], застосовано до ланцюгів Маркова. Шляхом реєстрації доступності передачі даних АІС було виділено три стани системи (робочий, проміжний стан і відмова) за коефіцієнтом доступності. Далі була визначена матриця ймовірностей переходів між конкретними станами готовності АІС. Матриця була створена на основі частоти переходів між станами, визначеної шляхом аналізу записаних сигналів базової станції АІС. Нарешті, шляхом прийняття початкового та сукупного розподілів переходів між конкретними станами була визначена ймовірність того, що система залишається в робочому стані.

Оцінка надійності електронних систем передачі по відношенню до електромагнітних перешкод, представлена Пасем і Росінським [8], складається з трьох систем безпеки: повна безпека (повна функціональність), ризик безпеки (пріоритет безпеки) і ненадійна безпека. Це було зроблено шляхом розмежування станів. Вказуючи переходи між конкретними безпечними станами, аналізована система була описана системою рівнянь Чепмена – Колмогорова. Потім були застосовані початкові умови та використано перетворення Лапласа для визначення ймовірності того, що система залишиться в певному стані. Крім того, зафіксувавши швидкість переходу між конкретними станами та ймовірність того, що система залишиться в певному стані, була встановлена ймовірність того, що система залишиться в повністю функціональному стані. Програми для оцінки надійності систем транспорту електронів базуються на припущенні, що час переходу між певними станами безпеки описується експоненціальним розподілом.

Сумич та ін. [9] застосували модель Маркова для аналізу надійності та доступності системи ECDIS, що складається з основної (*master*) і резервної підсистеми (*backup subsystem*). Основна та резервна системи утворюють паралельну структуру, де, припускаючи, що кожна підсистема може залишатися в робочому або несправному стані, система приймає один із чотирьох можливих станів. Використовуючи властивості моделі Маркова (умовний розподіл ймовірностей майбутніх станів процесу залежить лише від поточного стану; наступний стан залежить лише від поточного стану, а не від історії, що веде до нього), була розрахована надійність системи, визначена як ймовірність непереребування в невдалому стані. Основним результатом дослідження було те, що бажаного рівня надійності не було досягнуто. Це спонукало авторів запропонувати альтернативне рішення, так звану холодну резервну систему, яка включає *резервні системи з послідовним або паралельним підключенням*.

Ціль та задачі дослідження. Загальноприйнятим методом оцінки ефективності технічних систем є використання *теорії систем масового обслуговування*. Ця теорія дозволяє розраховувати ймовірності різних станів у системі масового обслуговування (СМО) і визначати зв'язок між певними параметрами СМО та показниками її ефективності.

Припускаючи, що всі канали в системі є елементарними каналами, процес, який СМО виконує в даний момент, можна описати як *марківський випадковий процес*. Цей процес складається з дискретних станів і відбувається протягом безперервного періоду часу. Якщо процес задовольняє умову ергодичності, досягається остаточний усталений (фінальний) режим. У цьому режимі ймовірності станів та інші параметри процесу не залежать від часу. Дослідники часто зосереджують свої дослідження на цих усталених, довготривало існуючих характеристиках.

Розглянемо навігаційний комплекс судна (в тому числі і судноводія, як найважливішого її елемента), як *одноканальну СМО*, на вхід якої приходить потік заявок (відмов) того чи іншого елемента, а система реагує потіком обслуговування (відновлення). В залежності від інтенсивності негативних умов мореплавства ці потоки відмов можуть мати критичні значення, які необхідно компенсувати відповідним збільшенням інтенсивностей потоків обслуговування і відновлення. Здійснимо моделювання роботи такої СМО з метою отримання залежностей вихідних характеристик означеної СМО від інтенсивностей відповідних вхідних потоків (вхідних факторів).

Математична модель. Нерегулярні потоки заявок і різний час обробки призводять до непослідовного використання СМО. У деяких випадках невиконані замовлення (запити) можуть накопичуватися на вході, що призводить до перевантаження СМО. І навпаки, бувають ситуації, коли на вході є доступний канал, але немає замовлень (запитів), що призводить до того, що СМО недостатньо завантажена і цей канал залишається неактивним. Замовлення накопичуються на вході. Є два можливі результати для цих заявок. Їх або додають до черги, або, якщо вони більше не можуть чекати в черзі, вони залишають СМО без обслуговування [10].

У разі збою каналу (відмова якогось із елементів системи) негайно починається процес відновлення його працездатності. Це може бути заміна несправного блоку системи або підключення резервного модуля, агрегату тощо. Якщо ми розглядаємо судноводія як канал обслуговування, то його умовна «відмова» може бути спричи-

нена раптовою кризою: хворобою, що може призвести до раптової втрати свідомості (не кажучи вже про елементарну неухважність, відволікання, пропуск важливого сигналу від приладів; судноводій, з тих чи інших причин, може неправильно оцінити обстановку і, як наслідок, прийняти хибний порядок дій – той самий сакраментальний людський фактор). Відновлення може відбуватися у формі відновлення уваги, працездатності, більш-менш швидкого приходу до тями, прийому відповідних ліків для лікування хвороби або нападу.

Граф схеми «народження та загибелі», що відображає стан системи, має наступний вигляд (рис. 1):

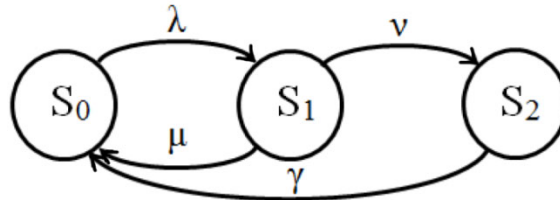


Рис. 1 – Граф станів СМО.

де S_0 – канал вільний; S_1 – канал зайнятий (робочий), справний; S_2 – канал вийшов з ладу, відновлюється.

Найпростіший потік запитів приходить до 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, тобто стаціонарний пуассонівський процес можна описати параметром інтенсивності, позначеним μ . Функціонуючий канал може вийти з ладу і запити не будуть обслуговані (відхилені). Припустимо, що потік відмов каналу є найпростішим з інтенсивністю ν . Відразу після відмови каналу починається процес його відновлення. Час відновлення каналу відповідає експоненціальному розподілу, який характеризується параметром, що називається інтенсивністю

$$\gamma = \frac{1}{t_p},$$

де t_p – середній час відновлення (ремонт). У [11] проблема була розглянута подібним чином, зосереджуючись на навігаторі як сервісному каналі. У представленому дослідженні задача дещо ускладнюється за рахунок розгляду можливості виникнення збурень каналу ще в стані спокою (тобто, коли канал ще не працює), що позначається інтенсивністю ν' . Розумно припустити, що $\nu' < \nu$ [12].

Граф, що представляє стани СМО, матиме тепер такий вигляд (рис. 2):

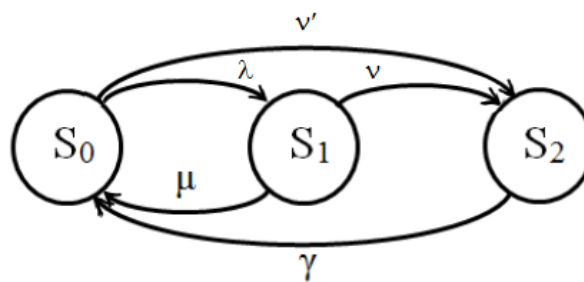


Рис. 2 – Граф станів СМО з можливістю відмови під час простою.

Тепер ми можемо визначити остаточну ймовірність станів системи та її характеристики ефективності: позначимо абсолютну пропускну здатність як A , а Q нехай представляє відносну пропускну здатність (ймовірність того, що вхідний запит буде успішно оброблено). Остаточна ймовірність станів визначається в системі алгебраїчних рівнянь, які виводяться з системи диференціальних рівнянь Колмогорова шляхом прирівнювання лівих частин (похідних ймовірностей станів за часом) до нуля, та може бути виражена таким чином:

$$\begin{aligned} (\lambda + \nu') p_0 &= \mu p_1 + \gamma p_2, \\ (\mu + \nu) p_1 &= \lambda p_0, \\ \gamma p_2 &= \nu p_1 + \nu' p_0. \end{aligned} \quad (1)$$

Крім того, умова нормування на одиницю може бути інтегрована в цю систему:

$$p_0 + p_1 + p_2 = 1. \quad (2)$$

Завдання полягає у визначенні передбачуваних остаточних (фінальних) ймовірностей:

$$p_0 = \left[1 + \frac{\lambda}{\mu + \nu} + \frac{\lambda\nu + \mu\nu' + \nu\nu'}{\gamma(\mu + \nu)} \right]^{-1}; \quad (3)$$

$$p_1 = \frac{\lambda}{\mu + \nu} p_0; \quad (4)$$

$$p_2 = \frac{\lambda\nu + \mu\nu' + \nu\nu'}{\gamma(\mu + \nu)} p_0. \quad (5)$$

Для визначення відносної пропускної здатності застосовуємо принципи, описані в [10], і отримаємо такий результат:

$$Q = p_0 \frac{\mu}{\mu + \nu}. \quad (6)$$

Абсолютна пропускна здатність:

$$A = \lambda Q = p_0 \frac{\lambda\mu}{\mu + \nu}. \quad (7)$$

Спростивши вираз для Q , ми можемо записати його у формі, більш зручній для чисельних розрахунків:

$$Q = \frac{\mu\gamma}{(\mu + \nu)(\gamma + \nu') + \lambda(\gamma + \nu)}. \quad (8)$$

Результати моделювання. Ймовірність обробки вхідного запиту (відносна пропускна здатність) Q визначається п'ятьма параметрами. Ці параметри є відповідними інтенсивностями потоків: λ , μ , γ , ν і ν' .

Проведемо чисельне моделювання значень Q для різних комбінацій наведених вище параметрів. Розрахунки ймовірностей виконання вхідних запитів у різних умовах плавання та інтенсивності потоків вхідних запитів, потоків відмов та потоків відновлення представлені на рис. 3 – 6. Відповідні залежності для умов плавання в прибережних районах показані на рис. 3 – 4. У цьому сценарії інтенсивність потоку відмов зростає до 1, а інтенсивність потоку запитів змінюється від 10 до 20. У результаті шанси на виконання запитів зменшуються порівняно з плаванням у відкритому морі.

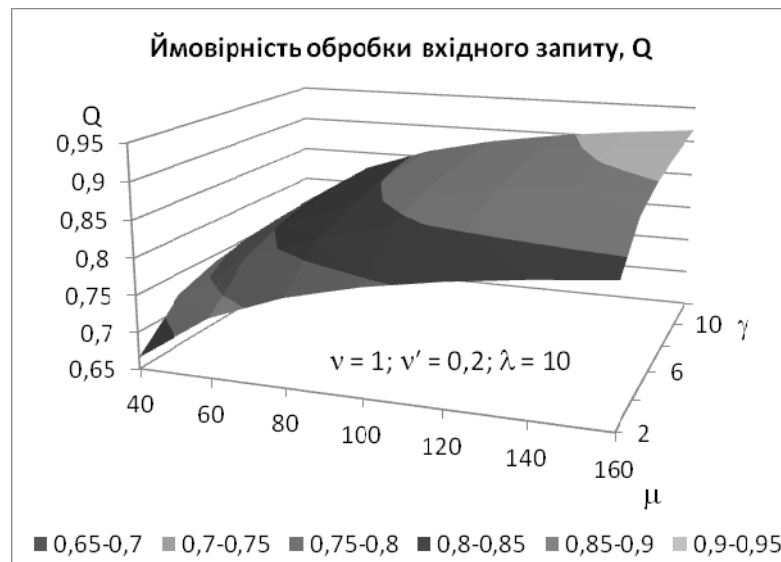


Рис. 3 – Залежність між Q та λ , μ , γ , ν , ν' . Інтенсивності відповідних потоків такі: $\nu = 1$ за годину; $\nu' = 0,2$ за годину; $\lambda = 10$; μ від 40 до 160 за годину; γ від 2 до 12 за годину.

$$Q_{\tau} = 0,5098 \pm 0,01 + (0,0258 \pm 0,0018)\gamma + (-0,0013 \pm 0,0001)\gamma^2 + (0,0036 \pm 0,0002)\mu + (-1,2002 \cdot 10^{-5} \pm 0,0912 \cdot 10^{-5})\mu^2; \quad (9)$$

$$R^2 = 0,984; \quad \sigma = 0,0082.$$

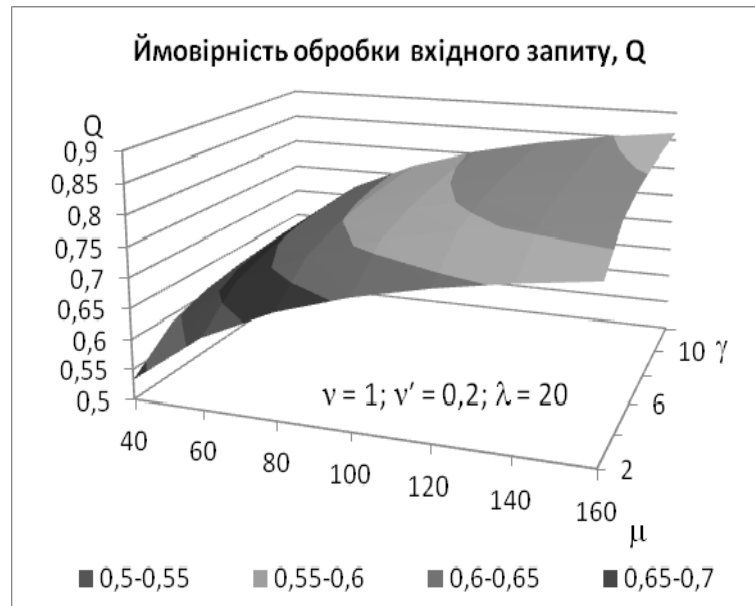


Рис. 4 – Залежність між Q і λ , μ , γ , ν , ν' . Інтенсивності відповідних потоків такі: $\nu=1$ за годину; $\nu'=0,2$ за годину; $\lambda=20$; μ від 40 до 160 за годину; γ від 2 до 12 за годину.

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

$$R^2 = 0,990; \quad \sigma = 0,0091.$$

У складних навігаційних обставинах, таких як річки, гавані, де інтенсивний рух і погана видимість, рис. 5 – 6, ілюструють взаємозв'язки, що спостерігаються під час плавання в таких умовах. Інтенсивність потоку відмов збільшується до 5, тоді як потік запитів змінюється від 20 до 40, що додатково зменшує ймовірність виконання запиту порівняно з попередніми даними.

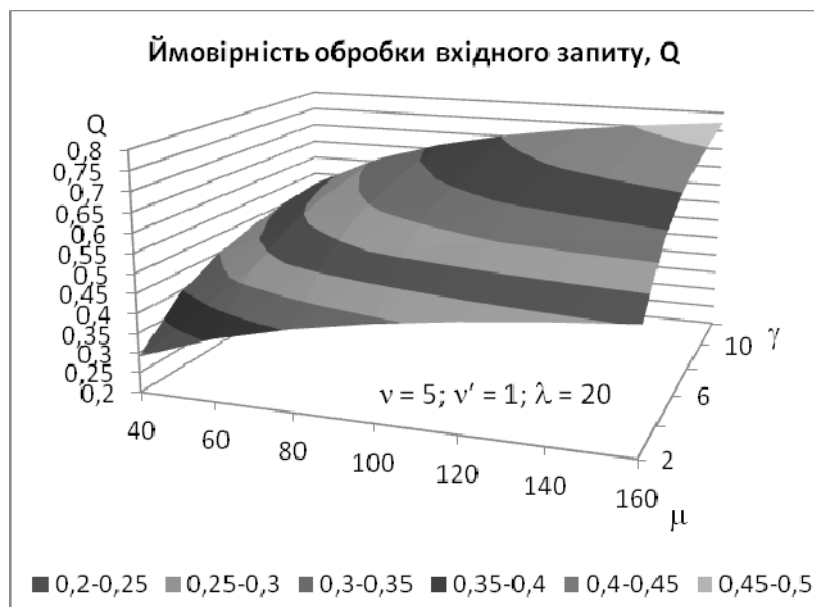


Рис. 5 – Залежність між Q і λ , μ , γ , ν , ν' . Інтенсивності відповідних потоків такі: $\nu=5$ за годину; $\nu'=1$ на годину; $\lambda=20$; μ від 40 до 160 на годину; γ від 2 до 12 годин.

$$Q_{\tau} = -0,0095 \pm 0,0163 + (0,0667 \pm 0,003)\gamma + (-0,0031 \pm 0,0002)\gamma^2 + (0,0049 \pm 0,0003)\mu + (-1,5023 \cdot 10^{-5} \pm 0,1487 \cdot 10^{-5})\mu^2; \quad (11)$$

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

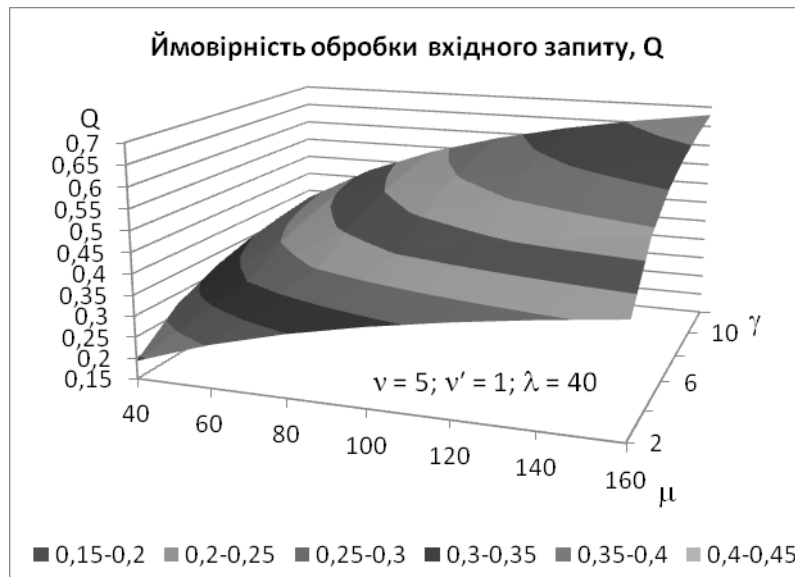


Рис. 6 – Залежність між Q і λ , μ , γ , ν , ν' . Інтенсивності відповідних потоків такі: $\nu = 5$ за годину; $\nu' = 1$ на годину; $\lambda = 40$; μ від 40 до 160 на годину; γ від 2 до 12 годин.

$$Q_{\tau} = -0,1196 \pm 0,0171 + (0,0604 \pm 0,0031)\gamma + (-0,0027 \pm 0,0002)\gamma^2 + (0,005 \pm 0,0003)\mu + (-1,3831 \cdot 10^{-5} \pm 0,1561 \cdot 10^{-5})\mu^2; \quad (12)$$

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

Рівняння $Q_{\tau} = Q_{\tau}(\gamma, \mu)$ під кожним графіком отримані за допомогою *квадратичної двофакторної апроксимації*. Високий рівень коефіцієнта детермінації ($R^2 = 0,98 - 0,99$) вказує на те, що отримані квадратичні статистичні моделі адекватні і цілком доречні. Стандартне відхилення квадратичних регресій доволі низьке ($\sigma = 0,006 - 0,014$), що вказує на їх достатньо хорошу точність. Тому ці моделі можна на практиці використовувати для отримання надійних оцінок ймовірності [13, 14].

Аналіз рівнянь (12) і (13), отриманих при однакових значеннях $\nu = 1,0$ і $\nu' = 0,2$, але з різною інтенсивністю потоку запитів λ , показує, що збільшення λ від 10 до 20 зменшує ймовірність обслуговування вхідного запиту Q (відносно пропускну здатність) на 0,2.

У цьому випадку коефіцієнти при 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 .

Водночас аналіз рівнянь (14) і (15) показує, що збільшення інтенсивності потоку відмов каналу ν від 1 до 5 (ν' 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 відновлення каналу 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 відновного потоку γ . На нашу думку, система в цьому випадку діє дуже фізично і логічно.

Отримані результати моделювання також узгоджуються з наступними рекомендаціями щодо експлуатаційної роботи на містку у різних складних навігаційних умовах [15] табл. 1.

Стан вахти на містку – I.

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

Вахтовий офіцер виконує регулярні вахтові обов'язки, а іноді є єдиним вахтовим протягом дня.

В умовах, коли потрібне ручне керування, важливо зазначити, що капітан не може діяти як спостерігач. Тому необхідно призначити додаткового члена команди в якості спеціального спостерігача.

Таблиця 1 – Стани вахтенної роботи на містку, що пов'язані з умовами плавання

	Відкриті води	Обмежені води, постановка на якір, посадка або висадка лоцмана	Вхід або вихід з порту
Ясна погода, рух транспорту незначний або відсутній	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 or III	II або III	III
Пілотаж	I	I або II	II або III

Машинне відділення має можливість працювати як в пілотованому, так і в безпілотному режимах.

Стан вахти на містку – II.

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

Безпечно плавання екіпажу та загальна вахта контролюються капітаном або старпомом. Вахтовий офіцер, який допомагає капітану або старпому, надає відповідну інформацію, керує судном і контролює виконання наказів. У ситуаціях, які екіпаж вважає необхідними, або в складних умовах, таких як інтенсивний рух, обмежена видимість, маневри в порту або посадка лоцманів, керманіч бере на себе керування судном вручну.

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

Стан вахти на містку – III.

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

В умові III вахтовий офіцер звільняється від обов'язків спостереження за зіткненнями, і додатковий офіцер виконує цю роль, використовуючи системи AIS/ARPA. Вони забезпечують вахтового офіцера важливою навігаційною інформацією та інформацією про судна, що знаходяться поблизу.

Вкрай важливо, щоб персонал був присутній і готовий у машинному відділенні.

Як бачимо, судноводії – практики, зважаючи на ускладнення умов судноплавства, відповідним чином посилюють склад вахти на містку. Тим самим вони фактично переводять систему з одноканальної в двох-, а при потребі і в трьохканальну, що значно підвищує її надійність і ефективність за рахунок перерозподілу обов'язків між офіцерами вахти.

В роботі також було проведено статистичне моделювання результатів чисельних експериментів. 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 на рис. 7.

Регресійний аналіз проводився на основі 168 точок за 4 змінними.

$$Q_r = -0,6377 \pm 0,0138 + (0,0157 \pm 0,001)\gamma + (0,0018 \pm 8,678 \cdot 10^{-5})\mu + (-0,0412 \pm 0,0024)\nu + (-0,0063 \pm 0,0004)\lambda; \quad (13)$$

$$R^2 = 0,9329; \quad \sigma = 0,045.$$

Отримане рівняння візуалізовано за допомогою побудованої номограми, що дозволяє швидко і достатньо просто виконувати будь-які необхідні розрахунки та оцінки.

Дана модель має високий показник коефіцієнта детермінації $R^2 = 0,9329$ (що показує високу адекватність побудованої моделі) та доволі низьку стандартну помилку регресії, що є прийнятним для практичного використання.

Наведемо кілька прикладів використання номограми.

Приклад 1. Вибираємо значення λ (наприклад, 30), рухаємося в напрямку стрілки вліво, вибираємо значення ν (в даному випадку це 1), рухаємося по стрілці вгору щоб вибрати значення γ (у наведеному прикладі 10), рухаючись по стрілці вправо в першому квадранті вибираємо значення μ (у нашому прикладі 160) і в самому кінці ми йдемо стрілками вниз до осі Q , де отримаємо його значення (це приблизно 0,85).

Приклад 2. 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 того чи іншого рівня кожного з факторів, зрештою, від ступеня їх реальної досяжності на тому рівні розвитку техніки, що існує на даний час.

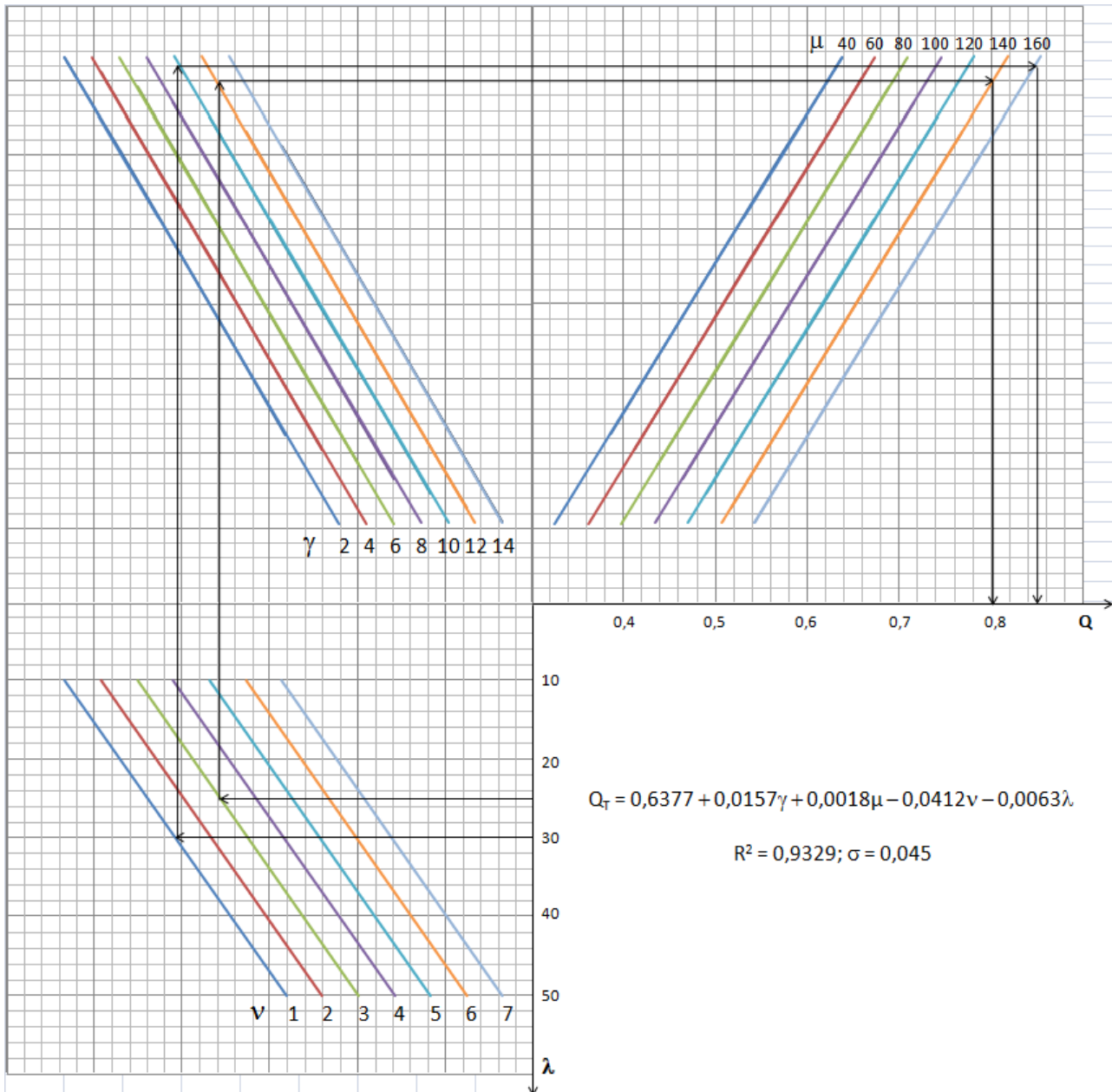


Рис. 7 – Номограма чотирьохфакторної регресійної моделі для оцінки залежності Q від λ , ν , γ та μ .

Приклад 3. Наведеними прикладами використання номограм не обмежується. Також можливий зустрічний рух згідно наведеної схеми. Наприклад, задавши бажане значення Q і відомі значення деяких факторів з моделі, можна знайти необхідні значення інших факторів, які б забезпечили досягнення обраного Q . При такій постановці задачі номограма дає змогу визначити існування розв'язку і, якщо він існує, визначити множину можливих значень факторів, що визначаються, а також можливість їх заміщення (в певних межах зменшення значення одного з факторів може бути компенсовано збільшенням значення іншого фактора).

Приклад 4. Наведена номограма надає широкі можливості для оцінки можливих граничних меж значень Q , якщо відомі межі, в яких можуть змінюватися вхідні коефіцієнти моделі. Тобто, якщо відомі межі, в яких з певною достовірністю можна знайти значення кожного з факторів, можна по заданій номограмі поступово переходити від одного фактора до іншого зі «смугами» значень, де кожна «смуга» відображає межі варіювання можливих значень цього фактора. Наприкінці цього процесу ми досягнемо відповідної «смуги» значень Q (віднос-

ної пропускної здатності), тобто матимемо оцінки можливих відхилень від середнього прогнозного значення Q (песимістичний і оптимістичний прогнози).

Висновки. Аналізуючи результати моделювання, можна визначити вплив початкових параметрів на ймовірність виконання вхідного запиту. Це дає можливість прогнозувати стабільність компонентів навігаційної системи. Отримані результати дають можливість розробити відповідні рекомендації щодо підвищення функціональної стійкості навігаційних комплексів. Результати моделювання показують, що зі збільшенням частоти відмов і частоти запитів ймовірність того, що вхідний запит буде виконано, значно зменшується. В результаті знижується продуктивність навігаційного комплексу.

Таким чином, розробка моделей стійкості для навігаційних систем дозволяє моделювати різні аварійні ситуації, а також швидко розраховувати та оцінювати різні сценарії за допомогою візуалізації номограми, отриманої за допомогою багатofакторної лінійної регресії. Моделювання виявило кореляцію між продуктивністю системи та її параметрами: λ , μ , γ , ν , ν' . Розроблена модель доведена до побудови номограми, яка, на наш погляд, має неабияку практичну цінність і може бути використана при розробці відповідних морських регламентів та оцінці можливостей електронної навігації.

Це дослідження підкреслює важливість визначення належного рівня резервування навігаційних пристроїв для забезпечення надійності системи. Якщо значення Q впаде нижче 0,7, на борту корабля виникне критична ситуація. Як показано на рис. 3 – 6, ймовірність того, що запит буде прийнято, залежить від навігаційних умов судноплавства. Тому необхідно вживати відповідних заходів для забезпечення стабільності навігаційної системи навіть у складних ситуаціях. Якщо вичерпані технологічні можливості підвищення надійності елементів систем, що складають навігаційний комплекс судна, то чи не єдиним засобом підвищення надійності комплексу в цілому є більш-менш глибоке дублювання і резервування його складових елементів. Проблемні питання, пов'язані з задачами дублювання і резервування елементів комплексу з метою підвищення його надійності, ми ставимо як мету наших наступних досліджень.

Таким чином, отримані в роботі результати можуть покращити розуміння питань, пов'язаних з безпекою та відповідних рівнів ризику втрати надійності навігаційного комплексу. Хоча інтерес до цих питань зростає, про що свідчить збільшення кількості публікацій, важливо визнати певну нестачу наукової літератури з означених питань та підкреслити необхідність подальших досліджень. Однією з рекомендацій є проведення комплексного аналізу небезпек погіршення надійності систем навігаційного комплексу і більш детальна їх класифікація. Такий підхід дозволить глибше оцінити комплекс факторів, що визначають надійність систем навігаційного комплексу, і допоможе привести до більш конкретної та ефективної стратегії дій по забезпеченню високого рівня надійності.

Список літератури

1. Yip Tsz L., Sahin B. Technical factor in maritime accidents: an index for systematic failure analysis // IAME 2020 Conference. – 2020. – pp. 1 – 11. DOI: 10.17632/8p9hsvfhmx.2.
2. Aksu S. (2019). Assessing compartment-wide damage consequences in ships and offshore vessels using Fault Trees with System Location Attribution // Ocean Engineering. – 2019. – vol. 192. 106510. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106510.
3. Banda O. A. V., Kannos S., Goerlandt F., van Gelder P. H., Bergström M., Kujala P. A systemic hazard analysis and management process for the concept design phase of an autonomous vessel // Reliability Engineering & System Safety. – 2019. – vol. 191(C). 106584. DOI: 10.1016/j.res.2019.106584.
4. Blokus A., Dziula P. Reliability analysis of different configurations of master and back-up systems used in maritime navigation // Journal of Marine Science and Engineering. – 2020. – 8. – 34. DOI: 10.3390/jmse8010034.
5. 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.
6. Specht C. Availability, Reliability and Continuity Model of Differential GPS Transmission // Annual of Navigation. – 2003. – no. 5. – 85 p.
7. Jaskólski K. Application of Markov Chains to Analyse the AIS Availability // Annual of Navigation. – 2011. – no. 18. – pp. 5–16.
8. Pa's J., Rosi'nski A. Selected issues regarding the reliability-operational assessment of electronic transport systems with regard to electromagnetic interference // Eksploat. Niezawodn. Maint. Reliab. – 2017. – vol. 19. – no. 3 – pp. 375 – 381. DOI: 10.17531/ein.2017.3.8.
9. Sumic D., Perakovic D., Jurcevic M. Contribution to ECDIS reliability using Markov Model // Trans. Marit. Sci. – 2014. – no. 3(2). – pp. 149 – 157. DOI: 10.7225/toms.v03.n02.006.
10. Aubakirov S. K., Selivyorstov P. Y. System of mass service. Post capacity // Bulletin of Science and Education. – 2016. – vol. 6(18). – pp. 44 – 47.
11. Abramov G. S., Makarchuk D. V., Nosov P. S., Zinchenko S. M. The ship officer as a failure-prone single-channel queueing system // Materials of the 13th international scientific and practical conference "Modern information and innovation technologies in transport (MINTT-2021)". – 2021. – vol. 13. – pp. 157 – 162.
12. Abramov G. S., Makarchuk D. V., Plotnikov V. I. (2023). Analysis of the stability of marine navigation complex systems from the point of view of the QS // Materials of the 15th international scientific and practical conference "Modern information and innovation technologies in transport (MINTT-2023)". – 2023. – vol. 15. – pp. 244 – 249.
13. Abramov G. S., Plotnikov V. I., Zinoviev V. I. (2023). Analysis of the reliability of the navigation complex and its influence on the functioning of the maritime logistics system // Materials of the 1st International Scientific and Practical Conference "Transport, port, logistics, security: modern-day challenges and development prospects". – 2023. – vol. 1. – pp. 17 – 29.

14. Plotnikov V. I., Dudchenko S. V., Abramov G. S., Makarchuk D. V. Mathematical modeling and analysis of the reliability of the navigation complex // Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy. – 2023. – № 26–27. – pp. 82 – 95.
15. Columbia Shipmanagement. Bridge Operations Manual BOPR-01.2. – 2018.

References (transliterated)

1. Yip Tsz L., Sahin B. Technical factor in maritime accidents: an index for systematic failure analysis. *IAME 2020 Conference*. 2020, pp. 1–11. DOI: 10.17632/8p9hsvfhm2.
2. Aksu S. Assessing compartment-wide damage consequences in ships and offshore vessels using Fault Trees with System Location Attribution. *Ocean Engineering*. 2019, vol. 192. 106510. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106510.
3. Banda O. A. V., Kannos S., Goerlandt F., van Gelder P. H., Bergström M., Kujala P. A systemic hazard analysis and management process for the concept design phase of an autonomous vessel. *Reliability Engineering & System Safety*. 2019, vol. 191(C), 106584. DOI: 10.1016/j.ress.2019.106584.
4. Blokus A., Dziula P. Reliability analysis of different configurations of master and back-up systems used in maritime navigation. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020, 8, 34. DOI: 10.3390/jmse8010034.
5. 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.
6. Specht C. Availability, Reliability and Continuity Model of Differential GPS Transmission. *Annual of Navigation*. 2003, no. 5, 85 p.
7. Jaskólski K. Application of Markov Chains to Analyse the AIS Availability. *Annual of Navigation*. 2011, no. 18, pp. 5–16.
8. Pa's J., Rosiński A. Selected issues regarding the reliability-operational assessment of electronic transport systems with regard to electromagnetic interference. *Eksploat. Niezawodn. Maint. Reliab.* 2017, vol. 19, no. 3, pp. 375–381. DOI: 10.17531/ein.2017.3.8.
9. Sumic D., Perakovic D., Jurcevic M. Contribution to ECDIS reliability using Markov Model. *Trans. Marit. Sci.* 2014, no. 3(2), pp. 149–157. DOI: 10.7225/toms.v03.n02.006.
10. Aubakirov S. K., Selivyorstov P. Y. System of mass service. Post capacity. *Bulletin of Science and Education*. 2016, vol. 6(18), pp. 44–47.
11. Abramov G. S., Makarchuk D. V., Nosov P. S., Zinchenko S. M. The ship officer as a failure-prone single-channel queueing system. *Materials of the 13th international scientific and practical conference "Modern information and innovation technologies in transport (MINTT-2021)"*. 2021, vol. 13, pp. 157–162.
12. Abramov G. S., Makarchuk D. V., Plotnikov V. I. (2023). Analysis of the stability of marine navigation complex systems from the point of view of the QS. *Materials of the 15th international scientific and practical conference "Modern information and innovation technologies in transport (MINTT-2023)"*. 2023, vol. 15, pp. 244–249.
13. 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. *Materials of the 1st International Scientific and Practical Conference "Transport, port, logistics, security: modern-day challenges and development prospects"*. 2023, vol. 1, pp. 17–29.
14. Plotnikov V. I., Dudchenko S. V., Abramov G. S., Makarchuk D. V. Mathematical modeling and analysis of the reliability of the navigation complex. *Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy*. 2023, no. 26–27, pp. 82–95.
15. Columbia Shipmanagement. Bridge Operations Manual BOPR-01.2. 2018.

Надійшла (received) 05.10.2024

Відомості про авторів / Information about authors

Абрамов Геннадій Серафимович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри Судноводіння, Херсонська Державна Морська Академія, м. Херсон; тел.: (067) 789-10-01; ORCID: 0000-0003-0333-8819; e-mail: gennadabra@gmail.com.

Abramov Hennadii Serafimovich – PhD in physics and mathematics, associate professor of Navigation department, Kherson State Maritime Academy, Kherson; tel.: (067) 789-10-01; ORCID: [https:// orcid.org/0000-0001-9055-3257](https://orcid.org/0000-0001-9055-3257); e-mail: litvin@mail.ua.

Макарчук Дмитро Володимирович – кандидат технічних наук, завідувач кафедри судноводіння, Херсонська Державна Морська Академія, м. Херсон; тел.: (066) 502-36-44; ORCID: 0000-0002-4299-6614; e-mail: dmytro1991@gmail.com.

Makarchuk Dmytro Volodymyrovych – PhD, head of navigational department, Kherson State Maritime Academy, Kherson; tel.: (066) 502-36-44; ORCID: 0000-0002-4299-6614; e-mail: dmytro1991@gmail.com.