

Головань А.І.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМПЛЕКСНОЇ ПРЕСКРИПТИВНОЇ СИСТЕМИ ТА ЦИФРОВИХ СТРАТЕГІЙ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ВАНТАЖНИХ СУДЕН

У статті розглянуто важливу проблему формування і дослідження впливу комплексної прескриптивної системи та цифрових стратегій на ефективність системи технічного обслуговування вантажних суден. Проведено аналіз останніх досліджень і публікацій в цій області, які вказують на необхідність розробки нових стратегій та методик управління ефективністю систем технічного обслуговування і впровадження їх в процеси експлуатації вантажних суден для підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден.

Метою дослідження є оцінка та аналіз впливу інтеграції комплексної прескриптивної системи технічного обслуговування та цифрових стратегій на ефективність системи технічного обслуговування вантажних суден. Завданням статті є виявлення переваг та можливих обмежень запропонованого підходу, а також на встановлення практичних рекомендацій для покращення процесу технічного обслуговування вантажних суден з використанням сучасних цифрових технологій та прескриптивної теорії рішень. Також розглядається схема взаємозв'язків основних програмних модулів системи «Комплексного прескриптивного технічного обслуговування» вантажних суден при керуванні якістю системи технічного обслуговування вантажного судна.

Результати статті включають аналіз, який показує, що ухвалення ефективного рішення знижує питомі витрати на 20,9 % у порівнянні з базовою стратегією, при цьому підвищуючи ефективність використання ресурсів на 29,7 %. Висновки підкреслюють важливість аспектів узгодження мети операції технічного обслуговування з критерієм ефективності, а також адаптивність стратегій до змінних умов та потреб. Результати цього дослідження є суттєвими і важливими для галузі водного транспорту та безумовно сприятимуть покращенню безпеки та надійності судноплавства.

Ключові слова: *комплексна прескриптивна система, ефективність технічного обслуговування, цифрові стратегії, вантажні судна, підвищення надійності судноплавства, управління експлуатаційними процесами.*

Постановка проблеми. У сучасному світі технічне обслуговування вантажних суден стає все складнішим завданням, викликаючи потребу у пошуку нових, більш ефективних підходів до управління цим процесом. Однією з головних проблем у цій галузі є зростаюча складність технічних систем та компонентів, що входять до складу сучасних вантажних суден. Це може включати різноманітність електронних систем, механізмів, систем управління та інші складні технічні складові.

Нагальність проблеми посилюється швидким темпом розвитку технологій, що призводить до появи нових технічних рішень та систем. Це ставить під загрозу традиційні методи технічного обслуговування, які можуть бути недостатньо адаптованими до нових умов.

Ще однією ключовою проблемою є нестабільність технічного стану суден, що може призводити до раптових поломок та аварій, що в свою чергу може становити серйозну загрозу для безпеки екіпажу та довкілля.

Загалом, в сфері технічного обслуговування вантажних суден існує потреба у розробці нових стратегій та методик, які б забезпечували ефективне функціонування суден, зменшували

ймовірність аварій та несправностей, а також оптимізували витрати на технічне обслуговування та ремонт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В цілому, аналіз останніх досліджень і публікацій вказує на актуальність і важливість розробки нових стратегій та методик підвищення ефективності систем технічного обслуговування і впровадження їх в процеси експлуатації вантажних суден. Важливими постають питання: застосування нових прогностичних стратегій технічного обслуговування із врахуванням загальної вартості впровадження та експлуатації системи прогнозування, яка є інтегральним показником ефективності впровадження проактивної стратегії технічного обслуговування суден [1]; представлення системного підходу з використанням великих даних і машинного навчання як методів створення стратегій прогнозованого технічного обслуговування, яке вже призводить до змін у судноплавній галузі [2]; діяльності суднобудівних верфей повинна бути спрямована на зниження витрат на обслуговування суден за допомогою нових стратегій, заснованих на аналізі показників ефективності [3]; впровадження запропонованих напівкількісних методів є більш надійним підходом для вибору стратегій технічного обслуговування судових машинних систем [4]. Очікується, що цілісність етапів планування, координації та виконання на борту суден буде добре функціонувати [5]. Оптимальна стратегія технічного обслуговування обирається на основі дванадцяти критичних критеріїв прийняття рішень щодо технічного обслуговування [6]. Відділ технічного обслуговування відіграє важливу роль у підвищенні рівня продуктивності та якості [7]. Гібридний багатокритеріальний метод прийняття рішень підходить для вибору стратегії технічного обслуговування судових механічних систем та інших супутніх судових систем [8]. Стратегія динамічного коригування на основі даних застосовується до середовища технічного обслуговування для прогнозованого технічного обслуговування [9]. Впровадження комп'ютеризованої інформаційної системи управління технічним обслуговуванням покращило загальні показники ефективності обладнання та ефективний контроль виробничої системи [10].

Всі ці дослідження разом підкреслюють потенціал розробки нових стратегій та методик управління ефективністю систем технічного обслуговування і впровадження їх в процеси експлуатації вантажних суден для підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден.

Мета дослідження полягає в оцінці та аналізі впливу інтеграції комплексної прескриптивної системи технічного обслуговування та цифрових стратегій на ефективність системи технічного обслуговування вантажних суден. Проведене дослідження спрямоване на виявлення переваг та можливих обмежень запропонованого підходу, а також на встановлення практичних рекомендацій для покращення процесу технічного обслуговування вантажних суден з використанням сучасних цифрових технологій та прескриптивної теорії рішень.

Основні результати дослідження. Форми досліджень ефективності технічного обслуговування дуже різноманітні. Мабуть, не може існувати універсальної рецептурної схеми проведення дослідження ефективності операцій технічного обслуговування, що належать навіть до однієї галузі техніки. Однак може виявитися корисним деякий перелік узагальнених положень, дотримуючись якого дослідник організовує свою діяльність під час розв'язання конкретної науково-технічної задачі, розділяючи її на етапи [11]. Далі наведено перелік таких положень, що становить узагальнену схему дослідження ефективності операцій.

I. Проблемний аналіз складається з визначення існування проблеми; виявлення, аналізу і опису ситуації; формування й аналізу проблемної ситуації з використанням евристичних і формальних методів; формування та аналіз альтернативних цілей $\alpha_o = \{A_o^1, A_o^2, \dots, A_o^m\}$, досягнення яких вирішує проблему, і вибір однієї з них як мети операції; аналізу шляхів досягнення мети та визначення суттєвих обмежень (економічних, технічних тощо), що впливають на вибір засобів і способів досягнення мети; декомпозиція складної мети, розчленовування її на складові та завдання; вибір засобів досягнення мети, обґрунтування рівня їхньої якості в низці рівнів якості, що ускладнюється $\pi = \{R, I, C, A, L\}$; оцінка наявних або потрібних ресурсів; загальна постановка задачі дослідження ефективності операції.

II. Концептуальні дослідження складаються з опису метасистеми, аналізу її діяльності; виокремлення S_o -системи, в рамках якої проводиться (реалізується) операція; оцінювання інформаційної достатності; обґрунтування методологічного рівня дослідження ефективності операції $\nu = \{I, II, III, IV\}$; встановлення типу операції (S_o -системи), виходячи з рівнів поведінки, що ускладнюється $\mu = \{e, h, c, p, a\}$; обґрунтування концепції раціональної поведінки $\gamma = \{L, O, A\}$; висування гіпотез поведінки суб'єктів системи; обґрунтування складу і змісту зовнішнього доповнення, формування необхідного результату операції (цілепокладання), вибір простору стратегій суб'єктів системи технічного обслуговування, встановлення основних обмежень (дисциплінуючих умов), що впливають із діяльності метасистеми; вибір узагальнених показників ефективності, опис результату операції (корисних ефектів і витрат), обґрунтування функції відповідності реального результату необхідному, вибір шкал показників; обґрунтування принципу вироблення концептуального рішення і введення на цій основі критерію ефективності; концептуальне моделювання, кібернетичний опис операції (S_o -системи), факторизація завдання (виявлення ефектів чинників та їхніх взаємодій), встановлення напрямів операційних досліджень, уточнення і конкретизація завдань дослідження ефективності операції.

III. Операціональні дослідження розпочинаються з постановки завдання операціонального дослідження; оцінювання інформаційної достатності; формування (уточнення) множини стратегій за результатами концептуальних досліджень; уточнення характеристик активних засобів, опис їхніх властивостей, оцінка наявних або потрібних ресурсів; вибір способу і засобів операціонального моделювання; формування операціональної моделі, встановлення переліку вихідних даних, введення операторів переходу і виходу, уточнення обмежувальних умов, перевірка операціональної моделі; уточнення показників ефективності операції; обґрунтування принципу вироблення операціональних рішень і формування критерію ефективності; операціональне моделювання, вироблення рекомендацій для ухвалення рішення в різних варіантах завдання дослідження ефективності операції.

IV. Детальні дослідження складаються з постановки задачі детального дослідження; уточнення зовнішнього доповнення за результатами операційного дослідження (вимоги до якості елементів, вимоги до управління якістю тощо); узгодження та вибір показника і критерію оцінки якості операцій системи технічного обслуговування; визначення характеристик якості за результатами експерименту; розв'язання задачі задоволення якості або управління якістю операцій системи технічного обслуговування.

V. Прийняття рішення відбувається за такими кроками: аналіз результатів проведених досліджень; планування контрольних заходів щодо впровадження прийнятого рішення; затвердження прийнятого рішення.

На Рисунку 1 наведено схему основних етапів дослідження ефективності операцій технічного обслуговування і показано зв'язок між ними. Проблемний аналіз безпосередньо не входить у дослідження ефективності операції. Він передує цьому дослідженню, будучи необхідним його початковим етапом. Етап ухвалення рішення має більше організаційний характер, ніж дослідницький, будучи завершальною стадією всієї роботи. Порядок пунктів усередині кожного етапу залежно від конкретного дослідження може бути змінений, а частина пунктів – опущена. Крім того, всередині етапів, а також між етапами можливі цикли, тобто повернення після виконання певних пунктів (етапів) до попередніх пунктів залежно від одержуваних проміжних результатів [12].

З формального погляду на етапі проблемного аналізу реалізується відображення:

$$\alpha_0 \times \pi \rightarrow M_1, \quad (1)$$

де M_1 – множина метасистемних описів певної системи технічного обслуговування.

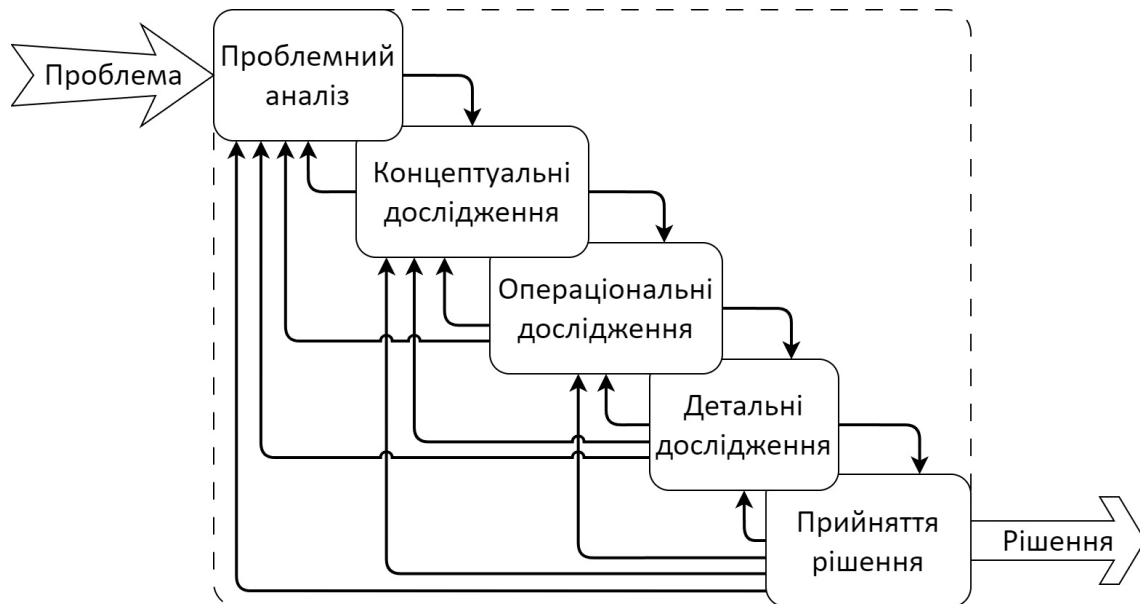


Рисунок 1 – Основні етапи дослідження ефективності операцій

Відображення (1) кожній парі «мета–засіб» її досягнення ставить у відповідність конкретний метасистемний опис галузі системи технічного обслуговування, сукупність засобів якої здатна раціонально розв’язати виявлену проблему.

На етапі концептуальних досліджень реалізується відображення:

$$M_1 \times \mu \times \nu \times \gamma \rightarrow M_2, \quad (2)$$

де M_2 – безліч варіантів зовнішнього доповнення з конкретним описом S_0 -системи, в рамках якої реалізується досліджувана операція.

Операціональне дослідження формально можна представити відображенням:

$$M_2 \times D \rightarrow U^*, \quad (3)$$

де D – множина варіантів вихідних даних задачі вибору раціонального рішення; U^* – множина раціональних рішень за різних варіантів вихідних даних.

Етап прийняття рішення реалізує відображення:

$$U^* \times \sigma \rightarrow U^*, \quad (4)$$

де σ – множина можливих ситуацій, що склалися до моменту ухвалення рішення.

Послідовна реалізація відображень (1) - (4) являє собою формальну схему дослідження ефективності операції технічного обслуговування. Такий формальний підхід становить основу для автоматизації системних досліджень ефективності операцій і загалом систем технічного обслуговування. Наразі практичне застосування такого підходу послідовно реалізовано в автоматичній інформаційній системі формування управлінських рішень (ShipDiMRO) для суден обладнаних інформаційною автоматизованою системою контролю і прогнозування технічного стану суднових технічних засобів і конструкцій (ACMS) [13]. Проте в міру накопичення результатів системних досліджень ефективності операцій і систем технічного обслуговування, систематизації різних підходів до метасистемного опису предметної області ступінь розмитості (нечіткості) відображень (1) - (4) значною мірою знижується. Це відкриває реальний шлях до розв’язання зазначеної проблеми на базі існуючої електронно-обчислювальної системи прескриптивного технічного обслуговування ShipDiMRO і розроблення відповідного математичного забезпечення у вигляді великих проблемно-орієнтованих імітаційних систем.

Критерій ефективності системи технічного обслуговування K є правило, що дає змогу зіставляти стратегії, які характеризуються різним ступенем досягнення мети, і здійснювати спрямований вибір стратегій із множини допустимих.

Критерій ефективності вводить на основі певної концепції раціональної поведінки.

Існують три концепції раціональної поведінки (вироблення рішень) систем технічного обслуговування: придатності, оптимізації, адаптивізації.

Згідно з концепцією придатності раціональною є будь-яка стратегія u , за якої обраний показник ефективності системи технічного обслуговування набуває значення не нижче деякого прийняттого рівня W^{rq} , тобто:

$$W(u) \geq W^{rq}, u \in U, \tag{5}$$

де U – множина допустимих стратегій.

Якщо показник ефективності векторний, то нерівність (5) записується для кожного часткового показника $W_i(u) \geq W_i^{rq}$, що входить до складу векторного показника ефективності системи технічного обслуговування. Таким чином, рівень забезпечення W^{rq} ділить множину допустимих стратегій U на дві підмножини, що не перетинаються: U^{SAT} – множина прийнятних (пригожих) стратегій і множина неприйнятних стратегій $U \setminus U^{SAT}$. Усі прийнятні стратегії $u \in U^{SAT}$ рівноцінні (однаково задовільні), як і всі неприйнятні стратегії з множини $U \setminus U^{SAT}$ однаково незадовільні. Така концепція призводить до негнучкої та нецілеспрямованої системи дій.

Концепція оптимізації вважає раціональними ті стратегії $u \in U$, які забезпечують максимальний ефект в операції, тобто

$$W(u^*) = \max_{u \in U} W(u), \tag{6}$$

Оптимальна стратегія може бути неєдиною, тобто розв'язання задачі (6) може дати безліч рівноцінних оптимальних стратегій $U^* \in U$.

Використовувати концепцію оптимізації можна в тому разі, якщо комплекс умов проведення операції строго фіксований, а показник ефективності $W(u)$ – скаляр. Ця концепція призводить до цілеспрямованої, але не гнучкої системи дій, тому що не враховують поточну інформацію про зміни різного роду, які відбуваються в системі та в зовнішньому середовищі під час реалізації рішення u^* .

Концепція адаптивізації передбачає можливість оперативного реагування під час операції технічного обслуговування на поточну інформацію, що надходить, про зміну комплексу умов проведення операції. Суть концепції адаптивізації полягає у зміні стратегій управління і (стратегію розуміють у ширшому розумінні, вона охоплює як способи зміни параметрів системи технічного обслуговування, так і способи зміни її структури) на основі не тільки апріорної, а й поточної та прогнозної інформації з метою досягнення або збереження певного стану системи в умовах несталого комплексу умов проведення операції.

Множина допустимих стратегій U може видозмінюватися в процесі надходження поточної та прогнозної інформації. Як реакція на інформацію, що надходить, і прогноз розвитку операції система технічного обслуговування може змінювати мету свого функціонування.

У цьому разі згідно з концепцією адаптивізації раціональною слід вважати таку адаптивну стратегію $u(t)$ з множини $U(t, \tau)$, яка забезпечує, наприклад, виконання умови:

$$W_t(u^*(t), \tau) \geq W^{rq}(u(t), \tau), u(t) \in U(t, \tau), \tag{7}$$

де t — час; τ — упередження прогнозу. Запис W_t означає, що показник ефективності може змінюватися в часі.

Концепція адаптивізації призводить до цілеспрямованої та гнучкої логіки дій у системі технічного обслуговування.

У рамках концепції адаптивізації раціональна поведінка системи технічного обслуговування вантажних суден організовується відповідно до таких основних принципів вибору критеріїв ефективності.

1. Принцип селекції. На кожному кроці багатоетапного процесу прийняття рішень цей принцип передбачає добір (селекцію) кількох рішень, близьких до найкращих. Потім із цих рішень слід сформуванати низку комбінацій і на наступному етапі ухвалення рішень відібрати кілька комбінацій.

2. Принцип свободи вибору рішень. Цей принцип може бути реалізовано під час організації поведінки систем, здатних до самоорганізації (яким властива *L*-якість). Свобода вибору тут полягає в можливості перегляду, уточнення раніше ухваленого рішення залежно від поточної інформації.

3. Принцип самонавчання. Згідно з цим принципом, адаптивна поведінка системи забезпечується в процесі багаторазових зовнішніх впливів на систему, запам'ятовуванням реакцій на ці впливи і результатів реагування, а також коригуванням реакцій, спрямованим на підвищення ефективності поведінки системи технічного обслуговування. Накопичувану інформацію в процесі самонавчання використовують для вдосконалення критерію ефективності.

4. Принцип прогнозування та аналізу ризиків. Цей принцип вимагає інтеграції аналітичних інструментів для оцінки майбутніх станів системи та потенційних ризиків. Використання моделей прогнозування та аналізу ризиків дає змогу передбачити можливі неполадки та вживати профілактичних заходів до їх виникнення, зменшуючи тим самим ймовірність непередбачених збоїв.

5. Принцип модульності та гнучкості. Цей принцип передбачає створення системи з можливістю легкої адаптації та модифікації її компонентів. Модульність дає змогу швидко й ефективно реагувати на зміни в експлуатаційних вимогах і технологічних процесах, спрощуючи процес обслуговування та модернізації системи.

6. Принцип інтеграції даних і технологій. Цей принцип має містити використання сучасних технологій збирання, оброблення та аналізу даних для поліпшення процесу ухвалення рішень. Інтеграція даних з різних джерел і їх аналіз за допомогою передових предиктивної і прескриптивної аналітики, алгоритмів машинного навчання і штучного інтелекту допоможе підвищити точність і ефективність системи технічного обслуговування.

7. Принцип стійкості та екологічної відповідальності. З огляду на важливість стійкості в сучасному світі, цей принцип підкреслює необхідність мінімізації екологічного впливу системи обслуговування. Включення екологічних критеріїв у процес ухвалення рішень сприяє розробленню більш екологічно чистих та енергоефективних процесів обслуговування.

Поєднання цих принципів дало змогу розробити прескриптивну систему технічного обслуговування, здатну до самонавчання і самостійної адаптації, передбачення і запобігання потенційним проблемам, гнучких реакцій на мінливі умови і потреби, а також удосконалення своїх процесів, забезпечуючи безперервне поліпшення якості та ефективності технічного обслуговування.

Класифікацію критеріїв ефективності наведено на рис. 2. Найважливішим положенням, якого завжди слід дотримуватися під час вибору критерію ефективності операції технічного обслуговування, є узгодження мети операції та критерію ефективності.

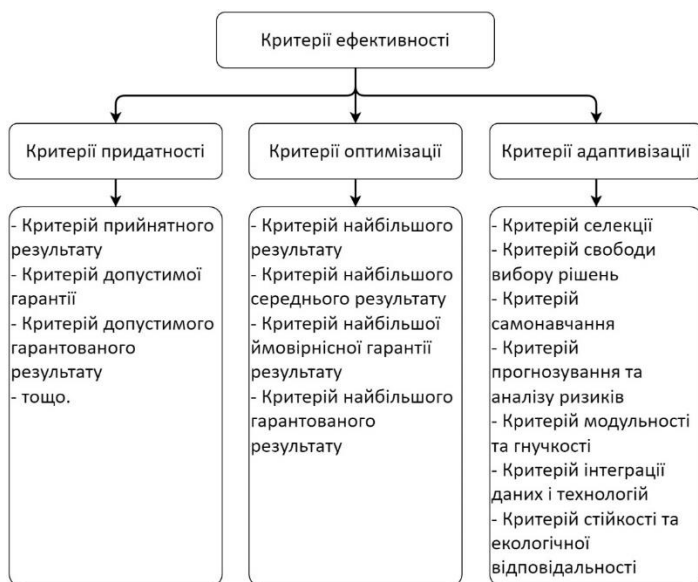


Рисунок 2 – Класифікація критеріїв ефективності

На завершальному етапі формування системи прескриптивного технічного обслуговування вантажного судна складаються адаптивні стратегії (плани виконання) різних видів і форм технічного обслуговування. Ці стратегії базуються на визначеному обсязі робіт, наявності кваліфікованого персоналу та матеріально-технічного забезпечення процесу технічного обслуговування вантажного судна. Під час практичної реалізації цих планів прескриптивного технічного обслуговування необхідно проводити їхнє постійне коригування, фіксувати дані про інциденти, прогнозувати потенційні збої та розробляти заходи щодо їх запобігання у майбутньому.



Рисунок 3 – Схема взаємозв'язків основних програмних модулів системи «Комплексного прескриптивного технічного обслуговування» вантажних суден при керуванні якістю системи технічного обслуговування вантажного судна

На рис. 3 представлена схема взаємодії програмних модулів системи «Комплексного прескриптивного технічного обслуговування» вантажних суден, що забезпечує управління якістю системи технічного обслуговування для конкретного вантажного судна.

Для дослідження ефективності та співставлення результатів для суднових технічних засобів і конструкцій вантажних суден зручніше користуватися безрозмірними величинами, тобто координатною системою $w(t) - E$ (питомі витрати - ефективність використання ресурсів); графічна інтерпретація розв'язання задачі представлена на Рисунку 4, який ілюструє результати розрахунку представлені у Таблиці 1.

Питомі витрати за цикл $w(t)$ є нормованою величиною, до того ж нормувальний множник для суднових технічних засобів являє собою величину планових витрат за цикл експлуатації, що дорівнює за тривалістю напрацюванню на відмову [14]. Величина E ефективності використання ресурсів, також нормується відповідним нормувальним множником.

Таблиця 1 – Результати розрахунку нормованих показників питомих витрат та ефективності використання ресурсів

Позначення стратегії ТО	Питомі витрати - $w(t)$	Ефективність використання ресурсів - E
A_1	0,4916	0,4887
A_2	0,6245	0,4358
A_3	0,6587	0,6324
A_4	0,3884	0,6952

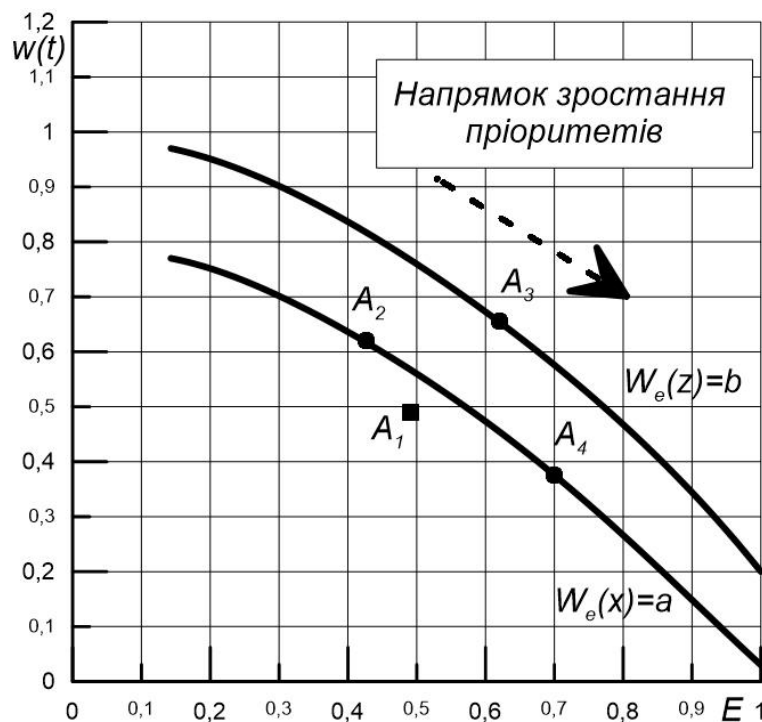


Рисунок 4 – Графічна інтерпретація результатів вирішення задачі підвищення ефективності

Аналіз Рисунка 4 демонструє, що у порівнянні стратегій $A_2 - A_4$ системи «Комплексного прескриптивного технічного обслуговування» із стратегією регламентного технічного обслуговування A_1 , найкращим варіантом є рішення, що призводить до підвищення ефективності та скорочення витрат. Якщо вибирати між рішеннями A_3 і A_4 , то кращим є рішення A_4 , проте необхідно визначити переважання приросту ефективності над приростом

витрат, як про це було сказано вище. При співставленні стратегій A_4 і A_1 відмічається зниження питомих витрат на 20,9 % у сукупності із підвищенням ефективності використання ресурсів на 29,7 %.

Для суднових технічних засобів у статті [15] пропонувалося кількісно оцінювати ефективність переходу на технічне обслуговування і ремонт за станом за збереження ймовірності запобігання відмов системою технічного обслуговування. Цей підхід дозволяє оцінювати ефективність переходу не тільки на прескриптивне технічне обслуговування, а також на технічне обслуговування і ремонт за станом, враховуючи одночасні зміни не лише тривалості циклу експлуатації, але й ймовірності запобігання відмов.

Ухвалення ефективного рішення багато в чому залежить від наявності та якості інформації про фактичну надійність та змін у неї, а також про фактичні витрати. Необхідно зазначити, що для того, щоб система комплексного прескриптивного технічного обслуговування наповнилася сучасним змістом, необхідно, щоб вона включала низку додаткових компонентів. До них відносяться:

1. Ідентифікація видів відмов для збереження функцій, які впливають на функціонування;
2. Розташування необхідного обладнання на основі аналізу пріоритетів;
3. Вибір практично застосовних та ефективних завдань технічного обслуговування, які зберігають і відновлюють функції.

Отже, необхідно, щоб система комплексного прескриптивного технічного обслуговування визначала пріоритети відповідно до потреб у технічному обслуговуванні та фокусувала ресурси судна на завданнях, які спрямовані на підвищення надійності судна. В цьому контексті можуть бути рекомендовані критерії оцінки для насичення новим змістом системи комплексного прескриптивного технічного обслуговування:

1. Які функції та пов'язані з ними необхідні стандарти функціонування судна та його технічних засобів в умовах експлуатації?
2. В яких випадках відмова будь-якого елемента може призвести до втрати ним функцій, функцій технічного засобу і функцій судна?
3. Які є причини кожної функціональної відмови?
4. Які прояви супроводжують кожну відмову (її прояв)?
5. Які наслідки має кожна відмова (її наслідки)?
6. Які заходи слід вжити для передбачення або запобігання кожній відмові (профілактичні завдання, їх перелік, локації та терміни виконання)?
7. Якщо відповідне профілактичне завдання неможливо знайти (не можна виконати необхідні дії), то яким чином слід діяти?

Таким чином створення сучасної системи технічного обслуговування починається з визначення переліку функцій, які необхідно забезпечити. З урахуванням того, що ці функції мають бути розподілені за пріоритетом відповідно до наслідків втрати функціонування, з одного боку, необхідний збір фактичної інформації про наслідки відмов, а з іншого - має існувати можливість зміни пріоритету функцій самим обслуговуючим персоналом.

Говорячи про обсяг оперативної інформації, варто зазначити, що він безумовно збільшиться. Однак сама система технічного обслуговування охоплює фактично всі компоненти системи діагностики та прийняття рішень. Це скоротить час на пошук несправностей і зменшить кількість помилок, зокрема в складних об'єктах.

Висновки. З урахуванням вище зазначених розроблених методик та структур систем моніторингу, можна сформулювати такі висновки:

1. Сформовано підхід до розробки комплексної прескриптивної системи технічного обслуговування вантажних суден. Використання такої системи дозволяє підвищити якість обслуговування та зменшити витрати на технічне утримання суден.

2. Аналіз результатів показує, що ухвалення ефективного рішення знижує питомі витрати на 20,9% у порівнянні з базовою стратегією, при цьому підвищуючи ефективність використання ресурсів на 29,7%. Важливими аспектами є узгодження мети операції технічного

обслуговування з критерієм ефективності, а також адаптивність стратегій до змінних умов та потреб.

3. Сучасна система технічного обслуговування має включати додаткові компоненти, такі як ідентифікація видів відмов та аналіз пріоритетів розташування обладнання. Побудова такої системи починається зі збору інформації про функції та їхні пріоритети, а також з можливості зміни пріоритетів в майбутньому.

Результати цього дослідження є суттєвими і важливими для галузі водного транспорту та сприятимуть покращенню безпеки та надійності судноплавства. У цілому, стаття надає поглиблене розуміння шляхів розвитку і впровадження системи комплексного прескриптивного технічного обслуговування вантажних суден і відмічає, важливість цих кроків у напрямку підвищення надійності та ефективності морського транспорту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Lazakis, I., Turan, O., & Aksu, S. (2010). Increasing ship operational reliability through the implementation of a holistic maintenance management strategy. *Ships and Offshore Structures*, 5(4), 337–357. <https://doi.org/10.1080/17445302.2010.480899>
2. Jimenez, V. J., Bouhmala, N., & Gausdal, A. H. (2020). Developing a predictive maintenance model for vessel machinery. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 5(4), 358–386. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2020.03.003>
3. Manea, E., Militaru, C., Remus, Z., & Chițu, M.G. (2015). Improving Organizational Performance Through the Application of Integrated Management Systems in Maintenance Activities in the Shipyards. *Constanta Maritime University Annals*, 24.
4. Animah, I., & Shafiee, M. (2019). Maintenance strategy selection for critical shipboard machinery systems using a hybrid AHP-PROMETHEE and cost benefit analysis: a case study. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 20(5), 312–323. <https://doi.org/10.1080/20464177.2019.1572705>
5. Kandemir, C., & Çelik, M. (2017). Determining shipboard integration requirements of maintenance 4.0 concept in marine engineering. *Journal of Business, Economics and Finance*, 5(1), 34–40. <https://doi.org/10.17261/pressacademia.2017.568>
6. Emovon, I. (2016). Ship system Maintenance Strategy selection based on DELPHI-AHP-TOPSIS Methodology. *World Journal of Engineering and Technology*, 04(02), 252–260. <https://doi.org/10.4236/wjet.2016.42024>
7. Finch, B. J., & Gilbert, J. P. (1986). Developing maintenance craft labor efficiency through an integrated planning and control system: A prescriptive model. *Journal of Operations Management*, 6(3–4), 449–459. [https://doi.org/10.1016/0272-6963\(86\)90016-1](https://doi.org/10.1016/0272-6963(86)90016-1)
8. Emovon, I., Norman, R., & Murphy, A. J. (2015). Hybrid MCDM based methodology for selecting the optimum maintenance strategy for ship machinery systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29(3), 519–531. <https://doi.org/10.1007/s10845-015-1133-6>
9. Mi, S., Feng, Y., Zheng, H., Li, Z., Gao, Y., & Tan, J. (2020). Integrated Intelligent Green Scheduling of Predictive Maintenance for Complex Equipment based on Information Services. *IEEE Access*, 8, 45797–45812. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2977667>
10. Šlaichová, E., & Marsikova, K. (2013). The effect of implementing a maintenance information system on the efficiency of production facilities. *Journal of Competitiveness*, 5(3), 60–75. <https://doi.org/10.7441/joc.2013.03.05>
11. Golovan, A., Gritsuk, I., Rudenko, S., Saravas, V., Shakhov, A., & Shumylo, O. (2019). Aspects of Forming the Information V2I Model of the Transport Vessel. In *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. <https://doi.org/10.1109/mees.2019.8896595>
12. Golovan, A., Gritsuk, I., and Honcharuk, I., “Reliable Ship Emergency Power Source: A Monte Carlo Simulation Approach to Optimize Remaining Capacity Measurement Frequency for Lead-Acid

- Battery Maintenance,” SAE Int. J. Elect. Veh. 13(2):2024, doi:10.4271/14-13-02-0009 <https://doi.org/10.4271/14-13-02-0009>
13. Golovan, A., Gritsuk, I., Honcharuk, I. (2023). Principles of transport means maintenance optimization: equipment cost calculation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 077 – 084. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-5/077>
14. Golovan, A., Gritsuk, I., Kurtsev, M., Ischuka, O., & Vrublevskyi, R. (2020). Aspects of remote monitoring of the transport vessel under operating conditions. In *Lecture notes in intelligent transportation and infrastructure*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_37
15. Golovan, A., Honcharuk, I., Deli, O., Kostenko, O., & Nykyforov, Y. (2021). System of Water Vehicle Power Plant Remote Condition Monitoring. *IOP Conference Series*, 1199(1), 012049. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1199/1/012049>

REFERENCES

1. Lazakis, I., Turan, O., & Aksu, S. (2010). Increasing ship operational reliability through the implementation of a holistic maintenance management strategy. *Ships and Offshore Structures*, 5(4), 337–357. <https://doi.org/10.1080/17445302.2010.480899>
2. Jimenez, V. J., Bouhmala, N., & Gausdal, A. H. (2020). Developing a predictive maintenance model for vessel machinery. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 5(4), 358–386. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2020.03.003>
3. Manea, E., Militaru, C., Remus, Z., & Chițu, M.G. (2015). Improving Organizational Performance Through the Application of Integrated Management Systems in Maintenance Activities in the Shipyards. *Constanta Maritime University Annals*, 24.
4. Animah, I., & Shafiee, M. (2019). Maintenance strategy selection for critical shipboard machinery systems using a hybrid AHP-PROMETHEE and cost benefit analysis: a case study. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 20(5), 312–323. <https://doi.org/10.1080/20464177.2019.1572705>
5. Kandemir, C., & Çelik, M. (2017). Determining shipboard integration requirements of maintenance 4.0 concept in marine engineering. *Journal of Business, Economics and Finance*, 5(1), 34–40. <https://doi.org/10.17261/pressacademia.2017.568>
6. Emovon, I. (2016). Ship system Maintenance Strategy selection based on DELPHI-AHP-TOPSIS Methodology. *World Journal of Engineering and Technology*, 04(02), 252–260. <https://doi.org/10.4236/wjet.2016.42024>
7. Finch, B. J., & Gilbert, J. P. (1986). Developing maintenance craft labor efficiency through an integrated planning and control system: A prescriptive model. *Journal of Operations Management*, 6(3–4), 449–459. [https://doi.org/10.1016/0272-6963\(86\)90016-1](https://doi.org/10.1016/0272-6963(86)90016-1)
8. Emovon, I., Norman, R., & Murphy, A. J. (2015). Hybrid MCDM based methodology for selecting the optimum maintenance strategy for ship machinery systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29(3), 519–531. <https://doi.org/10.1007/s10845-015-1133-6>
9. Mi, S., Feng, Y., Zheng, H., Li, Z., Gao, Y., & Tan, J. (2020). Integrated Intelligent Green Scheduling of Predictive Maintenance for Complex Equipment based on Information Services. *IEEE Access*, 8, 45797–45812. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2977667>
10. Šlaichová, E., & Marsikova, K. (2013). The effect of implementing a maintenance information system on the efficiency of production facilities. *Journal of Competitiveness*, 5(3), 60–75. <https://doi.org/10.7441/joc.2013.03.05>
11. Golovan, A., Gritsuk, I., Rudenko, S., Saravas, V., Shakhov, A., & Shumylo, O. (2019). Aspects of Forming the Information V2I Model of the Transport Vessel. In 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). <https://doi.org/10.1109/mees.2019.8896595>
12. Golovan, A., Gritsuk, I., and Honcharuk, I., “Reliable Ship Emergency Power Source: A Monte Carlo Simulation Approach to Optimize Remaining Capacity Measurement Frequency for Lead-Acid

- Battery Maintenance,” SAE Int. J. Elect. Veh. 13(2):2024, doi:10.4271/14-13-02-0009 <https://doi.org/10.4271/14-13-02-0009>
13. Golovan, A., Gritsuk, I., Honcharuk, I. (2023). Principles of transport means maintenance optimization: equipment cost calculation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 077 – 084. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-5/077>
14. Golovan, A., Gritsuk, I., Kurtsev, M., Ischuka, O., & Vrublevskyi, R. (2020). Aspects of remote monitoring of the transport vessel under operating conditions. In *Lecture notes in intelligent transportation and infrastructure*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_37
15. Golovan, A., Honcharuk, I., Deli, O., Kostenko, O., & Nykyforov, Y. (2021). System of Water Vehicle Power Plant Remote Condition Monitoring. *IOP Conference Series*, 1199(1), 012049. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1199/1/012049>

Golovan A.I.

IMPACT OF A COMPLEX PRESCRIPTIVE SYSTEM AND DIGITAL STRATEGIES ON THE EFFICIENCY OF THE CARGO SHIP MAINTENANCE SYSTEM

The article addresses the important issue of forming and studying the impact of an integrated prescriptive system and digital strategies on the efficiency of the cargo ship maintenance system. The author analyzes recent research and publications in this area, which indicate the need to develop new strategies and methods for managing the efficiency of maintenance systems and implement them in the operation of cargo ships to improve the efficiency of cargo ship maintenance systems.

The purpose of the study is to evaluate and analyze the impact of integrating a complex prescriptive maintenance system and digital strategies on the efficiency of the cargo ship maintenance system. The objective of the article is to identify the advantages and possible limitations of the proposed approach, as well as to establish practical recommendations for improving the process of cargo ship maintenance using modern digital technologies and prescriptive decision theory. The article also considers the scheme of interconnections of the main program modules of the "Integrated Prescriptive Maintenance" system for cargo ships in the quality management of the cargo ship maintenance system.

The results of the article include an analysis that shows that making an effective decision reduces unit costs by 20.9% compared to the baseline strategy, while increasing the efficiency of resource use by 29.7%. The findings emphasize the importance of aligning the goal of the maintenance operation with the performance criterion, as well as the adaptability of strategies to changing conditions and needs. The results of this study are significant and important for the water transport industry and will certainly contribute to improving the safety and reliability of shipping.

Keywords: *integrated prescriptive system, maintenance efficiency, digital strategies, cargo ships, improving shipping reliability, operational process management.*