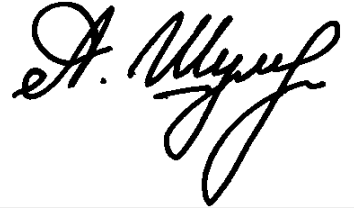


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Одеська морська академія»

ШУМИЛО Олександр Миколайович



УДК 656.61:629.5.083.7

**МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ РОЗМІРНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ
ПАСАЖИРСЬКИХ СУДЕН ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЇХ
ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

Спеціальність – 05.22.20 Експлуатація та ремонт засобів транспорту

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Одеса – 2025

Дисертацією є рукопис.

Дисертація виконана в Одеському національному морському університеті.
Робота виконана самостійно.

Офіційні опоненти: **САГІН Сергій Вікторович**,
доктор технічних наук, професор, завідувач
кафедри суднових енергетичних установок
Національного університету «Одеська морська
академія» МОН України

ЩЕДРОЛОСЄВ Олександр Вікторович,
доктор технічних наук, професор, завідувач
кафедри суднобудування та ремонту суден
Херсонського навчально-наукового інституту
Національного університету кораблебудування
імені адмірала Макарова

ЗІНЧЕНКО Сергій Георгійович,
доктор технічних наук, начальник відділу
управління якістю Державного підприємства
«Класифікаційне товариство «Регістр
судноплавства України» Міністерства розвитку
громад та територій України,

Захист відбудеться 16 вересня 2025 року о 10-й годині, на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 41.106.01, в Національному університеті «Одеська морська академія» за
адресою: 65052, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 8, корпус 1, зала засідань вченої ради.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету
«Одеська морська академія» за адресою: 65052, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 8, та за
електронною адресою: <http://www.onma.edu.ua/zakhist-dissertatsiy>

Автореферат розісланий 12 серпня 2025 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
д.т.н., професор



Нікольський В.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. Морська круїзна галузь за останні десятиліття демонструє стаке зростання. Кількість пасажирів, за даними Всесвітньої круїзної асоціації, досягла понад 32 мільйони, що вказує на перспективність розвитку цього напрямку світового судноплавства. Разом з тим, середній вік суден світового круїзного флоту збільшується. У суден, що вже перебувають в експлуатації, крім фізичного (технічного) старіння, виділяється чітка тенденція морального (економічного) старіння, яке проявляється в зменшенні ефективності експлуатації, обмеженні можливості збільшення пасажиропотоку суден компанії, як наслідок – недоотримання і зменшення фактичних і потенційних доходів. Слід зазначити, що вимоги щодо безпеки, екологічності, комфортабельності суден постійно зростають і частині лайнерів їм складно відповідати. Таким чином, з часом для діючих круїзних суден ефективність експлуатації за комплексними показниками економічності, функціональності, екологічності і безпеки знижується, фактичні прибутки, що отримує судноплавна компанія в процесі своєї основної діяльності, від його експлуатації, незмінно падають, що свідчить про *актуальність* теми дослідження.

Ефективність пасажирських суден може бути підвищено, з огляду на їх комерційну експлуатацію, головним чином за рахунок такого показника як прибуток. Підвищення прибутку (ефективності) досягається або зростанням доходів, яке здійснюється підвищенням вартості послуг (білетів на круїз й інших сервісів), або зменшенням витрат. Враховуючи високу конкуренцію на цьому ринку, можливості збільшення вартості – обмежені, а зменшення витрат без зниження якості – неможливе.

Можливості збільшення доходів обмежені. Це цілком природний ринковий процес в наданні круїзних послуг, який обумовлений багатьма факторами: введенням в експлуатацію нових, більш сучасних круїзних лайнерів, та зниження, відповідно, привабливості суден, які вже знаходяться в експлуатації; сучасними запитами користувачів щодо об'єму, різноманіття та якості круїзних послуг та інше. На даний час, не існує науково-обґрунтованих способів істотного зниження темпів падіння дохідності (тобто ефективності) суден, які знаходяться в експлуатації.

З іншого боку, протягом життєвого циклу будь-якого судна неминуче збільшуються витрати на його експлуатацію. Витрати збільшуються і на паливо, і на експлуатацію суднової електроенергетичної установки, і на експлуатацію суднових технічних засобів, і на експлуатацію обладнання, яке відноситься до «круїзної» частини судна. Все воно закономірно старіє. На даний час, не існує науково-обґрунтованих способів істотного зниження темпів зростання витрат на експлуатацію судна.

Невирішеність цих проблем обумовлює те саме *наукове протиріччя*, яке не дає можливість збільшити терміни, в яких судно буде залишатися конкурентоспроможним. У певний час його життєвого циклу прибуток від

експлуатації круїзного судна падає настільки, що встає питання, щодо доцільності її продовження.

Питанням підвищення (відновлення) ефективності суден поділялась значна увага в роботах В.О. Некрасова, В.О. Яровенка, В.В. Будашка, С.В. Сагіна, С.І. Горба, О.А. Онищенко, Я.Б. Волянської, І.А. Грицука, В.А. Шевченка, Л.М. Ногіда, В.В. Ашіка, А.В. Броннікова, Ю.М. Кулібанова, А.А. Гундобіна, Ю.М. Фінкеля, М.Б. Сліжевського, А.М. Підсушного, І.М. Петрова, Ф.М. Кацмана, Y. Okumoto, Y. Takeda, Mano M., Okada T., J. Holtrop, G. Mennen, S. Harvald, D. Turnock, P. Oossanen та інших вітчизняних та зарубіжних дослідників.

Для підвищення ефективності пасажирських суден запроваджуються різноманітні напрямки: замовляється будівництво нових суден, що дуже коштовно і потребує тривалого часу; використовується оренда (фрахт) і покупка суден на вторинному ринку, що складно здійснити в умовах зростання круїзного ринку; проводиться ґрунтовна модернізація існуючих суден. Особливе місце у цьому переліку займає саме розмірна модернізація. Вона потребує набагато меншого часу і інвестицій для її реалізації, а за рахунок збільшення кількості пасажирів (і відповідно – доходів) забезпечує відновлення ефективності експлуатації суден на певний період їх життєвого циклу.

Виходячи з існуючої практики розмірної модернізації суден, висувається *гіпотеза*: своєчасне та техніко-економічно обґрунтоване подовження корпусу судна дозволить суттєво підвищити (за рахунок збільшення пасажирів) доходи від його експлуатації, не збільшивши істотно при цьому експлуатаційні витрати. В результаті – на конкретний період часу життєвого циклу судна підвищуються прибуток і рентабельність та відновлюється його конкурентна здатність.

За результатами аналізу проведених досліджень виявлено, що єдиної теоретичної бази збільшення числа пасажирів за рахунок збільшення розмірів судна (проведення розмірної модернізації) не розроблено, окремі теоретичні положення відстають від запроваджених практичних розробок. Науково обґрунтована методологія реалізації цієї гіпотези сприятиме зняттю наголошеного *наукового протиріччя* та підвищенню ефективності експлуатації круїзних лайнерів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дана робота виконана відповідно до Морської доктрини України на період до 2035 року, Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року, Концепції розвитку транспортно-дорожнього комплексу України до 2020 року, переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок, затвердженого Постановою Кабінет Міністрів України від 30 квітня 2024 р. № 476, відповідно до визначених у Законах України пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки та пріоритетних напрямів інноваційної діяльності в Україні. Матеріали дисертаційного дослідження використані в розробці:

– держбюджетної науково-дослідної теми: «Інформаційні системи управління та підтримки прийняття рішень щодо розвитку інфраструктури

морських перевезень в умовах воєнного стану» (Державний реєстраційний номер: 0124U001164, затверджена наказом МОНУ від 27.12.2023 р. за № 1572);

– науково-дослідних тем Одеського національного морського університету: «Підвищення ефективності суднового електрообладнання та засобів автоматики» номер державної реєстрації 0122U201391, (2021-2023 р.р.); «Підвищення ефективності експлуатації суднової енергетичної установки» номер державної реєстрації 0122U001539, (2021-2023 р.р.).

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності експлуатації суден за допомогою розробки науково-обґрунтованої стратегії та методології розмірної модернізації, з урахуванням допустимості відповідних конструктивних змін, та можливостей пропульсивної електроенергетичної установки. Досягнення поставленої мети обумовлює постановку та розв’язання наступних взаємопов’язаних *задач*:

– встановлення можливих шляхів підвищення ефективності експлуатації круїзних суден з аналізом їх суперечностей, та побудова науково-обґрунтованої стратегії модернізації для підвищення їх ефективності за допомогою розмірної модернізації;

– техніко-економічне обґрунтування доцільності, вибору часу у життєвому циклі й кількісних параметрів розмірної модернізації, та розробка науково-обґрунтованої методології модернізації корпусу судна;

– розробка методів оцінки допустимості подовження корпусу у доцільних межах за критерієм загальної подовжньої міцності корпусу суден і місцевої міцності за критерієм забезпечення необхідного рівня характеристик опору втомі їх відповідальних елементів;

– побудова методів оцінки впливу подовження корпусу на морехідні якості, на ефективність роботи пристроїв управління та на енергоефективність суден;

– розробка математичної моделі та методів дослідження перехідних режимів роботи пропульсивних комплексів електроходів круїзного флоту на маневрах;

– розробка методів розрахунку режимних показників та показників якості маневрування електроходів з класичною компоновкою електроенергетичної гребної установки у складі пропульсивного комплексу – для оцінки показників якості маневрування електроходів та навантажень на електроенергетичну установку;

– розробка методів розрахунку режимних показників та показників якості маневрування електроходів з системами активного управління рухом судна та рушійно-кермовими комплексами Azipod у складі пропульсивного комплексу – для оцінки показників якості маневрування електроходів та навантажень на електроенергетичну установку;

– експериментальне підтвердження доцільності своєчасного подовження корпусу електроходу для підвищення ефективності його експлуатації та достовірності розробленої методології модернізації й методів дослідження.

Об'єктом дослідження є процеси управління розмірною модернізацією пасажирських суден з електрорухом з метою підвищення ефективності їх експлуатації.

Предметом дослідження є методологічні основи модернізації суден з науково-технічним обґрунтуванням доцільних змін їх конструктивних параметрів, та вивченням закономірностей впливу цих змін на технічний стан суден, що створює умови для високоефективної їх експлуатації.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі в процесі вирішення поставлених задач були використанні в поєднанні теоретичні, чисельні та експериментальні методи дослідження:

системного аналізу – для техніко-економічного обґрунтування доцільності, вибору часу у життєвому циклі, й кількісних параметрів розмірної модернізації, створення інтегральної моделі обґрунтування розмірної модернізації пасажирського судна;

теорій міцності (в застосуванні до корпусу судна) – для визначення граничного розміру судна і довжини циліндричної вставки (за критерієм загальної міцності) та оцінки опору втомі елементів суднових конструкцій (за критерієм місцевої міцності);

теорії корабля – для визначення впливу морехідних якостей судна на максимальне значення, до якого можливо здійснювати подовження судна;

кореляційного-регресійного аналізу – для визначення параметрів кривої втоми суднових конструкцій при оцінці впливу подовження судна на місцеву міцність його корпусу;

числового (чисельного) аналізу – для розв'язування диференціальних рівнянь при дослідженнях перехідних режимів пропульсивних комплексів, перерахунку параметрів кривих втоми на базі інтегрального підходу в прискореному методі визначення характеристик опору втомі елементів суднових корпусних конструкцій;

індукції та дедукції, системного підходу та положення теорії динамічної подоби – для побудови математичних моделей перехідних процесів в пропульсивних комплексах електроходів;

імітаційного моделювання – для опису перехідних процесів в пропульсивних комплексах електроходів, яке було розроблено автором на мові *JAVA*, при аналізі маневрених характеристик електроходів та візуалізації результатів маневрування.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в одержанні теоретичних положень, наукових і практичних результатів, що використовуються при вирішенні актуальної науково-прикладної проблеми підвищення ефективності експлуатації пасажирських суден з застосуванням розмірної модернізації, яка здійснюється додаванням додаткової секції до існуючої конструкції корпусу, з одночасним забезпеченням вимог економічності, екологічності, безпеки і функціональності судна.

Вперше розроблено:

– науково-обґрунтована стратегія та методологія розмірної модернізації пасажирських суден, в основу якої, на відміну від існуючих окремих процедур модернізації, покладено сукупність методів інтегральної оцінки критеріїв економічної ефективності судна, його функціональності, безпеки судна та судноплавства. Відповідно до системного підходу до процесу модернізації, методи об'єднані у єдину логічну послідовність, що формує ідеологічний базис розмірної модернізації, та дозволяють оцінювати її доцільність, своєчасність, об'єм та ефективність експлуатації модернізованого судна на протязі всього його життєвого циклу;

– метод визначення граничної довжини додаткової вставки, який, на відміну від відомих способів, побудовано на базі інтегральної моделі розмірної модернізації. Особливість методу в тому, що основними критеріями якості обрано економічні показники, та показники, які регламентуються Міжнародною конвенцією SOLAS-74/78, Кодексом забезпечення остійності суден і вимогами Класифікаційних товариств. Метод дає можливість техніко-економічного обґрунтування довжини додаткової вставки з урахуванням необхідності змін у пропульсивній установці, впливу подовження судна на його технічні характеристики, функціональність, безпеку, відповідність критерію енергоефективності EEDI протягом життєвого циклу;

– науково обґрунтовані закономірності впливу подовження судна на його основні технічні показники в умовах експлуатації – розрахункові моменти та перерізуючі сили, ходовість, маневреність, відмінною особливістю яких є врахування додаткових навантажень з боку морського середовища в умовах експлуатації, що дозволяє вже на стадії прийняття рішення щодо доцільності модернізації, поряд з економічними показниками, оцінювати можливі зміни у функціональності суден;

– метод оптимізації довжини додаткової вставки, особливістю якого є те, що в процесі пошуку найкращого економічного рішення, враховуються, як обмеження, показники функціональності та безпеки експлуатації суден. Метод дозволяє відшуковувати розмір додаткової вставки, якій забезпечує найліпші економічні показники подальшої експлуатації пасажирських суден, з урахуванням технічних та екологічних аспектів;

– методи оцінки впливу конструктивної модернізації суден на показники якості виконання маневрених операцій. Особливість методів у тому, що показники якості судна та показники роботи всіх складових суднової електроенергетичної установки, включаючи підрулюючі пристрої та рушійно-кермові комплекси Azipod, оцінюються з урахуванням сумісної їх роботи з корпусом судна, та з урахуванням ефектів їх взаємодії між собою. Методи дають можливість оцінювати здатність електроенергетичної установки щодо забезпечення в умовах експлуатації ефективного та безпечного функціонування модернізованих суден.

Отримало подальший розвиток:

– метод прискореного визначення втомної міцності відповідальних суднових конструкцій, який забезпечує прискорену оцінку характеристик опору

втомі елементів конструкції корпусу судна при його реконструкції і модернізації, який відрізняється від традиційних підвищеною точністю та економічністю;

- математичні моделі перехідних режимів пропульсивних комплексів пасажирських суден, особливою відмінністю яких є те, що вони: включають всі варіанти компоновки електроенергетичної установки; враховують гідродинамічні процеси взаємодії рушіїв з корпусом судна; побудовані з використанням критеріїв динамічної подібності та узагальнених безрозмірних параметрів пропульсивних комплексів. Це дозволяє охоплювати результатами досліджень великий клас суден, проводити широкі узагальнення та прогнозувати поведінку суден на маневрах;

- методи оцінки впливу вітрового навантаження на маневрені властивості суден, відмінною особливістю яких є можливість врахування здатності гребної електроенергетичної установки забезпечити виконання основних маневрів з урахуванням вимог Стандарту маневреності щодо керованості суден;

- методи імітаційного моделювання перехідних режимів пропульсивних комплексів суден з електрорухом на основних експлуатаційних режимах роботи, особливістю яких є можливість кількісної оцінки режимних показників та показників якості маневрування всіх складових частин комплексів з візуалізацією процесу маневрування. Моделі забезпечують можливість дослідження маневрених режимів роботи суден з одночасним контролем показників їх електроенергетичних установок.

Удосконалено:

- сукупність критеріїв оцінки якості експлуатації пасажирських суден, яка суттєво розширена за рахунок включення крім економічних, також й показників технічної ефективності, функціональності та безпеки експлуатації, що забезпечує комплексний підхід до оцінки доцільності та технічної можливості реалізації модернізації;

- методи розрахунку гідродинамічних процесів взаємодії рушіїв, підрулюючих пристроїв та рушійно-кермового комплексу (РКК) з зовнішнім середовищем та з корпусом судна, з урахуванням змін при маневруванні і параметрів управління, і основних розрахункових коефіцієнтів, що дозволяє оцінювати показники маневреності суден на перехідних режимах.

Практичне значення отриманих результатів.

Наукові результати, що були отримані в ході проведених досліджень, покладено в основу побудови низки практичних результатів, які формують систему підтримки прийняття рішень при організації та управлінні модернізацією пасажирських суден. Основні з них:

- методологічні основи модернізації, що розроблені в роботі формують послідовний ланцюжок розрахункових процедур, якій слід покласти в основу організації, управління та контролю технічної реалізації процесу модернізації пасажирських суден. Вони дозволяють оцінювати доцільність, своєчасність та об'єм модернізації. Головними критеріями є економічні показники. Показники функціональності й безпеки судна виконують функції обмежень;

– методи розрахунку загальної міцності корпусу дозволяють розраховувати ступінь впливу подовження судна на його загальну поздовжню міцність, враховуючи умови експлуатації та обов'язкові норми забезпечення міцності (при прогині й перегині), мінімального моменту опору, моменту інерції перетину корпусу;

– метод прискореного визначення характеристик опору втомі елементів корпусних конструкцій (їх граничних напружень) при проведенні відповідних робіт з їх реконструкції створює умови для забезпечення локальної міцності корпусу;

– методи оцінки впливу подовження корпусу на буксирувальний опір та пропульсивний коефіцієнт дають можливість розраховувати основний експлуатаційний показник судна – ходовість. Рекомендації з розрахунку остійності та ефективності стернових пристроїв забезпечують оцінку можливих змін в безпеці судна;

– рекомендації щодо визначення граничної довжини судна за критерієм забезпечення енергоефективності дозволяють визначати мінімальну довжину суден відповідно до нормативно-правових документів Міжнародної морської організації. Процедура враховує етапи та темпи зменшення граничних значення *EEDI* протягом життєвого циклу судна;

– розроблено комплект прикладних програм розрахунку режимів роботи суднових пропульсивних комплексів на основних маневрах. Це дає можливість заздалегідь, при визначенні доцільного ступеню подовження, розраховувати маневрені властивості суден та прогнозувати їх зміни, оцінювати можливості енергетичної установки судна щодо забезпечення його функціональності;

– основні практичні результати досліджень впроваджені у практичну діяльність ТОВ «Морське інженерне бюро», ТОВ «Бюро корабельних інженерів», казенного підприємства «Морська пошуково-рятувальна служба», ТОВ «Євро Граскор», ТОВ «Лема карго сервіс», ТОВ «Марін Техсервіс», Національного університету кораблебудування (м. Миколаїв), Херсонської державної морської академії що дає можливість визначати оптимальну довжину додаткової циліндричної вставки корпусу судна, вплив подовження корпусу на буксирувальний опір та пропульсивний коефіцієнт, комплект прикладних програм розрахунку режимів роботи суднових пропульсивних комплексів на основних маневрах, маневрені характеристики суден і режимні показники пропульсивної установки при виконанні основних маневрів судна, імітаційні моделі, що описують зміни основних характеристик структурних елементів пропульсивної установки.

Теоретичні результати досліджень впроваджені також у навчальний процес в Одеському національному морському університеті при викладанні спеціальних навчальних дисциплін.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційну роботу здобувачем виконано власноручно, без залучення співавторів. Теоретичні визначення, наукові результати і положення, наукові й практичні висновки та рекомендації, які викладені у роботі та виносяться на захист, отримані автором особисто.

Особистий внесок здобувача підтверджується науковими публікаціями, де представлені розроблені стратегія, методологія, методи та моделі розмірної модернізації пасажирських суден. У спільних публікаціях автор має внесок, якій визначає новизну отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційного дослідження пройшли апробацію на 32 Міжнародних та Всеукраїнських науково-практичних конференціях, симпозіумах, семінарах та круглих столах, на чисельних щорічних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Одеського національного морського університету.

Публікації результатів дослідження. За результатами досліджень опубліковано 69 наукових праць серед них: основних 29 наукових праць, у тому числі 1 монографія; 20 публікацій, включених до Переліку наукових фахових видань України; 8 публікацій у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science і Scopus, 27 праць апробаційного характеру; 13 праць, які додатково відображають наукові результати докторської дисертації.

Обсяг і структура роботи. Дисертація складається з анотації, переліку умовних скорочень, вступу, восьми розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний об'єм роботи становить 424 сторінки, де крім основного тексту, містяться 37 таблиць і 116 рисунків. Список використаних джерел містить 321 найменування. Додатки подано на 107 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** визначено важливу науково-технічну проблему підвищення ефективності експлуатації морських пасажирських суден. Обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, окреслено зв'язки дослідження з національними програмами, планами, темами. Виконано аналіз запиту практики, виходячи з якого сформульовані наукові протиріччя, які обмежують і ускладнюють розв'язання проблеми підвищення ефективності експлуатації морських пасажирських суден. Сформульовано мету, завдання дослідження, викладено основні методи досліджень, об'єкт і предмет дослідження. Сформульовано наукову новизну й викладено практичне значення отриманих результатів. Охарактеризовано особистий внесок здобувача, вказано дані про публікації і апробацію результатів дослідження.

У **першому розділі** проведено загальний аналіз стану питання і наведені існуючі проблеми підвищення ефективності експлуатації морських пасажирських суден. Визначені основні проблеми підвищення ефективності експлуатації, що виникають внаслідок зростання кількості пасажирів на круїзних лініях. Неспроможність подолати економічне старіння пасажирських суден не дозволяє судновласникам відновити конкурентоспроможність судноплавних компаній. Висунуто *гіпотезу*, яка покладена в основу наукового дослідження: своєчасне, техніко-економічне обґрунтоване подовження корпусу судна

дозволить на конкретний період часу життєвого циклу судна підвищити *ефективність* його експлуатації.

Відзначається, що підвищення ефективності експлуатації, зменшення впливу економічного старіння, що полягає у невідповідності пасажиромісткості суден даної судноплавної компанії збільшенню попиту на морські круїзи раціонально здійснювати застосовуючи такий різновид модернізації як конверсія, яка проводиться зі збільшенням розміру корпусу, що отримала також назву розмірна модернізація. Проведено систематизацію пасажирських суден, що узагальнено утворюють світовий пасажирський флот, за показниками, місткості (GT, gross tonnage), кількості і віку суден. Виділено п'ять груп суден та обґрунтовано потенційну доцільність розмірної модернізації для трьох груп місткістю від 40000 т до 140000 т.

За результатами аналізу реалізованих проєктів, та виконаних наукових досліджень по збільшенню габаритних розмірів суден встановлено, що ступінь подовження суден змінюється у досить великих межах від 3% до 35% від початкової довжини. Розмір вставки і нової довжини судна не дозволяє стверджувати, що він є оптимальним з позицій економічної ефективності виготовлення і експлуатації. В процесі проведених модернізацій не враховувався вплив і системні вимоги за критеріями забезпечення безпеки та функціональності судна, що спираються на техніко-експлуатаційні, техніко-економічні чинники.

Результати аналізу показують, що єдиної теоретичної бази проведення розмірної модернізації суден не існує, окремі теоретичні положення відстають від запроваджених практичних розробок. Враховуючи всі ці недоліки, створено теоретичні основи розмірної модернізації пасажирських суден – побудована стратегія та методологія модернізації, які сприяють підвищенню ефективності експлуатації суден з забезпеченням вимог економічності, екологічності, безпеки і функціональності.

Для розв'язування цієї проблеми, визначено фактори, що впливають на прийняття рішень щодо доцільності та часу проведення модернізації. Виявлено технічні та економічні показники її ефективності. Відмінною особливістю є те, що процедура модернізації розглядається на протязі всього життєвого циклу судна (а не на окремому його етапі), а за показники її якості запропоновано інтегральну систему показників, які відображають результати технічної та комерційної експлуатації суден й показники безпеки.

Розглянуто фактори, що впливають на визначення граничної (максимально допустимої) довжини судна та встановлено максимально допустимі значення довжин при розмірній модернізації. Поставлена задача щодо розробки методики пошуку найліпших варіантів подовження корпусу, відповідно до інтегральної системи показників.

У другому розділі наведено методи техніко-економічного обґрунтування доцільності розмірної модернізації пасажирських суден та її методологічні основи.

Комплексну оцінку ефективності забезпечення експлуатаційних властивостей судна запропоновано проводити з застосуванням побудови дерева властивостей морехідних якостей, інженерних характеристик судна і показників ефективності експлуатації. Структуровані властивості запропонованого дерева слугують підґрунтям для створення системи проведення розмірної модернізації, першим кроком якої є

формулювання сукупності цілей – дерева цілей і задач, що ними породжуються. Відповідно до поставлених цілей, вони охоплюють основні економічні показники експлуатації суден, критерії функціональності та критерії безпеки технічної експлуатації. Древо цілей формує цілі, підцілі і ту множину завдань, які пов'язані з обґрунтуванням доцільності розмірної модернізації.

Агрегований погляд на основні критерії та умови ефективної розмірної модернізації, з урахуванням основного впливу змін у розмірі та геометрії судна після модернізації, сформував інтегральну модель модернізації круїзного судна при подовженні його корпусу (рис.1), яка характеризує методологію обґрунтування розмірної модернізації. Збільшення розмірів пасажирського судна призводить до збільшення пасажиромісткості, а також таких характеристик судна як *NT* (*net tonnage*, *нетто-тоннаж*), *GT* (*gross tonnage*, *валовий тоннаж*), що у сукупності призводить до зростання як експлуатаційних витрат, так й доходів в процесі комерційної експлуатації судна. Від обсягу збільшення судна залежать інвестиційні витрати, що обумовлює зміни у економічних показниках його експлуатації. З іншого боку, збільшення розміру судна обумовлює необхідність забезпечення усіх вимог щодо безпеки та функціональності в процесі технічної експлуатації судна.

Методологія обґрунтування розмірної модернізації (рис. 1) ґрунтується на інтегральному розгляді усіх характеристик та вимог технічної експлуатації з урахуванням економічних інтересів та ефективності, які формують передумови для реалізації розмірної модернізації.

Виділено основні показники ефективності, які необхідно досягнути при модернізації – економічна ефективність, безпека і функціональність судна. Економічна ефективність повинна бути підвищена, рівень безпеки і функціональності необхідно покращити або забезпечити непогіршення їх показників в установлених межах. Все це вимагає розробки відповідних математичних моделей.

Вихідні дані на модернізацію включають технічні характеристики судна-кандидата на проведення розмірної модернізації, технічні умови, що передбачають опис району плавання, географію маршрутів, технічні характеристики портів, їх пропускну здатність для здійснення суднозаходів, характеристики верфей, які мають технічну спроможність для проведення подовження корпусу, економічні умови, що враховують вартість матеріалів, робіт, прогнозований коефіцієнт інфляції, передбачувану вартість квитків і послуг на борту судна. До складу блок-схеми інтегральної моделі модернізації (рис. 1) входять: підмодель безпеки судноплавства при конверсії його корпусу; підмодель забезпечення функціональності судна; підмодель економічної ефективності судна внаслідок проведення модернізації.

Підмодель безпеки пасажирського судна і судноплавства реалізує ключові умови для її реалізації – умови міцності корпусу, пожежної безпеки, забезпечення остійності, непотоплюваності, рятувальними засобами пасажирів і членів екіпажу, екологічності згідно з нормами Міжнародних конвенції SOLAS-74/78, MARPOL-73/78, Регістру судноплавства.

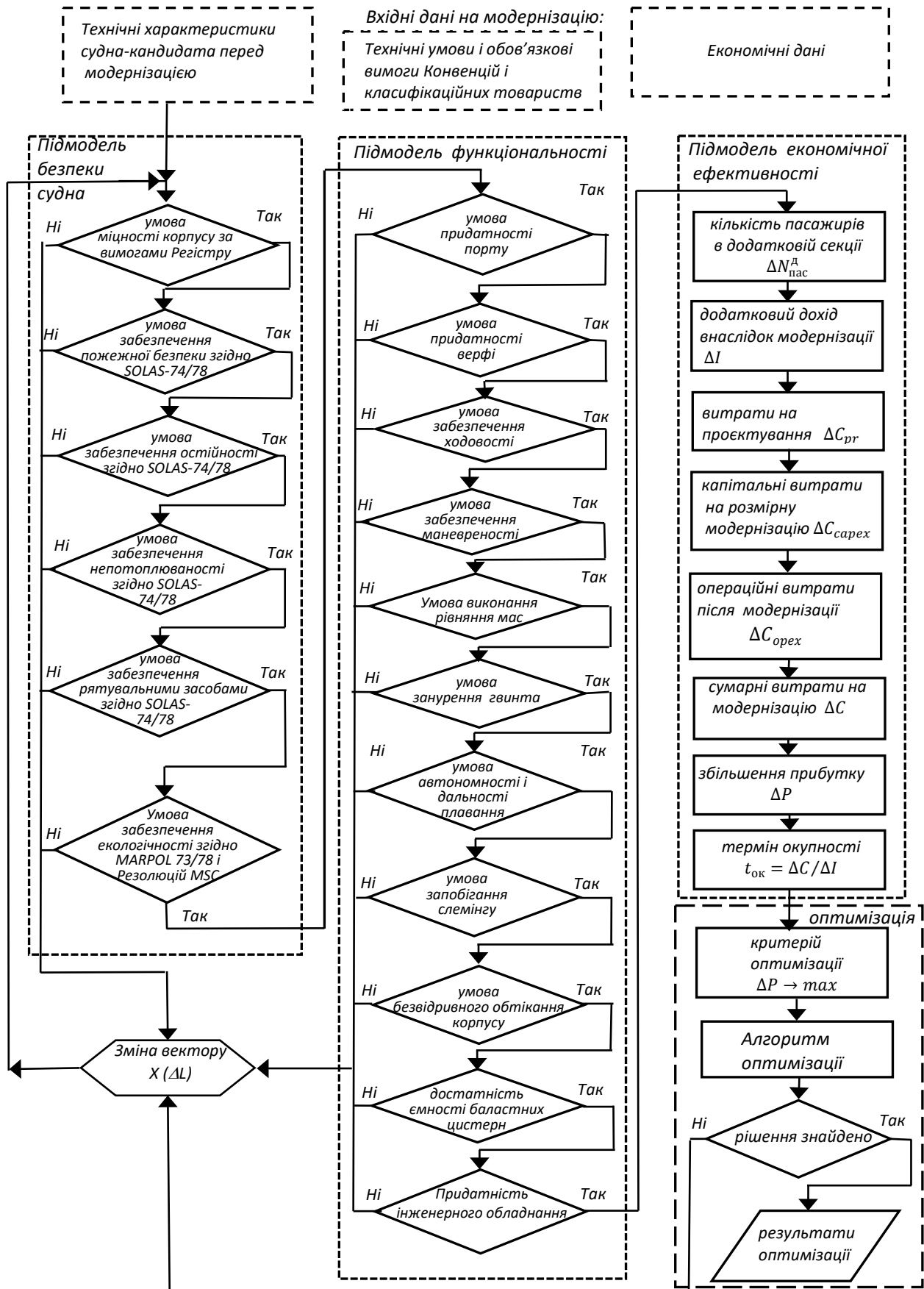


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритму інтегральної моделі модернізації круїзного судна при подовженні його корпусу

Підмодель функціональності враховує здатність судна виконувати експлуатаційні функції. Важливими її вимогами є: умови придатності портів заходу і верфі суднобудівної фірми, яка проводить модернізацію; забезпечення ходовості і маневреності судна; виконання рівняння мас; забезпечення допустимої глибини занурення гребного гвинта; автономності і дальності плавання; недопущення виникнення слемінгу; безвідривності обтікання корпусу; достатність ємності баластних цистерн; придатність інженерного обладнання (основного, допоміжного). Всі умови підмоделей безпеки і функціональності характеризуються і описуються математичними рівняннями, нерівностями, логічними операторами.

Підмодель економічної ефективності виконує головну роль щодо визначення економічних показників діяльності модернізованого судна: доходи; видатки, прибутки. Аналіз цих показників дозволяє прийняти підсумкове рішення щодо нової довжини судна – довжини циліндричної вставки.

Головну роль в процедурах пошуку найліпшого варіанту подовження корпусу виконують економічні показники діяльності модернізованого судна. Показники безпеки й функціональності судна використовуються як обмеження. Оптимізація необхідної довжини судна (блок оптимізація), додаткової кількості кают, пасажирів і членів екіпажу націлена на досягнення максимального значення цільової функції $f(X)$, тобто пошук довжини вставки, яка забезпечить найбільшу ефективність, згідно рівняння

$$f(X) = \langle \Delta P(X) \rangle = \langle \Delta I(X) \rangle - \langle \Delta C(X) \rangle \rightarrow \max, \quad (1)$$

де $\langle \Delta P(X) \rangle$ – середнєрічне значення додаткового прибутку, визначається величиною подовження; $\langle \Delta I(X) \rangle$ – середнєрічне значення додаткового доходу, визначається величиною подовження; $\langle \Delta C(X) \rangle$ – середнєрічне значення додаткових витрат, визначається величиною подовження; X – вектор незалежних змінних, в якому незалежні змінні обмежуються нерівністю виду $x_{\min} \leq X_i \leq x_{\max}$.

До функціональних обмежень відносяться умови, які перераховані в підмоделях безпеки і функціональності судна. Вони записуються у вигляді змінних

$$\alpha_j(X) \leq [A_1; A_2; A_3 \dots A_j \dots \dots A_n] ; \quad \beta_k(U) \leq [B_1; B_2; B_3 \dots B_k \dots \dots B_n],$$

де U – вектор, утворений параметрами (даними) на модернізацію судна; A_j – параметри функції обмежень, що визначаються умовами підмоделей безпеки і функціональності; B_n – параметри вектору U , що утворені вихідними умовами на модернізацію.

Об'єднання в рамках єдиної системи усіх запропонованих вище елементів утворює концепцію обґрунтування розмірної модернізації морських пасажирських суден, яка обумовлює інтегральну оцінку результатів модернізації – за показниками ефективності, функціональності та безпеки. Результати розділу складають ідеологічний базис методології розмірної модернізації морських пасажирських суден, яка побудована на комплексному підході до оцінки доцільності та якості розмірної модернізації суден з врахуванням вказаних показників.

У третьому розділі запропоновано комплекс нових і удосконалених рішень щодо визначення граничної довжини судна і циліндричної вставки при проведенні розмірної модернізації, які ґрунтуються на дотриманні вимог Регістру судноплавства щодо забезпечення загальної поздовжньої міцності і локальної (місцевої) міцності корпусу.

За результатами проведених досліджень знайдено закономірності змін головних силових факторів при зміні довжини судна, та розрахункових навантажень, спричинених дією моря. Це – згинальні моменти та перерізуючі сили у поперечному перерізі мідель-шпангоуту при хвилюванні моря і на тихій воді. Оцінено ступінь зміни хвильових коефіцієнтів, які безпосередньо впливають на ці параметри.

Збільшення ступеню довжини модернізованого судна викликає відповідну реакцію з боку морського середовища. Це безпосередньо впливає на хвильовий коефіцієнт c_w . Дослідження ступеню впливу подовження на коефіцієнт c_w проведено для суден, які є ймовірними кандидатами на проведення розмірної модернізації. Для круїзних суден «Fram» ($L_0=113,7$ м), «Seaborne Odissey» ($L_0=198,1$ м), «Birka Paradise» ($L_0=177,1$ м), при збільшенні довжини на 40%, таке відхилення склало 10,5%. Для судна «AIDA» ($L_0=177,1$ м), при збільшенні довжини на 40%, відхилення складає 9,2%. Для пасажирського судна «Colore Fantasy» ($L_0=177,1$ м) і судна проєкту 1881 ($L_0=205,0$ м) при такому же збільшенні довжини – 8,6%. У круїзних суден «MSC Opera» ($L_0=243$ м) – 4%; «Pride of America» ($L_0=259$ м) – 2,6%. Результати досліджень надані на рис. 2. Вони показують, що у суден, з початковою довжиною 250 м і більше, ступінь зростання хвильового коефіцієнту $\bar{c}_w$ суттєво зменшується.

Запропоновано оцінювати збільшення розрахункового згинального моменту на тихій воді, при подовженні корпусу судна за співвідношенням

$$M_{sw} = M_{sw0} \bar{M}_{sw} = M_{sw0} \left[\frac{M_{sw}}{M_{sw0}} \right] = M_{sw0} \frac{\bar{c}_w (L_0 + \Delta L)^2 (c_{b0} \bar{c}_b + 0,7)}{L_0^2 (c_{b0} + 0,7)}, \quad (2)$$

де M_{sw} – розрахунковий згинальний момент на тихій воді внаслідок подовження судна; M_{sw0} – розрахунковий згинальний момент на тихій воді (унормовується правилами МАКТ) до подовження судна; $\bar{M}_{sw}$ – відносне зростання хвильового моменту при подовженні; c_{w0} – хвильовий коефіцієнт до подовження; $\bar{c}_w$ – відносне збільшення хвильового коефіцієнту; L_0 – довжина судна до подовження; ΔL – довжина циліндричної вставки; c_{b0} – коефіцієнт поздовжньої повноти до подовження; $\bar{c}_b$ – відносне збільшення коефіцієнту поздовжньої повноти внаслідок подовження. Співвідношення (2) дозволяє оцінити вплив початкової довжини судна на розрахунковий згинальний момент на тихій воді. Аналіз змінних складових показує (див. рис. 3), що відносне збільшення розрахункового згинального моменту на тихій воді щільно корелюється між собою: на ділянці подовження $1 \leq (1 + \Delta L/L_0) \leq 1,2$ спостерігається досить тісне співпадіння результатів розрахунків для широкого кола суден з різними довжинами, водотоннажністю і осадками. В середньому згинальний момент збільшиться в 1,61 рази (розсіювання складає 0,05 одиниці). Це свідчить, про те, що відносне збільшення моменту не залежить від початкової довжини судна.

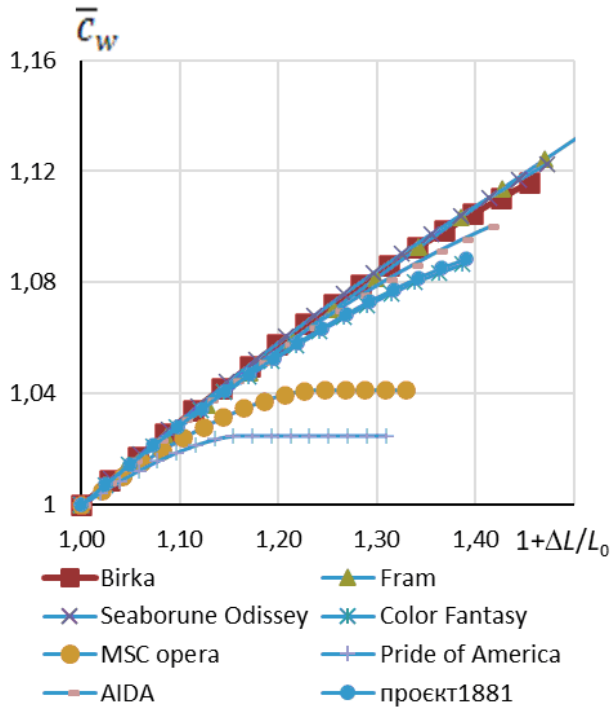


Рисунок 2 – Результати розрахунку хвильового коефіцієнту пасажирських суден в залежності від подовження (у відносних одиницях)

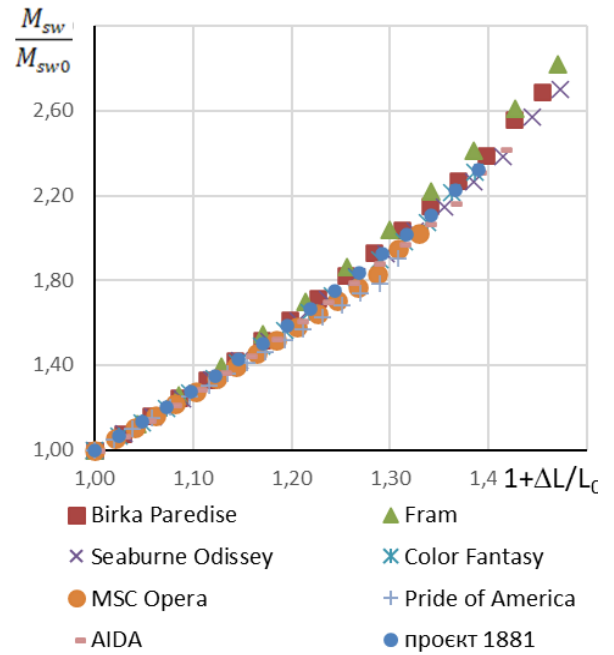


Рисунок 3 – Збільшення відносного розрахункового згинального моменту корпусу суден на тихій воді в залежності від його подовження

Проведено дослідження та отримані закономірності щодо оцінки розрахункового згинального моменту, при подовженні корпусу, в умовах хвилювання моря. Згинальний момент при перегині корпусу

$$M_{wпер} = M_{wпер0} \left[\frac{M_w}{M_{w0}} \right]_{пер} = M_{wпер0} \frac{\bar{c}_w (L_0 + \Delta L)^2 \bar{c}_b}{L_0^2}, \quad (3)$$

при прогині $M_{wпрог} = M_{wпрог0} \bar{M}_{wпрог}$:

$$M_{wпрог} = M_{wпер0} \left[\frac{M_w}{M_{w0}} \right]_{прог} = M_{wпрог0} \frac{\bar{c}_w (L_0 + \Delta L)^2 (c_{b0} \bar{c}_b + 0,7)}{L_0^2 (c_{b0} + 0,7)}, \quad (4)$$

де $M_{wпер}$, $M_{wпрог}$ – розрахунковий згинальний момент при перегині (прогині) внаслідок подовження судна; $M_{wпер0}$, $M_{wпрог0}$ – розрахунковий згинальний момент з перегином (прогином) до подовження судна; $\bar{M}_{wпер}$, $\bar{M}_{wпрог}$ – відносне зростання згинального моменту при подовженні.

Узагальнення результатів досліджень впливу змінних складових надано на рис. 4. Їх аналіз дає підстави щодо наступних висновків. Відносний розрахунковий згинальний момент при перегині корпусу вказаних суден при відносному подовженні $\bar{L} = 1 + \Delta L / L_0 = 1,1$ змінюється в інтервалі 1,3...1,6, при $\bar{L} = 1 + \Delta L / L_0 = 1,2$ – в 1,8...2,3, при $\bar{L} = 1 + \Delta L / L_0 = 1,3$ – в 2,3...3,2. Тобто, зі збільшенням довжини судна розкид значень $[M_w / M_{w0}]$ зростає.

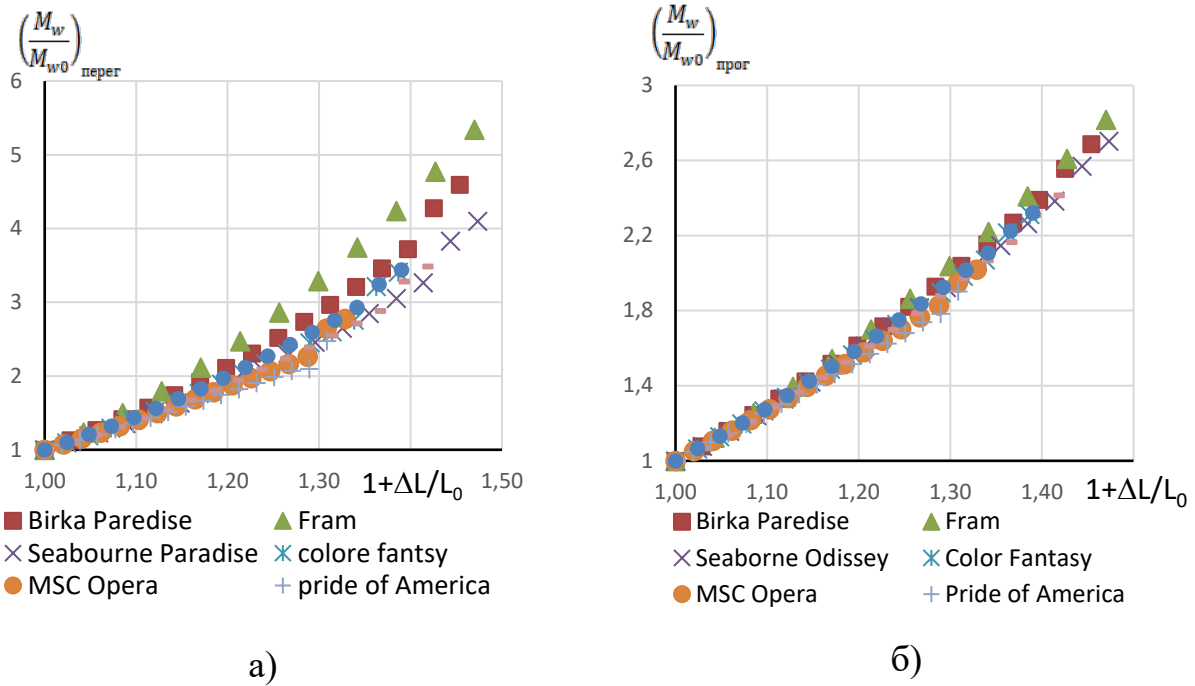


Рисунок 4 – Відносний розрахунковий згинальний момент суден при хвилюванні моря в залежності від його подовження: а) з перегином, б) з прогином корпусу

Разом з тим, при прогині судна (рис. 4 Б) спостерігаються наступні результати – при відносному подовженні $\bar{L} = 1 + \Delta L/L_0 = 1,1$ відношення M_w/M_{w0} змінюється в інтервалі 1,35...1,55, при $\bar{L} = 1 + \Delta L/L_0 = 1,2$ – в 1,55...1,65, при $\bar{L} = 1 + \Delta L/L_0 = 1,3$ – в 1,75 ...2,0.

Таким чином, при прогині суден з різними геометричними (довжина, ширина, осадка, коефіцієнт повноти) та експлуатаційними (гросс-тонаж, пасажиромісткість), характеристиками відносно збільшення згинального моменту знаходиться у вузькому інтервалі значень.

Виходячи з умов забезпечення загальної поздовжньої міцності корпусу судна розроблено метод визначення граничного розміру циліндричної вставки.

За критерій обрано міцність корпусу при: перегині

$$\Delta L_{lim1} = \sqrt{\frac{(W^{fact} + \Delta W^{fact})\sigma_{доп}}{c_w B(C_b(76 + 190\alpha) + 53,2)}} - L_0, \quad (5)$$

прогині

$$\Delta L_{lim2} = \sqrt{\frac{(W^{fact} + \Delta W^{fact})\sigma_{доп}}{c_w B(C_b + 0,7)(76 + 110\alpha)}} - L_0, \quad (6)$$

з забезпеченням мінімального моменту опору

$$\Delta L_{lim3} = \sqrt{\frac{(W^{fact} + \Delta W^{fact})}{c_w B(c_b + 0,7)\eta}} - L_0, \quad (7)$$

і моменту інерції

$$\Delta L_{lim4} = \sqrt[3]{\frac{(I^{fact} + \Delta I^{fact})}{3c_w B(c_b + 0,7)}} - L_0, \quad (8)$$

де W^{fact} , I^{fact} – фактичний момент опору і момент інерції корпусу судна (для палуби і днища відповідно), що визначається за аналізом еквівалентного бруса при його перетині по мідель-шпангоуту, ΔW^{fact} , ΔI^{fact} – ступінь збільшення фактичного моменту опору корпусу і моменту інерції внаслідок можливого підсилення еквівалентного бруса, $\sigma_{доп}$ – допустиме напруження згину.

Отже, максимально допустима довжина вставки, на яку можна збільшити корпус судна визначається співвідношенням

$$\Delta L \leq \min\{\Delta L_{lim1}; \Delta L_{lim2}; \Delta L_{lim3}; \Delta L_{lim4}\} \quad (9)$$

При підготовці та проведенні конструктивної модернізації суден, при визначенні граничних напружень у відповідальних судових конструкціях необхідна їх обов'язкова оцінка на втомну (локальну) міцність. В роботі проведено удосконалення методу прискореного визначення характеристик опору втомі цих конструкцій. Він ґрунтується на застосуванні двох моделей кривих втоми, що підпорядковуються степеневому рівнянню $\sigma^{m_c} \cdot N = \sigma_R^{m_c} N_{GC} = 10^{C_c}$ та рівнянню Вейбулла $(\sigma - \sigma_R)^{m_w} \cdot N = 10^{C_w}$, де σ_R – границя витривалості; σ і N – поточне напруження і відповідна довговічність до руйнування; m_c , m_w , C_c , C_w – параметри, що характеризують кут нахилу кривих і їх початкові абсциси відповідно в координатах $\lg \sigma - \lg N$; $\sigma - \lg N$; $\lg(\sigma - \sigma_R) - \lg N$. Суть цього методу полягає у наступному: партію деталей (зразків) випробовують за стандартною методикою на 4-5 рівнях напружень, за якими будується крива втоми згідно степеневому рівнянню, тобто визначаються параметри m_c і C_c . При цьому границю витривалості визначити неможливо, в той же час вона визначається згідно рівняння Вейбулла $\sigma_R = \sigma - (10^{C_w}/N)^{1/m_w}$, що потребує перерахунку параметрів степеневого рівняння до параметрів m_w і C_w за допомогою застосування інтегрального підходу, реалізованого чисельними методами. Проведено оцінку точності методу, згідно якою здійснено аналіз залежності величини похибки від числа випробуваних зразків, так при руйнуванні 10 зразків похибка складає 2,68%, 20 зразків – 2,15%, 30 зразків – 1,75%, 40 зразків – 1,7%.

Четвертий розділ присвячено проведенню оцінки змін морехідних якостей судна при проведенні розмірної модернізації. Вони регламентуються правилами міжнародних конвенцій і Регістру судноплавства й безпосередньо впливають на безпеку судноплавства, якість експлуатації судна, його економічність та відповідність екологічним вимогам.

Запропоновано удосконалене рівняння ходовості (10), характерною особливістю якого є відокремлення пропульсивної розрахункової потужності до подовження (перший співмножник) і змінної частини потужності, що визначається довжиною вставки (другий співмножник). Такий підхід дає можливість оцінювати вплив саме зміни довжини судна на його ходовість

$$P_{prop} = \frac{0,514 R_{E0} v_s}{\eta_{prop0} \eta_b \eta_{red}} \frac{[\Delta R_E / R_{E0}]}{\bar{\eta}_{prop}} \leq z P_{ME}, \quad (10)$$

де P_{prop} – пропульсивна розрахункова потужність, яка необхідна судну для забезпечення руху зі встановленою швидкістю v_s (у вузлах); η_b – коефіцієнт корисної дії, що враховує втрати в підшипниках валопроводу; η_{red} – коефіцієнт корисної дії, що враховує втрати енергії в редукторі; R_{E0} – опір руху судна в експлуатації до подовження; ΔR_E – зростання опору внаслідок подовження; v – експлуатаційна швидкість судна в м/с; P_{ME} – номінальна (паспортна) потужність головних (тягових) двигунів (в морських круїзних лайнерах це – переважно електричні двигуни), кВт; початкової довжини судна); $\bar{\eta}_{prop}$ – зменшення пропульсивного коефіцієнту в наслідок подовження корпусу, (індекс «0» стосується початкової довжини судна).

Знайдено закономірності впливу збільшення довжини на характер зростання $[\Delta R_E / R_{E0}]$ (табл. 1). При зростанні відносної довжини на 10 %, 20 %, 30 % відносний опір збільшується на 5 %...9%, 10 %...16 %, 14 %...22 % відповідно. Найбільші темпи зростання опору спостерігаються для суден з невеликою довжиною (до 100 м «*Fram*»), найменші – для суден з довжиною понад 250 м – «*Pride of America*».

Таблиця 1 – Зростання відносного опору суден при подовженні корпусів

Назва суден	відносна довжина судна			Назва суден	відносна довжина судна		
	1,10	1,20	1,30		1,10	1,20	1,30
« <i>Pride of America</i> »	1,05	1,1	1,15	« <i>Fram</i> »	1,10	1,22	1,29
« <i>Seabourn Odyssey</i> »	1,07	1,13	1,15	« <i>MSC Opera</i> »	1,05	1,11	1,14
« <i>AIDA</i> »	1,06	1,12	1,16	« <i>Viking star</i> »	1,06	1,11	1,15
« <i>Birka Paradise</i> »	1,07	1,14	1,18	« <i>Caribbean Princes</i> »	1,06	1,12	1,16
« <i>Color Fantasy</i> »	1,08	1,15	1,21	проект 1881	1,07	1,14	1,18

Для оцінки зменшення пропульсивного коефіцієнту запропоновано співвідношення

$$\eta_{prop} = \eta_{k0} \eta_{гв0} \bar{\eta}_k \bar{\eta}_{гв},$$

де η_{k0} – коефіцієнт впливу корпусу, індекс «0» – для неподовженого судна; $\eta_{гв0}$ – ККД гребного гвинта у вільній воді, $\bar{\eta}_k$ і $\bar{\eta}_{гв}$ – коефіцієнти зменшення («погіршення») коефіцієнту впливу корпусу і ККД гребного гвинта у вільній воді внаслідок подовження. Ступінь зменшення пропульсивного коефіцієнту – $\bar{\eta}_{prop} = \bar{\eta}_k \bar{\eta}_{гв}$.

Отримано залежності відносних пропульсивного коефіцієнту (рис. 5), які ґрунтуються на відповідних дослідженнях ККД гвинта $\bar{\eta}_{гв}$, коефіцієнту впливу корпусу, коефіцієнту засмоктування, коефіцієнту попутного потоку від подовження судна у вільній воді. Ступінь впливу різний. Зокрема, при подовженні судна в 1,1 і 1,2 рази, відносний пропульсивний коефіцієнт зменшується в середньому на 2 %...4 % і 6 %...12 %. Тобто, збільшення довжини понад 20 %

призводить до вагомого зменшення пропульсивного коефіцієнту. У той же час, відносний коефіцієнт впливу корпусу збільшується на незначну величину – 1 %...3 %.

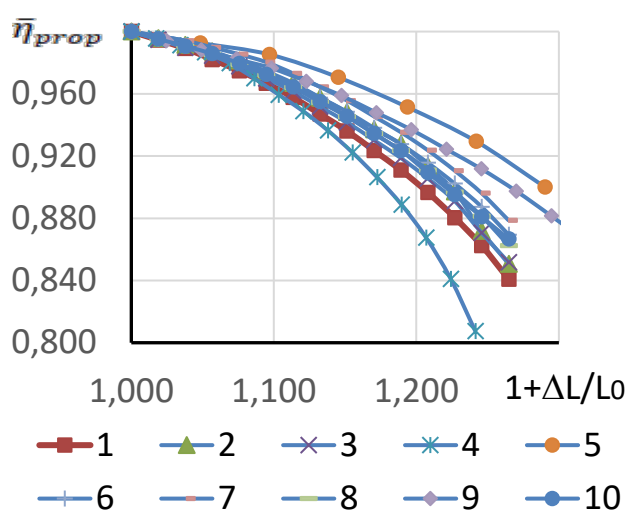


Рисунок 5 – Вплив подовження суден на відносний пропульсивний коефіцієнт, лайнери: 1 – «AIDA»; 2 – «Birka Paradise», 3 – «Color Fantasy», 4 – «Fram», 5 – «MSC Opera», 6 – «Pride of America»; 7 – «Seaborne Odissey»; 8 – «Viking star», 9 – проект 1881, 10 – «Caribbean Princes»

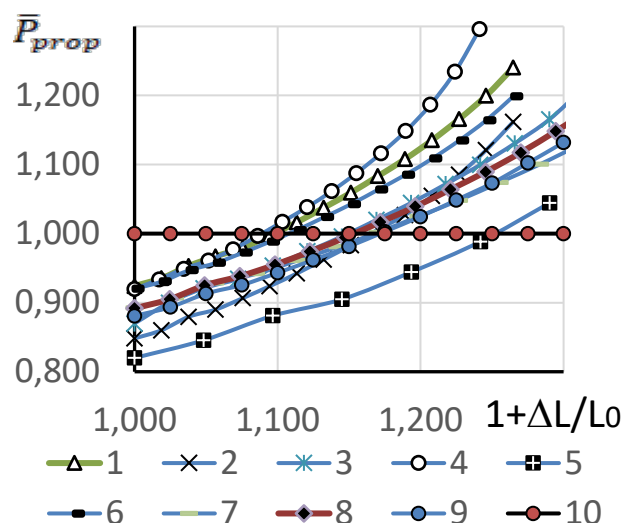


Рисунок 6 – Залежність пропульсивної потужності $\bar{P}_{prop}$ від зміни довжини суден (у відносних величинах) $\bar{P}_{prop} = P_E / z P_{ME}$ лайнери: 1 – «AIDA»; 2 – «Birka Paradise», 3 – «Color Fantasy», 4 – «Fram», 5 – «MSC Opera», 6 – «Pride of America» («Caribbean Princes»); 7 – «Seaborne Odissey»; 8 – «Viking star», 9 – проект 1881, 10 – відносна номінальна потужність тягових двигунів суден

Зміну пропульсивної потужності в залежності від подовження судна запропоновано проводити з застосуванням рівняння ходовості у відносних одиницях $\frac{P_E}{z P_{ME}} \frac{1}{\eta_{prop} \eta_v \eta_{red}} = 1$. Вплив подовження корпусу на пропульсивну потужність $\bar{P}_{prop}$ проілюстровано на рис. 6.

Відносна потужність головних двигунів, при забезпеченні проектної експлуатаційної швидкості судна V_s , представлена рівнянням горизонталі $\bar{u} = \bar{P}_{ME} = 1$ (рис. 6, поз. 10). Цей графік вказує на можливість ступеню подовження суден, виходячи з можливості пропульсивної установки забезпечити рух судна експлуатаційною швидкістю.

Розроблено методику визначення допустимої довжини судна за критерієм ходовості. В основі – графічне розв'язання (рис. 7) рівнянь розрахункової пропульсивної потужності, необхідної для руху судна з встановленою швидкістю (криві 1, 2, 3, 4), і рівняння потужності головних двигунів (крива 5).

Отримані рекомендації дозволяють, в залежності від поставлених цілей: або, за розрахованою пропульсивною потужністю визначати граничне значення відносної довжини судна, при якій забезпечиться паспортна швидкість судна; або, виходячи з заданого подовження корпусу, оцінювати швидкість руху судна (рис. 7). Результат розв'язування визначає найбільшу довжину судна – $x_1 = 1 + \Delta L_1/L_0$. Якщо подовження буде недостатнім, слід змінити експлуатаційну швидкість, визначити нове положення кривої розрахункової пропульсивної потужності і знайти нову довжину $x_2 = 1 + \Delta L_2/L_0$.

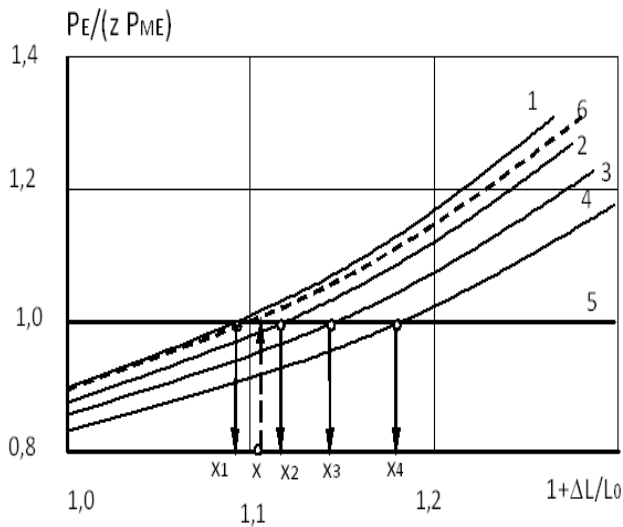


Рисунок 7 – Визначення довжини судна за критерієм забезпечення ходовості: відносна пропульсивна потужність судна:

- 1 – при швидкості V_{S1} ;
- 2 – при швидкості V_{S2} ;
- 3 – при швидкості V_{S3} ;
- 4 – відносна пропульсивна потужність судна при швидкості V_{S4} ;
- 5 – головних двигунів;
- 6 – що забезпечує швидкість V_S , за заданою довжиною. $V_{S1} > V_{S2} > V_{S3} > V_{S4}$.

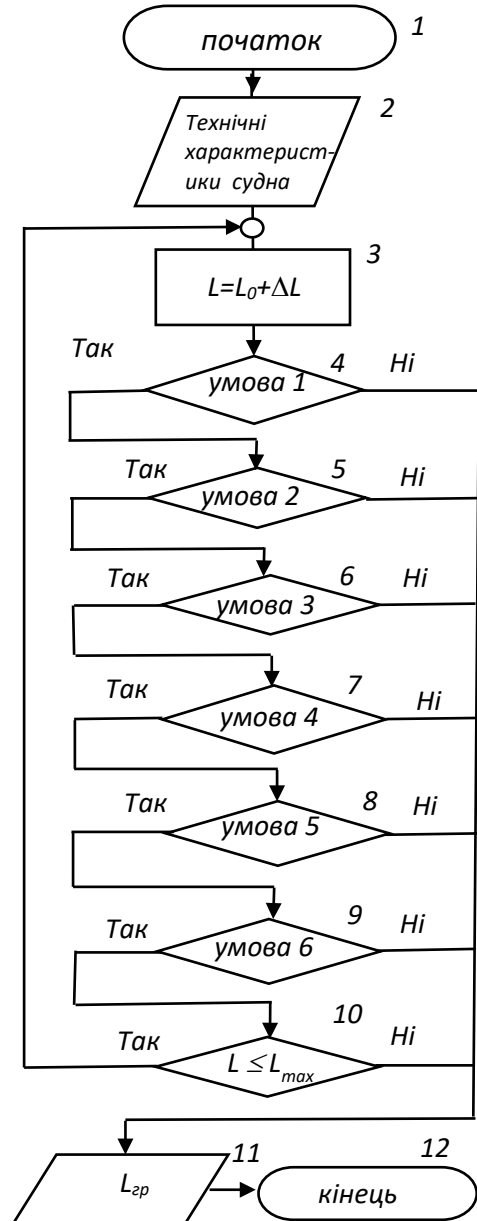


Рисунок 8 – Алгоритм визначення допустимого значення довжини судна за критерієм забезпечення остійності при його подовженні

Запропоновано методику обов'язкової оцінки впливу подовження судна на його остійність. За базову прийнята методика розрахунку остійності, відповідно до норм Конвенції SOLAS-74/78 і Правил класифікації та побудови морських суден.

Удосконалено співвідношення, які описують вказані норми – враховується збільшення: кількості пасажирів (додаткових) при їх розміщенні на верхній палубі; площі вітрильності бокової поверхні (за рахунок додавання циліндричної вставки); зміни метацентричної висоти. Ці норми забезпечуються виконанням умов 1 – 5 алгоритму (рис.8), умова 6 здійснює дотримання вимог щодо неперевищення допустимих значень відносної метацентричної висоти $\bar{h} = (h/B) \leq \bar{h}_{max}$.

Граничне значення довжини судна, при якій забезпечується допустима ефективність його управління, має вид $L_{Er} = \min\{L_{E1}; L_{E2}; L_{E3}\}$.

Для визначення граничного значення довжини судна L_{Er} , при якому забезпечується умова його ефективності для реалізації керованості, запропоновано рішення, процедура розрахунку якого проілюстрована на прикладі пасажирського судна «AIDA» на рис. 9.

Розроблено метод визначення граничної довжини додаткової вставки за ефективністю стернових пристроїв. Метод побудовано з урахуванням рекомендацій Регістру судноплавства, та дозволяє оцінювати допустиму довжину судна, при якій забезпечується ефективність стерна при виконанні маневрених операцій.

Запропоновано методику обов'язкової перевірки модернізованих суден на відповідність критерію енергоефективності EEDI. Відмінною особливістю методики є те, що вона дає можливість визначити граничну довжину судна при якій забезпечується допустимий рівень енергоефективності (коефіцієнту EEDI).

$$L \geq \frac{(\prod_{j=1}^M f_i) (\sum_{i=1}^{n_{DG}} P_{DG_i} C_{FDG_i} SFC_{DG_i}) - ((\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff_i} P_{DG_{eff_i}}) C_{FDG_i} SFC_{DG_i})}{f_i f_c f_l [EEDI] f_w V_{ref} B H a} - \frac{(\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff_i} P_{eff_i} C_{FDG_i} SFC_{DG_i})}{f_i f_c f_l [EEDI] f_w V_{ref} B H a} . \quad (12)$$

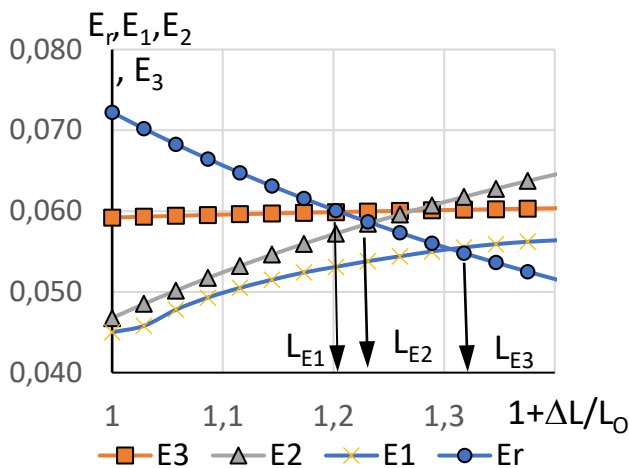


Рисунок 9 – Визначення граничного значення довжини судна за критерієм ефективності стерна: E_1 , E_2 , E_3 – допустимі ефективності стерна згідно вимог Регістру, E_r – розрахункова ефективність стерна

де n_{DG} – число дизель-генераторів, $\sum_{i=1}^{n_{DG}} P_{DG_i}$ – фактична сумарна експлуатаційна потужність дизель-генераторів, $\sum_{i=1}^{n_{DG}} P_{DG_i} = 0,75 MCR_{DG}$, C_{FDG_i} , C_{FDG} , C_{FDG_i} , C_{FDG} – коефіцієнти кореляції (безрозмірні) між витратою палива і кількістю оксиду вуглецю CO_2 при згорянні відповідного виду палива в дизелі, який визначається вмістом вуглецю; SFC_{DG_i} – SFC_{DG_i} питома ефективна для дизель-генераторів, $г/(кВт/год)$, $P_{DG_{eff_i}}$, $P_{DG_{eff_i}}$ – потужність дизель-генераторів, яка генерується з застосуванням енергії відпрацьованих газів;

P_{eff_i} P_{eff_i} – потужність дизель-генераторів, яка генерується інноваційними енергоефективними пристроями; f_j , f_i , f_c , f_{eff_i} , f_w – постійні коефіцієнти, які враховують специфічні конструктивні елементи судна, необхідність обмеження дедвейту, впровадження на судні енергоефективних технологій, погіршенні метеорологічних умов; $[EEDI]$ – допустиме (обмежувальне) значення коефіцієнту енергоефективності; B – ширина судна; H – висота (сумарна) всіх приміщень від дна до найвищої палуби; a – коефіцієнт.

У розділі 5 розроблено математичні моделі й методи дослідження перехідних режимів пропульсивних комплексів пасажирських суден при маневруванні. Сучасне пасажирське судно, це – електрохід. Пропульсивний комплекс електрохода – це система, яка об'єднує багато складових частин з різними фізичними процесами, які в них протікають: електроенергетичну систему; гребну електричну установку (ГЕУ); гребні гвинти; кермо; корпус судна. Сучасні ГЕУ, найчастіше, будуються на базі асинхронних частотно-керованих гребних електродвигунів (ГЕД), та можуть бути виконані за класичним варіантом передавання енергії на рушії, з використанням систем активного управління (САУ) курсом судна (зазвичай – підрулюючи пристрої ПП), та за варіантом рушійно-кормового комплексу Azipod. У свою чергу ГЕУ, входять до складу єдиної електроенергетичної системи, яка забезпечує електроенергією і систему електроруху, і загально-суднових споживачів.

До складу комплексу входять: а) електрогенеруюча система з декількох генераторних агрегатів ГА ($D_1, D_2, \dots, D_n$ – теплові двигуни; $G_1, G_2, \dots, G_n$ – синхронні генератори) з системами розподілу активної і реактивної потужності; б) два (або три) «силових» контурів, у кожному з яких: $SE1, SE2$ – перетворювачі частоти; $M1, M2$ – асинхронні гребні електродвигуни, $P1, P2$ – гребні гвинти; в) носові та кормові підрулюючі пристрої, які включають: SEB і SEA – перетворювачі напруги (для пуску) носового та кормового ПП; ThB и ThA – гвинти носового та кормового ПП; $MThB, MThA$ – приводні електродвигуни ПП; г) стерно – R ; д) корпус судна – ($HULL$).

Математична модель динамічно подібного суднового пропульсивного комплексу включає в себе математичний опис перехідних процесів в кожній його структурній складовій. Враховуючи сучасні системи електроруху й варіанти рушійно-кормових систем та відповідно до поставлених цілей, вона була удосконалена.

Рушійно-кормові комплекси з Azipod виконують функції і рушія і керма. В роботі розроблено математичну модель аналітичного розрахунку корисного упору та моменту опору гребного гвинта. Модель враховує те, що при маневруванні суден змінюються частота обертання гвинта, швидкість натікання води на гребний гвинт та кут повороту Azipod ψ_{Az} . Це призводить до того, що змінюється і вихідний (при осьовому потоці) коефіцієнт навантаження гвинта σ_{T0} , і коефіцієнти упору k_T , і коефіцієнти моменту k_Q . Саме це формує алгоритм розрахунку упору та моменту опору гвинта. В основу розрахунку покладено методику А.Д. Гофмана. На кожному кроці інтегрування системи рівнянь, яка

описує перехідні процеси у пропульсивному комплексі, у математичну модель закладено наступну послідовність розрахунку упору та моменту:

– виходячи з одержуваних значень частоти обертання гвинта n і швидкості потоку рідини v_A яка набігає на гвинт, розраховується поступ гвинта $\lambda_0 = v_A / Dn$ при осьовому потоці;

– розраховуються коефіцієнти упору k_{T0} та моменту k_{Q0} при осьовому натіканні, за допомогою отриманих в роботі аналітичних залежностей

$$k_{T0} = f' \left[\left(\frac{P}{D} \right), \lambda \right]_{\text{та}} 10k_{Q0} = f'' \left[\left(\frac{P}{D} \right), \lambda \right];$$

– після розрахунку P_0 та Q_0 (за відомими співвідношеннями), знаходиться коефіцієнт навантаження гвинта при осьовому натіканні $\sigma_{T0} = (8/\pi) \left(\frac{k_{T0}}{\lambda^2} \right);$

– розраховуються коефіцієнти упору k_R та моменту k_Q в косому потоці води за допомогою отриманих в роботі функціональних залежностей

$$k_R = \xi \left[\left(\frac{P}{D} \right), \psi_{Az}, \sigma_{T0} \right] \quad \text{та} \quad k_Q = \xi' \left[\left(\frac{P}{D} \right), \sigma_{T0} \right];$$

– розраховується корисний упор P_{Az} та момент опору M_{Az}

$$P_{Az} = k_R P_0, \quad \text{та} \quad M_{Az} = k_Q M_0.$$

Гондола РКК Azipod має ще одне призначення. Певною мірою, вона виконує функцію керма, створюючи додатковий керуючий вплив на корпус судна. Це – так зване пасивне кермо. Поділивши умовно кермо на дві частини, одна з якої обтикається водою зі швидкістю струменю v_A а друга – зі швидкістю руху судна v , поперечну силу пасивного керма можна представити як

$$Y_{RAz} = \left(\frac{\partial C_{yR}}{\partial \psi_{Az}} \right)_{\text{isolated_rudder}} \left(\frac{\rho v_A^2}{2} A_R^{\Sigma} \right) \psi_{Az},$$

де градієнт підйомної сили керма може бути, в першому наближенні, прийнятий однаковим для всіх його частин.

Відповідно до теорії управління суден, його рух розглядається по вільній поверхні води у зв'язаній з судном системі координат $GXYZ$, початок якої збігається з центром тяжіння судна G . Площина GXY паралельна основній площині судна, вісь GX розміщується у ніс, вісь GZ – вертикально вгору вісь GY – на правий борт,. Система рівнянь руху судна у цій системі координат представлено у виді складових швидкості руху судна вздовж осей X , Y і швидкості обертання навколо осі Z :

$$\frac{d\overline{v_X}}{dT} = C_{\lambda 2} \overline{v_Y} \overline{\Omega_Z} + N_X \left\{ \sum_j K_{Pj} \overline{P_{Azj}} \cos \psi_{Azj} - \sum_j k_{Pj} C_{RX} \beta_k^* \overline{v^2} - \overline{R_X} \right\}; \quad (13)$$

$$\frac{d\overline{v_Y}}{dT} = -\frac{1}{C_{\lambda 2}} \overline{v_X} \overline{\Omega_Z} + \frac{N_X}{C_{\lambda 2}} \left\{ \sum_j \pm K_{Pj} \overline{P_{Azj}} \sin \psi_{Azj} \pm \sum_j k_{RL} k_{Pj} C_{RY} \beta_k^* \overline{v^2} - \overline{R_Y} \right\}; \quad (14)$$

$$\frac{d\overline{\Omega_Z}}{dT} = -\frac{N_{\Omega}}{N_X} C_{\lambda 21} \overline{v_X} \overline{v_Y} + N_{\Omega} \left\{ \sum_j K_{Pj} h_{Pj} \overline{P_{Azj}} \sin \psi_{Azj} + \sum_j k_{RL} K_{Pj} h_{Pj} C_{RY} \beta_k^* \overline{v^2} + \right. \\ \left. + \sum_j K_{Pj} h_{Pj}^v \overline{P_{Azj}} \cos \psi_{Azj} + (\overline{M_{PZ}} - \overline{M_{DZ}}) \right\}, \quad (15)$$

Рівняння (13)-(15) описують рух судна, побудованого як по варіанту РКК Azipod, так і по класичному варіанту ГЕУ (додаткові символи «Az» в індексі корисного упору лише підкреслюють тип гребної установки).

Перша складова у фігурних дужках правих частин рівнянь (13)-(15) описує сили та момент, які діють на корпус судна від гвинта, або від РКК Azipod. Друга складова – сили та момент сил від керма, або «пасивного керма» – гондоли. Третій доданок рівняння – це додатковий крутний момент від Azipod, за рахунок конструктивного зміщення осі гондоли відносно осі GX . Останні складові – поздовжня $\overline{R_X}$ й поперечна $\overline{R_Y}$ складові опору води руху судна, позиційна $\overline{M_{PZ}}$ та динамічна $\overline{M_{DZ}}$ складові моменту опору повороту.

Поздовжня і поперечна складові сили керма визначаються кутом атаки

$$\beta_{RP} = K_R \beta_R - \chi_C \left(\arctg \beta_{dr} - \varepsilon \frac{\overline{\Omega_Z}}{v} \right), \quad (16)$$

де β_R – кут перекладки керма; χ_C – наведений коефіцієнт впливу корпусу та гвинтів на кермо; $\varepsilon = l_R/L$ (l_R – відстань між кермом та мідель-шпангоутом).

У рівняннях (13) – (15): N_X , N_Ω – критерії динамічної подоби; $C_{\lambda 2}$; $C_{\lambda 21}$; C_{RX} ; C_{11} ; C_{12} ; C_{RY} ; C_{13} ; C_{21} ; C_{22} ; C_{23} ; C_{61} ; C_{62} ; C_{63} ; C_{64} ; C_{65} – узагальнені безрозмірні параметри пропульсивного комплексу; h_{pj} та h_{pj}^y – координати Azipod у системі координат $GXYZ$, відповідно по поперечній (GY) та поздовжньої (GX) осі; C_{RX} і C_{RY} – безрозмірна поздовжня і поперечна сила опору від гондоли. K_{Pj} – частка упору гребного гвинта у сумарному упорі; k_{RL} – коефіцієнт, що позначає розташування Azipod: для правого $k_{RL} = +1$, для лівого $k_{RL} = -1$; β_{dr} – кут дрейфу; β_k^* – місцевий кут дрейфу в косому потоці води в районі гондоли.

Рух судна у нерухомій (непов'язаною із судном) системі координат $OX_1Y_1Z_1$ (описується наступним чином. Поздовжня v_{X1} та поперечна v_{Y1} складові вектору швидкості центру тяжіння судна та його координати X_1 та Y_1 у нерухомій системі координат $OX_1Y_1Z_1$: $v_{X1} = v \cos \varphi_C$; $v_{Y1} = v \sin \varphi_C$. Координати центру тяжіння X_1 , Y_1 , кут швидкості судна φ_C та кут курсу ψ_C визначаються як: $X_1 = \int_0^t v_{X1} dt = \int_0^t v \cos \varphi_C dt$; $Y_1 = \int_0^t v_{Y1} dt = \int_0^t v \sin \varphi_C dt$; $\varphi_C = \psi_C - \beta_{dr}$; $\psi_C = \int_0^t \Omega_Z dt$.

На основі отриманого математичного опису перехідних та усталених режимів роботи розроблено імітаційні моделі аналізу маневрених характеристик пропульсивних комплексів електроходів. Моделі розроблено на мові *JAVA*.

Перевірка адекватності моделі виконувалась за допомогою порівняння результатів розрахунків за моделлю і експериментальними даними отриманими на реальних суднах-електроходах (криголами «Капітан Білоусов», проекту 10520, рятувальне судно «Рятівник-21»). Відхилення розрахункових даних від результатів експерименту склали в середньому склало 3 %...12% і не

перевищувало 20 %, що регламентується при динамічних розрахунках пропульсивного комплексу.

У розділі 6 розроблено методи оцінки впливу параметрів пропульсивного комплексу на маневрені характеристики пасажирських суден з класичною компоновкою електроенергетичної установки.

До основних маневрів, показники яких контролюються Стандартом (Резолюція комітету морської безпеки MSC.137(76)), відносяться: випробування швидкості та активне гальмування з контролем гальмівного шляху; маневр циркуляції, з контролем його основних параметрів – висування; тактичного діаметру циркуляції; випробування «зигзагом» – поворотом керма по черзі на 10° та 20° , з контролем кутів перевищення.

Зі зміною конструктивних параметрів судна можливості електроенергетичної установки змінюються, що може по-перше – привести до її перевантаження (та невиконання маневру), по-друге – погіршити його маневреність. Тому, при аналізі маневрених характеристик, слід обов'язково контролювати й показники електроенергетичної установки.

Оцінку таких змін рекомендовано проводити на основі розроблених в роботі математичних моделей та методів імітаційного моделювання.

Інерційні властивості. До обов'язкового показника – гальмівного шляху X_{1rev} – додано: а) максимальні значення кидка струму генератора $I_{Gaccmax}$ (й потужності теплового двигуна $P_{Daccmax}$) на початковому етапі розгону електрохода; б) значення струму генератора $I_{Gaccset}$ (й потужності теплового двигуна $P_{Daccset}$), після закінчення перехідного режиму розгону електрохода; в) максимальні значення кидка струму гребного електродвигуна $I_{Maccmax}$ на початковому етапі розгону електрохода; г) значення струму гребного електродвигуна $I_{Maccset}$, після закінчення перехідного режиму розгону електрохода; д) тривалість розгону T_{acc} ; е) максимальні значення струму генератора $I_{Grevmax}$ (потужності теплового двигуна $P_{Drevmax}$) на початковому етапі гальмування; ж) значення струму генератора $I_{Grevset}$ (потужності теплового двигуна $P_{Drevset}$), наприкінці гальмування електрохода; к) максимальні значення струму ГЕД $I_{Mrevmax}$ на початковому етапі гальмування електрохода; л) струм ГЕД $I_{Mrevset}$ наприкінці гальмування електроходу; м) тривалість реверсу T_{rev} .

Дослідження показали що, при інтенсивному розгоні та раптовому гальмуванні, і в генераторних агрегатах, і в гребних електродвигунах виникають відчутні перевантаження, які можуть перевищувати допустимі значення.

Необхідно обмежувати як темпи зміни сигналів управління при розгоні і при гальмуванні, так і задані (при переключенні РУ в положення заднього ходу) значення частоти обертання ГЕД. За результатами проведених досліджень було розроблено відповідні рекомендації щодо основних параметрів законів управління для запобігання перевантажень СЕЕУ.

Як приклад, в таблиці 2 проілюстровано вплив інтенсивності гальмування (постійної часу при реверсі – K_{1rev}) на показники гальмування. Рекомендовано використовувати значення $K_{1rev} = 1$.

Циркуляційний рух. До обов'язкових показників циркуляції, якій виконується (Стандарт) поворотом керма на 35° або максимально допустимий кут повороту на тестовій швидкості, відносяться: висування X_1 – відстань, яка пройдена міделем у прямому напрямку до положення, що відповідає зміні курсу на 90° ; тактичний діаметр D_{CT} – відстань, яка пройдена міделем від початку повороту, до положення, що відповідає зміні курсу на 180° .

Таблиця 2 – Вплив K_{1rev} на показники гальмування

Показник якості	Значення коефіцієнта K_{1rev}			
	0,5	0,75	1	1,3
$I_{Grevmax}$	0,8	0,85	0,9	0,98
$I_{Grevset} (P_{Drevset})$	1,07	1,08	1,09	1,3
$I_{Mrevmax}$	0,65	0,77	0,82	0,95
$I_{Mrevset}$	1,12	1,15	1,156	1,49
X_{1rev}	5,04	4,41	4,04	3,36
T_{rev}	9,7	8,8	8,3	6,7

Для повноти оцінки цього маневру до перерахованих показників слід додати, як прийнято в теорії керованості суден: а) діаметр усталеної циркуляції D_C – відстань між положеннями діаметральної площини судна на двох послідовних курсах, з різницею у 180° ; б) – пряме зміщення судна Y_1 – відстань від лінії початкового курсу за нормаллю до центру тяжіння судна при зміні курсу на 90° ; в) кутову швидкість обертання судна навколо вертикальної осі Z – Ω_Z ; г) Δv_C – зниження швидкості руху судна при виході на усталену циркуляцію; д) тривалість маневру T_C .

До показників якості додано показники СЕЕУ (якісне виконання маневру залежить від її можливостей): а) кутової швидкості обертання ГЕД та гребних гвинтів – $\Delta\omega_M$; б) крутного моменту ΔM_M й струму ΔI_M гребних електродвигунів; в) потужності теплових двигунів генераторних агрегатів – ΔP_D .

Як приклад, на рис. 10 наведено результати моделювання двох послідовних маневрів: розгін електроходу до усталеної відносної швидкості $v = v_t/v_0$ (v_t – поточна швидкість) і вихід судна на циркуляцію за рахунок повороту керма β_R .

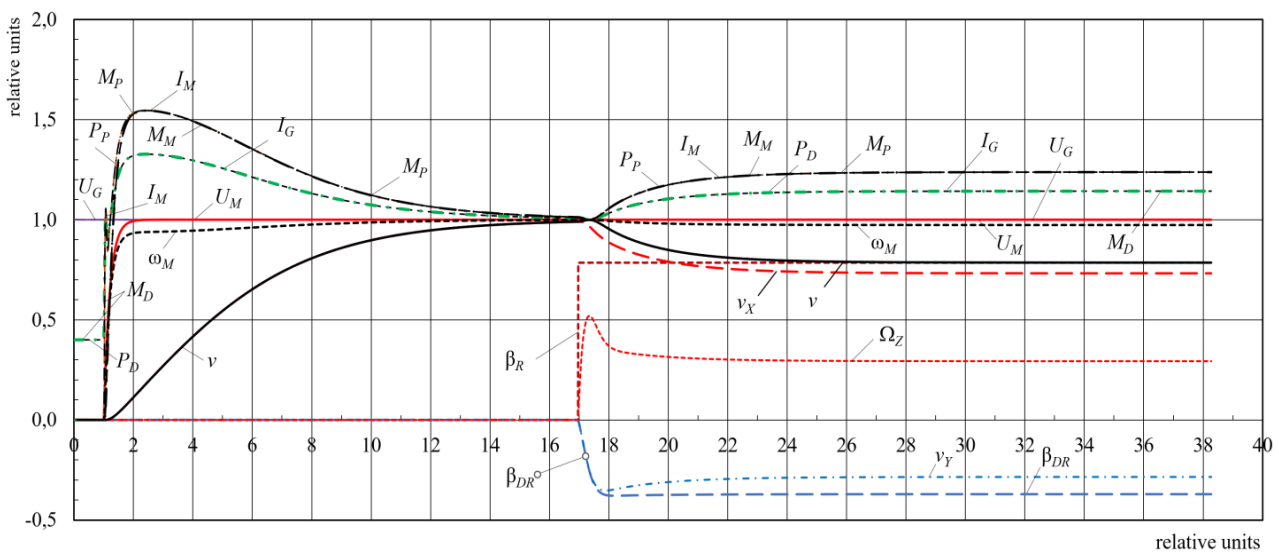


Рисунок 10 – Поточні значення режимних показників під час виконання маневру (показано у відносних одиницях)

На рисунку представлено: складові швидкості v_X та v_Y й кутова швидкість повороту Ω_Z навколо осі GZ ; складові швидкості v_{X1} , v_{Y1} , кут швидкості φ_C , кут курсу ψ_C та пройдений шлях уздовж осей X_1 та Y_1 у незв'язаною з судном системі координат $X_1Y_1Z_1$; кутова швидкість обертання ω_M , напруга U_M , струм I_M , крутний момент M_M ГЕД; корисний упор P_P і момент опору M_P гребних гвинтів; напруга U_G та струм I_G генераторів; кутова швидкість обертання ω_D , крутний момент M_D та потужність P_D теплових двигунів генераторних агрегатів, по осі абсцис – відносний час виконання маневру $T = v_0 t / L$.

Дослідження показали, що на показники циркуляції впливають параметри управління маневром (швидкість руху судна v_{str} перед виходом на циркуляцію, кут перекладки β_R керма) та окремі безрозмірні параметри пропульсивного комплексу, до складу яких входить довжина судна.

Суттєво більший вплив здійснює кут перекладки керма. У таблиці 3 представлені результати розрахунків виходу судна на циркуляцію при повній швидкості судна при різному куті перекладці керма.

Таблиця 3 – Вплив кута перекладки керма на показники циркуляції

Показник циркуляції	Кут перекладки керма β_R , градуси			
	25	30	35	40
X_1, L (м)	5,24 (1316)	4,36 (1094)	3,73 (936)	3,27 (820)
Y_1, L (м)	3,06 (770)	2,38 (599)	1,91 (480)	1,57 (395)
D_{CT}, L (м)	8,53 (2142)	6,91 (1736)	5,78 (1451)	4,95 (1243)
D_C, L (м)	8,39 (2107)	6,78 (1702)	5,65 (1419)	4,82 (1212)
$\Delta v_C, \%$	0,88	0,84	0,81	0,78
Ω_Z, rv	0,357	0,426	0,495	0,561
T_C, rv (с)	47,7 (1059)	42,86 (951)	39,49 (877)	37,03 (822)

Вплив кута перекладки керма передбачуваний. Зі збільшенням β_R , основні показники циркуляційного руху зменшуються. Зростає лише кутова швидкість повороту судна щодо вертикальної осі Z .

Зниження швидкості руху впливає на показники роботи електроенергетичної установки – навантаження на гребні електродвигуни та на генераторні агрегати збільшуються.

Маневр зигзаг (зигзаг Кемпфона) – у відповідності до стандарту ІМО, включені два види випробувань на «зигзаг» – з перекладками почергово стерна з одного борту на інший на кути $10^\circ/10^\circ$ і $20^\circ/20^\circ$. Згідно Стандарту маневреності, до найбільш суттєвих показники керованості суден, відноситься контроль «нишпорення», що характеризує реакцію судна на перекладку керма у протилежний бік при виконанні маневру «зигзаг». Але, зі зміною курсу судна починається змінюватись швидкість його руху, що у свою чергу впливає на момент опору гвинтів та, відповідно, на навантаження СЕЕУ. Тому, поряд з показниками «нишпорення», виконано оцінку показників СЕЕУ – упор і момент опору гребних гвинтів, режимні показники роботи ГЕД, генераторів та первинних двигунів генераторних агрегатів.

Математична модель забезпечує можливість імітаційного моделювання виходу пасажирського судна на зигзаг. Додаткові дослідження показують: показники траєкторії, відповідають вимогам Стандарту (для суден відповідної

довжини): початкова здатність до повороту забезпечено – з застосуванням кута керма 10° ліворуч/праворуч, судно проходить відстань менш ніж 2,5 довжини судна до моменту зміни курсу на 10° від початкового курсу; значення першого кута перевищення у випробуванні «зигзагом» $10^\circ/10^\circ$ не перевищує $16,1^\circ$ градусів; значення другого кута перевищення в тесті «зигзагом» $10^\circ/10^\circ$ не перевищує $34,15^\circ$; значення першого кута перевищення у випробуванні «зигзагом» $20^\circ/20^\circ$ не перевищує 25° .

Навантаження на електроенергетичну установку при виході на "зигзаг" зростають. Причина – коливальні зміни поздовжньої складової R_X сили опору води руху судна і зміни, у зв'язку з цим, швидкості руху v . Але, ці додаткові навантаження невеликі і не перевищують допустимих значень.

У розділі 7 розроблено методи дослідження маневрених характеристик пропульсивних комплексів з підрулюючими пристроями (ПП) та з РКК Azipod. Основне призначення методів – оцінка маневрених характеристик суден з сучасними системами електроруку.

Судна з ПП. На пасажирських суднах за САУ використовують підрулюючі пристрої. Навіть для суден з помірним ступенем маневреності коефіцієнт k_{TR} (частка ПП відносно потужності гребної електроенергетичної установки) доходить до $k_{TR} = 0,24$. Його робота суттєво впливає на навантаження на судову електростанцію та на якість електроенергії судової мережі. Розроблений метод моделювання маневрених режимів дозволяє оцінювати маневрені властивості суден з ПП з одночасним контролем навантаження на силові елементи судової електроенергетичної установки.

В математичній моделі перехідних режимів роботи, процеси в ПП представлені з урахуванням гідродинамічних процесів взаємодії їх гвинтів з корпусом судна, та ефекту засмоктування при взаємодії струменю води, якій витікає з каналу ПП, з потоком води, що натікає на струмінь зі швидкістю руху судна. В основу опису покладено метод Гофмана, побудований на базі діаграм серійних випробувань гребних гвинтів у Вагенінгенському басейні, перетворений автором в аналітичний метод, та вбудований в узагальнену математичну модель пропульсивного комплексу. Метод дозволяє враховувати вплив сигналів управління, швидкості руху судна, частоти обертання гвинта та його навантаження на режимні показники гвинтів ПП, на маневреність суден та навантаження на СЕЕУ.

Для підрулюючих пристроїв, рівняння руху судна зазнають певних змін – у правих частинах цих рівнянь з'являються додаткові зусилля та моменти від ПП. Складові швидкості руху вздовж осей X , Y і швидкість повороту навколо осі Z у системі координат $GXYZ$ отримають вигляд:

$$\frac{d\overline{v_X}}{dT} = C_{\lambda 2} \overline{v_Y} \overline{\Omega_Z} + N_X \left\{ \sum_J K_{Pj} \overline{P_{ej}} - C_{RX} \beta_{RP} \overline{v^2} - \overline{R_X} \right\}; \quad (17)$$

$$\frac{d\overline{v_Y}}{dT} = -\frac{1}{C_{\lambda 2}} \overline{v_X} \overline{\Omega_Z} + \frac{N_X}{C_{\lambda 2}} \left\{ \sum_J K_{Pj} \alpha_{jz} \overline{P_{ej}} + C_{RY} \beta_{RP} \overline{v^2} \pm \sum_h k_h \overline{P_{Thh}} - \overline{R_Y} \right\}; \quad (18)$$

$$\frac{d\overline{\Omega}_Z}{dT} = -\frac{N_\Omega}{N_X} C_{\lambda 21} \overline{v_X v_Y} + N_\Omega \left\{ \sum_j K_{Pj} \overline{h_{Pj}} \overline{P_{ej}} + C_{RY} \overline{X_R} \beta_{RP} \overline{v^2} \pm \right. \\ \left. \pm \sum_h k_h \overline{P_{Thh}} \overline{h_h} + (\overline{M_{PZ}} - \overline{M_{DZ}}) \right\}, \quad (19)$$

де $\overline{P_{Thh}}$, $\overline{h_h}$ і k_h – відносні упор, його плече і частка упору гвинта j -го ПП, X_R – відстань від центру системи координат до керма.

Результати дослідження впливу v_{str} у суден з середнім (для прикладу) значенням частки k_{TR} надані на рис. 11. Криві з індексом «b» відносяться до варіанта маневрування тільки кермом (базовий варіант), а індекс «a» (альтернативний варіант) до варіанту управління кермом з одночасним підключенням підрулюючих пристроїв.

Дослідження показали, що на маневрені характеристики суден суттєво впливають: частка k_{TR} потужності електродвигунів ПП; початкова швидкість руху судна $v = v_{str}$; конструктивні параметри корпусу електрохода та його електроенергетичної гребінної установки. Отримано залежності показників маневреності від цих параметрів.

Аналіз впливу v_{str} на маневреність свідчить про наступне. Вплив роботи ПП на показники маневреності починає позначатися при відносних швидкостях менше $v_{str} < 0,4$. Саме при таких швидкостях застосування ПУ є ефективним. Але, ступінь впливу v_{str} на показники маневреності нерівнозначний. Зі зниженням швидкості менше $v_{str} < 0,4$, включення ПП призводить до багаторазового зниження висування судна X_1 , тактичного D_{CT} та усталеного D_C діаметрів циркуляції. Дуже суттєво зменшується пряме зміщення Y_1 судна, а тривалість циркуляції T_C навпаки – різко зростає. У той же час, на ступінь зниження Δv швидкості (щодо початкового значення v_{str}), та на кутову швидкість Ω_Z обертання навколо осі Z робота ПП практично не впливає.

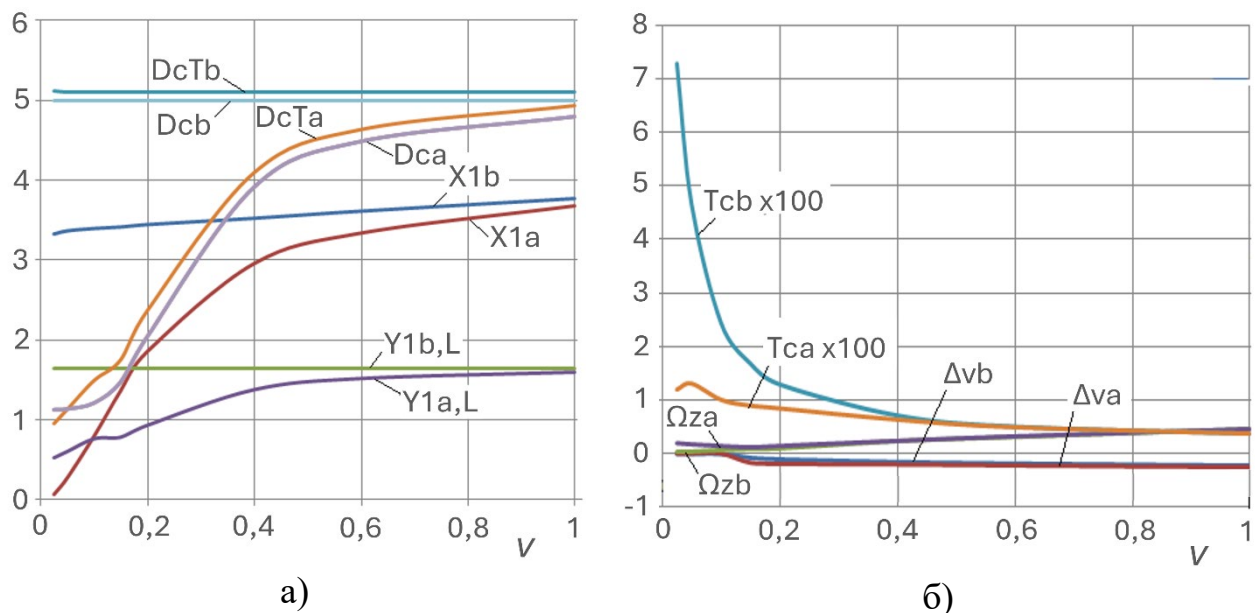


Рисунок 11 – Вплив швидкості v_{str} на показники циркуляції: а) X_1 , Y_1 , D_{CT} та D_C ; б) Δv , Ω_Z , та T_C

Вплив k_{TR} потужності електродвигунів ПП на показники маневреності проілюстровано у таблиці 4, де надана частка отриманих результатів для декількох значень швидкості v_{str} у суден зі «слабкою» ($k_{TR} = 0,08$), середньою ($k_{TR} = 0,17$) та «високою» ($k_{TR} = 0,25$) ступенями маневреності.

Таблиця 4 – Вплив k_{TR} на показники маневреності

Показники циркуляції	$v_{str} = 0,1$			$v_{str} = 0,3$			$v_{str} = 0,6$		
	k_{TR} 0,08	k_{TR} 0,17	k_{TR} 0,25	k_{TR} 0,08	k_{TR} 0,17	k_{TR} 0,25	k_{TR} 0,08	k_{TR} 0,17	k_{TR} 0,25
X_1, L	0,45	0,28	0,22	2,99	2,56	2,28	3,48	3,34	3,23
Y_1, L	0,69	0,60	0,57	1,41	1,21	1,09	1,58	1,52	1,46
D_{CT}, L	1,31	1,13	1,06	4,24	3,48	3,97	4,88	4,64	4,23
D_C, L	1,14	1,14	1,14	4,08	3,25	2,68	4,75	4,49	4,27
v_C, rv	0,06	0,09	0,11	0,24	0,23	0,22	0,49	0,48	0,47
$\Delta v, \%$	10	11	13	20	23	27	18	20	22
Ω_Z, rv	0,11	0,18	0,23	0,17	0,17	0,20	0,3	0,3	0,3
T_C, rv	150	130	123	109	98	73	50	49	48

Ступінь впливу k_{TR} насамперед залежить від швидкості руху судна v_{str} , з якою воно виходить на криволінійну траєкторію. Зі зростанням k_{TR} , усі показники, крім кутової швидкості Ω_Z , плавно зменшуються (Ω_Z , навпаки – зростає), що свідчить про покращення маневрених характеристик судна з ПП. При швидкостях більше $v_{str} = 0,5$ вплив потужності ПП на маневрені характеристики зменшується, що цілком вкладається в основні підходи до використання ПП – при таких швидкостях руху вони неефективні.

Пасажирські судна мають велику вітрильність, тому зміна їх конструктивних параметрів суттєво впливає на вітрове навантаження, на маневрені характеристики та на навантаження СЕЕУ. При маневруванні поблизу причалу, неврахування вітрових навантажень може призвести до аварійної ситуації, а утримання судна на курсі при прямолінійному русі теж може бути неможливим у зв'язку з недостатньою тягою гвинтів ПП.

Розроблений математичний апарат враховує аеродинамічні сили і моменти які діють на корпус судна та дає можливість враховувати вітрове навантаження на маневрені характеристики суден та навантаження на їх СЕЕУ. Дослідження показали, що при слабкому вітрі (5,2 м/с – 3 бали) із найгіршим кутом 135° , судно цілком стійке на прямому курсі при швидкостях руху $v = 0,2$ й більше. Потужності електродвигунів ПУ цілком достатньо для компенсації вітряного тиску та підтримки прямолінійного курсу. Кут дрейфу не перевищує $\beta_{dr} = 6^\circ$, навантаження на електродвигуни ПП – не більше ніж 30% від їхньої номінальної потужності.

Зі збільшенням швидкості вітру до помірного (7,4 м/с – 4 бали) та швидкостях руху більше (4-х вузлів), робота ПП теж забезпечує збереження керованості судна. Однак при цьому, для підтримки прямолінійного руху судна доводиться суттєво збільшувати тягу ПП, потужність електродвигунів при цьому наближається до номінальної. Кут дрейфу починає зростати, але при швидкостях більше $v = 0,25$ він залишається в допустимих межах. Істотно гірше судно веде

себе при малих швидкостях – менш ніж $v = 0,25$ (менше 4 вузлів). Кути дрейфу можуть перевищувати допустимі значення

При свіжому (9,8 м/с) вітрі, упору гвинтів ПП виявляється вже недостатнім для підтримки його на заданому курсі. Кут дрейфу наближається до 90 градусів (судно переходить на рух лагом та зупиняється).

Судна з РКК Azipod. Використання РКК Azipod в гребних електроенергетичних установках суттєво сприяє підвищенню маневреності судна (можливість зміни напрямку тяги гвинта відносно корпусу судна на 360°). З одного боку, це забезпечує високі маневрені властивості електроходів, але, з іншого боку – це створює суттєві додаткові навантаження як на гребінну установку, так і на всю електроенергетичну систему.

В роботі проілюстровано маневрені властивості пасажирських суден, обладнаних РКК Azipod. Одночасно наведено поточні значення основних режимних показників СЕЕУ.

Аналіз режимних показників маневрування та візуалізація процесу маневрування показали, що при невеликих швидкостях руху, електрохід протягом усього процесу маневрування чітко «підкоряється» роботі рушійно-кермового комплексу. Основні режимні показники електроенергетичної установки не виходять за допустимі межі. Але, зі збільшенням швидкості руху судна й тією же інтенсивністю управління ГЕУ, навантаження на електроенергетичну установку суттєво зростають й починають перевищувати допустимі значення. Це свідчить про необхідність обмеження і швидкості повороту Azipod і самого кута повороту.

Дослідження впливу початкової швидкості судна v_{str} та кута повороту РКК ψ_{Az} на маневреність електрохода та на показники якості роботи його електроенергетичної установки проведено на прикладі циркуляційного руху. Моделювався маневр: розгін електроходу до заданого значення швидкості v_{str} – вихід на циркуляцію за рахунок повороту РКК на кут $\psi_{Az} = 35^\circ$. Дослідження проведено для швидкостей виходу на циркуляцію $v_{str} = 0,1$; $v_{str} = 0,20$; $v_{str} = 0,40$; $v_{str} = 0,8$; $v_{str} = 1$. В процесі моделювання оцінювалися: показники траєкторії руху судна X_1 , Y_1 , D_{CT} , D_C (в довжинах судна); Ω_Z , T_C , v_C (у відносних одиницях); ступінь зниження швидкості Δv_C (по відношенню до початкової швидкості v_{str}); показники якості роботи електроенергетичної установки: максимальне значення тяги гвинтів T_{Az} ; момент опору гвинтів M_{Az} ; кутова швидкість обертання ω_M , рушійний момент M_M і струм I_M гребних електродвигунів Azipod; потужність теплових двигунів P_D .

За результатами досліджень сформульовані наступні висновки. Швидкість руху v_{str} , з якою судна виходить на циркуляцію, мало впливає на показники траєкторії його руху Y_1 , D_{CT} , D_C , Δv . Збільшення швидкості v_{str} призводить лише до незначного зростання висування судна. У той же час, кутова швидкість обертання Ω_Z зростає, а тривалість маневру T_C , навпаки, скорочується приблизно у п'ять разів.

Швидкість v_{str} істотно впливає і на більшість показників роботи СЕЕУ. Зі зростанням v_{str} , показники суттєво зростають, і при швидкостях $v_{str} = 0,8...0,9$ починають наближатися до максимально допустимих значень. Це підтверджує

той факт, що при виході на циркуляцію на великих швидкостях, необхідно обмежувати і кут повороту РКК Azipod, і швидкість його повороту.

Вплив кута повороту РКК Azipod ψ_{Az} на показники маневреності електрохода та на показники якості роботи його СЕЕУ проілюстровано (табл. 5) на прикладі виходу судна на циркуляцію при різній початковій швидкості v_{str} (у прикладі $v_{str} = 0,8$). Поворот РКК здійснювався на кут: $\psi_{Az} = 25^\circ$; $\psi_{Az} = 30^\circ$; $\psi_{Az} = 35^\circ$; $\psi_{Az} = 40^\circ$; $\psi_{Az} = 60^\circ$; $\psi_{Az} = 70^\circ$.

Таблиця 5 – Вплив на показники маневреності кута ψ_{Az} при $v_{str} = 0,80$

Показни ки	Кут повороту Azipod ψ_{Az}											
	$\psi_{Az} = 25^{\circ}$	$\psi_{Az} = 30^{\circ}$	$\psi_{Az} = 35^{\circ}$	$\psi_{Az} = 40^{\circ}$	$\psi_{Az} = 60$	$\psi_{Az} = 70^{\circ}$						
	Показники циркуляційного руху											
T_C, rv	27,78	23,24	20,46	18,27	12,27	10,0						
X_1, L	3,99	3,35	2,91	2,60	1,96	1,81						
Y_1, L	2,15	1,63	1,29	1,04	0,51	0,37						
D_{CT}, L	5,88	4,6	3,72	3,07	1,60	1,19						
D_C, L	5,61	4,27	3,3	2,56	0,74	0,32						
v_C, rv	0,66	0,59	0,53	0,46	0,22	0,15						
$\Delta v, rv$	0,16	0,25	0,33	0,42	0,72	0,79						
Ω_{Zmax}, rv	0,33	0,40	0,45	0,50	0,69	0,76						
	Показники електроенергетичної установки											
	max (d)	st (s)	max (d)	st (s)	max (d)	st (s)	max (d)	st (s)	max (d)	st (s)	max (d)	st (s)
T_{Az}, rv	1,2	1,3	1,2	1,4	1,3	1,4	1,3	1,4	1,5	1,6	1,4	0,9
$M_{Az} (M_M)$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7	0,8	0,7	1,1	0,7	1,1	0,7
ω_M, rv	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8	0,7	0,8
I_M, rv	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7	0,8	0,7	1,1	0,7	1,1	0,7
P_D, rv	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8	0,9	0,7	1,0	0,8	1,0	0,8

При моделюванні оцінювалися показники траєкторії руху ($X_1, Y_1, D_{CT}, D_C, \Omega_{Zmax}$), $T_C, v_C, \Delta v_C$; максимальні значення (у відносних одиницях) показників якості електроенергетичної установки $T_{Az}, M_{Az}, \omega_M, M_M, I_M, P_D$ на початковому етапі маневрування (індекс – d) та на усталеної циркуляції (індекс – s). Результати дослідження при $v_{str} = 0,80$ представлені у табл. 5.

Аналіз впливу кута повороту ψ_{Az} на показники циркуляції показує наступне. При збільшенні ψ_{Az} , маневреність суден суттєво поліпшується – показники X_1, Y_1, D_{CT}, D_C , траєкторії руху судна і тривалість маневру T_C зменшуються, причому, зниження цих показників багаторазово (від 2,5-ти кратного – для тривалості маневру, до 17-ти кратного – для встановленого діаметра циркуляції D_C). Судно практично «обертається» на місці.

Зі зростанням кута повороту ψ_{Az} , тяга гвинтів T_{Az} й момент їх опору M_{Az} , збільшуються. Зростає обертовий момент M_M , струм гребних електродвигунів й навантаження на генераторні агрегати суднової електростанції. При кутах повороту ψ_{Az} більше 50° , ці навантаження досягають максимально допустимих значень і необхідно вживання заходів для зменшення швидкості повороту РКК Azipod та обмеження навантаження на електродвигуни.

У розділі 8 проведено перевірку достовірності моделей та методів, які складають розроблену методологію розмірної модернізації. Така модернізація була проведена для серії з п'яти пасажирських суден типу *LIRICA*, які зараз успішно працюють. Судно *LIRICA* до модернізації буде називатиметься базовим, а після подовженням на 24,5 метрів (результат оптимізації), без зміни електроенергетичної установки, буде називатиметься альтернативним.

Економічне обґрунтування розмірної модернізації пасажирського судна. Для обґрунтування доцільності проведення розмірної модернізації пасажирського судна використовується відома методика оцінки економічної ефективності з використання показників – вартість загальних грошових потоків при врахуванні модернізації судна *NPV* (Net present Value) і еквівалентна річна вартість *EAC* (Equivalent Annual Cost). Протягом усього часу експлуатації судна судноплавна компанія займається моніторингом стану ринку та технічного стану судна і розглядає питання про доцільність продовження експлуатації судна, виходячи з очікуваних доходів від експлуатації цього судна. Розглянуто такі альтернативні рішення: I – продовжити експлуатацію судна без модернізації; II – провести модернізацію судна та продовжити його експлуатацію; III – продати судно та придбати йому на заміну нове судно такої ж пасажиромісткості; IV – продати судно і йому на заміну придбати нове судно іншої пасажиромісткості. Дослідження показали, що модернізація суден (варіант II) виявляється в більшості випадків економічно ефективнішою, ніж використання суден без модернізації або їх заміна нові судна ті ж пасажиромісткості. При цьому максимальне значення *NPV* для проєкту модернізації судна досягається при експлуатації судна протягом 35 років та дорівнює 643,84 млн. дол., що помітно перевищує відповідне значення для проєкту експлуатації немодернізованого судна.

Експериментальна перевірка визначення довжини додаткової вставки. У якості цільової функції оптимізаційних розрахунків розміру додаткової вставки використовується економічний результат модернізації. Обмеження враховують необхідність дотримання нормативних вимог до розміру додаткової секції та енергоефективності судна, а також можливі витрати на модернізацію.

Визначення довжини додаткової секції циліндричної вставки для судна «*MSC LIRICA*» було проведено з застосуванням інтегральної математичної моделі модернізації круїзного судна, розробленої в другому розділі дисертації. Результатом проведення оптимізації за критерієм досягнення найбільшого прибутку стало визначення довжини вставки – 24,5 м.

Оцінка маневрених характеристик судна. За результатами додаткових розрахунків виявлено узагальнені безрозмірні параметри пропульсивних комплексів, які суттєво впливають на маневрені характеристики, та знайдені їх чисельні значення для базового та альтернативного суден.

Оцінка впливу модернізації на інерційні характеристики проведена на прикладі розрахунку комбінованого маневру: розгін судна до встановленого значення швидкості $v = 0,98$ (у відносних одиницях) – активне гальмування переведенням рукоятки ПУ в положення заднього ходу до $v = 0$. Порівняльний

аналіз показує, що зі збільшенням довжини судна, його інерційні характеристики погіршуються (до 9,3 %...10 %). Але, погіршення невеликі і залишаються в межах, що регламентуються Регістром.

Циркуляційний рух. Як і слід було очікувати, зі збільшенням довжини судна показники траєкторії циркуляційного руху погіршуються. Параметри траєкторії збільшуються загалом на 10%, тривалість циркуляції – на 12%, але в цілому погіршення показників невеликі і не перевищують норм Регістру. Результати порівняльного аналізу наведено у табл. 6.

Таблиця 6 – Показники траєкторії циркуляційного руху

Електрохід	Показники циркуляційного руху						
	X_1 , м	Y_1 , м	D_{CT} , м	D_C , м	Δv_C , %	Ω_Z , °	T_C , с
Базовий	936	480	1451	1419	19	0,477	877
Альтернативний	1020	526	1597	1553	22	0,495	981
Відхилення, %	+ 8,97	+ 9,58	+ 10	+ 9,4	+ 3	+ 3,8	+ 12

Вплив подовження судна на показники СЕЕУ (табл. 7) теж несуттєвий. Навантаження на ГЕД з виходом на усталену циркуляцію збільшуються від 22,2 % (у базового) до 22,6 % (у альтернативного).

Вплив подовження судна на параметри маневру «зигзаг» оцінено за результатами моделювання обох маневрів – «зигзаг» 10°/10° та «зигзаг» 20°/20°. Результати порівняльного аналізу основних показників маневру показує наступне:

- гальмівний шлях судна, до моменту зміни курсу на 10° від початкового курсу, зменшується з 2,01L до 1,84L (поліпшується на 8,5 %);
- перший кут перевищення зигзагу 10°/10° збільшується з 10,53° на 10,59°;
- другий кут перевищення зигзагу 10°/10° збільшується з 10,51° на 10,52°;
- перший кут перевищення випробування 20°/20° практично не змінюється.

Таблиця 7 – Показники якості роботи електроенергетичної установки

Електрохід	Етап циркуляції	Показники якості роботи електроенергетичної установки					
		v	Ω_Z	ω_M	M_M	I_M	P_D
Базовий	Початок	0,99	0	1,0	1,013	1,013	1,008
	Усталений	0,785	0,38	0,97	1,238	1,238	1,142
	Відхилення, %	-20,7	–	– 3	+22,2	+22,2	+13
Альтернативний	Початок	0,99	0	1,013	1	1	1,001
	Усталений	0,753	0,37	0,97	1,268	1,268	1,161
	Відхилення, %	-24	–	– 4,2	+26,8	+26,8	+16

Таким чином, при подовженні судна в межах до 10% основні показники виконання маневру практично не змінюються, якість керування і показники СЕЕУ значно не погіршується.

Вплив подовження судна на маневрені характеристики суден з ПП оцінено за результатами порівняльного аналізу виконання базовим та альтернативним суднами маневру: розгін до заданого значення швидкості – вихід на циркуляцію за рахунок повороту керма на кут $\beta_R = 30^\circ$ з одночасним включенням носових ПУ. Моделювання проведено для двох значень k_{TR} (маневрені властивості) – $k_{TR} = 0,17$ (середні) та $k_{TR} = 0,25$ (високі), при різних швидкостях виходу судна на циркуляцію: $v_{str} = 0,05$ (1 вузол); $v_{str} = 0,15$ (3 вузла); $v_{str} = 0,4$ (8 вузлів); $v_{str} = 0,8$ (16,8 вузлів).

Результати аналізу показують, що з подовженням корпусу маневрені характеристики погіршуються, проте, ступінь погіршення невелика. Відчутний вплив подовження корпусу судна на показники циркуляційного руху починає проявлятися при швидкостях руху менше $v_{str} < 0,4$ (менше 8 вузлів). Ступінь відхилення показників траєкторії циркуляції і показників СЕЕУ несуттєво залежить від частки k_{TR} упору гвинтів ПП.

При подальшому зменшенні швидкості $v_{str} < 0,1$ (менше 2 вузлів), вплив довжини судна стає більш відчутним. Найбільше (до 15 %) збільшується тактичний діаметр циркуляції D_{CT} та висування судна X_1 . В меншій мірі (до 10 %) збільшуються пряме зміщення Y_1 і діаметр усталеної циркуляції D_C .

При швидкостях руху, близьких до $v = 0,15$, вплив подовження судна суттєво зменшується. Причина – негативний вплив сили засмоктування.

На показники роботи СЕЕУ подовження корпусу судна впливає незначно, тому з її боку немає аргументів проти запропонованої модернізації.

Вплив подовження судна на маневрені характеристики суден з РКК Azipod оцінено за результатами моделювання криволінійного руху базового та альтернативного суден, за умовами заміни їх ГЕД на РКК Azipod.

Порівняльний аналіз проведено на прикладі характерного маневру: судно розганяється до заданої швидкості v_{str} , та виходить на циркуляцію за рахунок повороту РКК Azipod на різні кути ψ_{Az} : $\psi_{Az} = 25^\circ$, $\psi_{Az} = 30^\circ$, $\psi_{Az} = 35^\circ$, $\psi_{Az} = 40^\circ$, $\psi_{Az} = 60^\circ$ і $\psi_{Az} = 70^\circ$. Швидкості руху при виході на циркуляцію – $v_{str} = 0,2$ та $v_{str} = 0,8$. Частка результатів досліджень надана у табл. 8.

Результати порівняльного аналізу показали, що зі збільшенням довжини судна показники якості маневрування змінюються. На ці зміни впливає кут повороту Azipod. При невеликій швидкості виходу на циркуляцію, подовження впливає на ступінь зниження швидкості електроходу Δv_s (на 0,23 відносних одиниць) і тривалість циркуляції (збільшує на 0,112 відносних одиниць). Несуттєво (на 0,055...0,069) змінюються висування X_1 , пряме зміщення Y_1 , тактичний діаметр циркуляції D_{CT} і кутова швидкість обертання корпусу навколо вертикальної осі Z . На основні показники СЕЕУ зміна довжини теж впливає слабо. Відчутно змінюються лише навантаження на ГЕД РКК Azipod.

Зі збільшенням кута повороту ψ_{Az} вплив подовження корпусу на показники траєкторії руху зменшується, але починають збільшуватися навантаження на ГЕД. Проте, ці навантаження не перевищують 14 %.

Зі збільшенням швидкості виходу судна на циркуляцію та невеликих кутах повороту РКК Azipod, відхилення показників маневреності залишаються

практично тими самими. При зростанні кута повороту ψ_{Az} відхилення більшості показників починає знижуватися.

Таблиця 8 – Вплив подовження на показники маневреності

Показники циркуляції	$v_{str} = 0,80$					
	$\psi_{Az} = 35^\circ$			$\psi_{Az} = 70^\circ$		
	Базов	Альтер	Відхил	Базов	Альтер	Відхил
T_C, c	454	505	0,112	222	229	0,032
X_1, m	732	782	0,068	455	478	0,051
Y_1, m	323	346	0,071	93,8	96,4	0,029
D_{CT}, m	934	987	0,057	299	279,5	-0,064
D_C, m	930	848	0,022	82	66	-0,195
$\Delta v_s, rv$	0,33	0,39	0,182	0,81	0,835	0,031
Ω_{Zd}, c^{-1}	0,453	0,47	0,038	0,76	0,80	0,053
Ω_{Zs}, c^{-1}	0,30	0,30	0	0,88	0,963	0,094
T_{Azd}, rv	1,30	1,3	0,008	1,56	1,556	-0,003
T_{Azs}, rv	1,444	1,46	0,011	1,78	1,791	0,006
M_{Md}, rv	0,83	0,84	0,012	1,182	0,184	0,002
M_{Ms}, rv	0,76	0,753	-0,009	0,712	0,838	0,174
ω_{Md}, rv	0,8	0,8	0	0,76	0,76	0
ω_{Ms}, rv	0,805	0,805	0	0,81	0,80	-0,012
P_{Dd}, rv	0,90	0,901	0	1,1	1,11	0,009
P_{Ds}, rv	0,855	0,851	-0,005	0,83	0,903	0,09

Все це означає те, що у подовженого судна робота РКК Azipod сприяє збереженню (а за окремими показниками – за тактичним D_{CT} і усталеним D_C діаметром циркуляції – поліпшенню) основних показників маневреності. Але, при подальшому збільшенні кута повороту РКК Azipod, відчувається відповідна реакція електроенергетичної установки. Відхилення показників СЕЕУ збільшуються (найбільшою мірою реагують гребні електродвигуни), але вони не перевищують допустимих значень.

Таким чином, порівняний аналіз підтверджує доцільність та обґрунтованість методології розмірної модернізації пасажирських суден, демонструє збереження (у допустимих межах) їх функціональності й безпеки та відсутність суттєвих заперечень з боку її технічної реалізації.

ВИСНОВКИ

Результатом виконаного дослідження є розв'язання актуальної науково-прикладної проблеми, яка пов'язана з побудовою наукової методології модернізації, ремонту та експлуатації пасажирських суден, для забезпечення їх високоефективної експлуатації. Отримані результати – стратегія, моделі, методи – формують нову методологію розмірної модернізації, яка створює умови щодо подальшого високоефективного використання пасажирських суден протягом конкретних етапів їх життєвого циклу. Практичні результати досліджень впроваджені в діяльність науково-конструкторських установ, що підтверджує їх ефективність й корисність. Основні висновки за результатами досліджень.

1. З метою підвищення ефективності експлуатації пасажирських суден, в умовах зростання пасажиропотоку, висунуто гіпотезу щодо доцільності своєчасної, техніко-економічно обґрунтованої їх конструктивної модернізації за рахунок подовження корпусу. Єдиної теоретичної бази проведення розмірної модернізації суден не існує, окремі теоретичні положення відстають від запроваджених практичних розробок, що ускладнює безпечне їх використання.

Запропоновано структуру основних напрямків проведення модернізації пасажирських суден. Окреслено групи суден, для яких її проведення є найбільш доцільним.

2. Для обґрунтування доцільності модернізації сформовано систему факторів, які впливають на фактичний термін експлуатації суден та можливості його збільшення. Запропоновано інтегральну систему показників, які відображають результати технічної та комерційної експлуатації суден. Встановлено загальну динаміку даних показників протягом життєвого циклу судна. Дана система показників охоплює, у тому числі технічні та комерційні ризики, а також у відповідності до сучасних трендів, накопичену «шкоду» навколишньому середовищу в рамках застосування LCA (Life cycle assessment).

Запропоновано процедуру визначення часу започаткування і проведення модернізації у життєвому циклі судна. Запропоновано стратегію розмірної модернізації, відповідно до якої, науково-обґрунтована розмірна модернізація дозволить забезпечити протягом конкретного періоду ефективну експлуатацію пасажирських суден.

3. На базі удосконаленого дерева якостей пасажирського судна сформовано узагальнену сукупність критеріїв, що повинні забезпечуватись при розмірній модернізації – розроблено древо її цілей. Інтегральним розглядом трьох його основних складових – економічної ефективності, функціональності та безпеки судна – побудовано ідеологічний базис методології з обґрунтуванням її економічної доцільності, визначенням часу початку, об'єму та постановкою завдань щодо оцінки змін у функціональності та безпеці експлуатації модернізованих суден.

4. Розроблено: модель економічної ефективності, яка за результатами розрахунку додаткового доходу, витрат і прибутків дозволяє оцінювати економічні результати модернізації; модель функціональності, яка базується на реалізації сукупності техніко-експлуатаційних й техніко-виробничих вимог, морехідних якостей; модель безпеки судна, яка ґрунтується на нормах, правилах, резолюціях Міжнародної морської організації (ІМО) і вимог Класифікаційних товариств. Запропоновані моделі в сукупності утворюють інтегральну модель розмірної модернізації, яка описує закономірності впливу ступеню подовження на економічні та техніко-експлуатаційні показники модернізації.

5. Розроблено метод оптимізації величини додаткової вставки при розмірній модернізації. Відповідно до принципів концептуального моделювання: виокремлені найважливіші завдання, розставлено пріоритети між цілями; описані характеристики структурних одиниць зі зв'язками між ними; визначено та прописано причинно-наслідкові зв'язки для досягнення поставленої мети. Сформульована цільова функція, окреслена допустима область змін

параметрів, зазначені обмеження. Метод відноситься до класу формально-евристичних методів оптимізації.

6. Розроблено метод оцінки впливу подовження корпусу на буксирувальний опір та пропульсивний коефіцієнт, які визначають основний експлуатаційний показник морехідних якостей суден – ходовість. Знайдені закономірності впливу на ходовість судна ступеню подовження його корпусу. Запропоновано науково-обґрунтовані рекомендації щодо вибору варіанту модернізації – або визначення довжини вставки, відповідно до спроможності енергетичної установки забезпечити необхідну швидкість судна, або навпаки – за встановленою довжиною вставки визначення швидкості руху судна, виходячи з потужності енергетичної установки.

7. Запропоновано методи оцінки змінювання морехідних якостей судна при його подовженні, що дозволяє визначати допустиме збільшення довжини корпусу за критеріями, які відповідають цим якостям – ходовості, остійності, маневреності, які регламентуються Міжнародною конвенцією (SOLAS-74/78), Кодексом забезпечення остійності непошкоджених суден і Класифікаційними товариствами. Запропоновано методику визначення ступеню подовження модернізованих суден за критерієм енергоефективності *EEDI* з урахуванням перевірки їх енергоефективності протягом всього життєвого циклу.

8. Розроблено узагальнені математичні моделі та імітаційні методи дослідження перехідних режимів пропульсивних комплексів з класичною гребною електроенергетичною установкою, з підрулюючими пристроями, з РКК *Azipod*. Вони забезпечують можливість розрахунку поточних значень основних режимних параметрів всіх складових частин комплексу при виконанні судном маневрених операцій. Методи дозволяють проводити кількісну оцінку показників маневреності та показників навантажень на суднову електроенергетичну установку.

Адекватність подібних моделей й методів, підтверджено у попередніх дослідженнях шляхом порівняння результатів моделювання з оприлюдненими результатами натурних випробувань. На динамічних режимах максимальні розходження режимних показників СЕЕУ не перевищує 18%, а показників руху судна – 4,3%. Для динамічних режимів роботи суден такі відхилення прийнятні.

9. Виявлено критерії динамічної подібності та узагальнені безрозмірні параметри пропульсивних комплексів. Доведено, що використання обраних критеріїв та параметрів створює умови щодо узагальнення результатів досліджень, та певного нівелювання, впливу неточностей у визначенні окремих параметрів та зовнішніх факторів, на результати прогнозування показників маневрування.

10. Розроблено методи оцінки впливу розмірної модернізації на основні показники маневреності, які (відповідно до «Стандарту маневреності судна» ІМО) охоплюють інерційні характеристики, характеристики маневреності та керованості суден з класичною компоновкою гребної електроенергетичної установки. Сформовано розширений (у порівнянні зі Стандартом) перелік показників якості маневрування. Запропонована сукупність показників, включаючи показники СЕЕУ, дозволяє оцінювати маневрені характеристики

суден, навантаження на електроенергетичну установку та її можливість щодо забезпечення функціональності суден та безпеки експлуатації.

11. Розроблено методи оцінки впливу конструктивної модернізації на показники маневреності та на показники СЕЕУ суден з підрулюючими пристроями та РКК Azipod. Особливістю методів є те, що режимні показники ПП та РКК Azipod представлені з урахуванням гідродинамічних процесів взаємодії їх гвинтів з корпусом судна, в умовах зміни при маневруванні частоти обертання гвинтів, швидкості руху судна та кута повороту гондоли. Знайдено закономірності впливу основних параметрів підрулюючих пристроїв, рушійно-кермового комплексу РКК Azipod, умов маневрування й параметрів управління на ефективність експлуатації суден.

12. Отримано наукові положення, які розширюють існуючі знання щодо експлуатації пасажирських суден та морської інженерії, сприяючи підвищенню ефективності, безпеки та економічності суден:

- при подовженні корпусу у 1,1...1,3 рази відносно початкової довжини (техніко-економічно обґрунтована величина) розрахункові згинальні моменти на тихій воді зростають у 1,3...2,1 рази, в умовах хвилювання (перегин/прогин корпусу) – в $(1,3...3,1)/(1,3...2,1)$ рази, а перерізуючі сили – у 1,25...1,51 рази у порівнянні з початковими значеннями. Відносні значення розрахункового хвильового тиску зростають у 1,1...1,3 рази;

- для суден з початковою довжиною до 200 м, при збільшенні довжини судна до 40 % зростає, в середньому до 9 %, хвильовий коефіцієнт. Для суден з довжиною понад 250 м зростання менше – до 4 %. Це слід враховувати при оцінці поздовжньої загальної міцності судну;

- при збільшенні довжини корпусу в 1,1, 1,2 та 1,3 рази буксирувальний опір зростає відповідно в 1,05...1,08, 1,10...1,15 та 1,16...1,21 рази. У той же час, пропульсивний коефіцієнт зменшується в середньому на 2%...4,0% та 5%...12% при його збільшенні в 1,1 та 1,2 рази;

- доведено, що при подовженні суден (на техніко-економічно обґрунтовану величину), деякі з основних показників маневреності судна погіршуються: інерційні (розгін/гальмування) – на 9,3%...10%; маневрені (циркуляція) – на 3,8%...12% (за показниками траєкторії) та 1,2%...13% (за показниками СЕЕУ); керованості («зигзаг») – на 1%...2% (незначно). Ступінь погіршення показників виявилась незначною, вона не перевищує прийняті границі, але разом з тим, її слід враховувати в процесі технічної експлуатації суден;

- відчутний вплив подовження корпусу у суден з ПП проявляється при русі судна на малих ходах (при $v_{str} < 0,4$, тобто в середньому менше 8 вузлів). При швидкостях, близьких до $v_{str} = 0,15$, виявляється негативний вплив сили засмоктування, що є дуже небезпечною ситуацією (погіршення показників маневреності складає 4%...16 %);

- у суден з РКК Azipod, ступінь впливу подовження на маневреність залежить від швидкості руху судна та кута повороту гондоли. При малих ходах (невеликі швидкості руху $v_{str} < 0,25$) й кутах повороту менш $\psi_{Az} = 35^\circ$, показники

маневреності змінюються на 2...11 %. При збільшенні швидкості руху та кутах повороту гондоли більших за $\psi_{Az} = 40^\circ$, починають чутливо зростати (до 17,5 %) навантаження на гребні електродвигуни РКК Azipod, на що необхідно звертати увагу в процесі технічної експлуатації пасажирських суден;

- при збільшенні кута повороту гондоли РКК Azipod починають зростати відхилення режимних показників суднової електроенергетичної установки, але вони залишаються в допустимих межах, причому ці залежності є практично лінійними;

- розроблено математичні моделі перехідних режимів пропульсивних комплексів, що побудовані на основі теорії динамічної подібності та узагальнених безрозмірних параметрів, дозволяють прогнозувати маневрені характеристики електроходів як з класичною компоновкою гребної установки, так і з РКК Azipod, незалежно від масштабів судна і конфігурації СЕЕУ;

- розроблені стратегії розмірної модернізації дозволяють знизити витрати палива на пасажиро/кілометр до 18 %.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Перелік статей у журналах, що реферуються науково-метричними базами даних Scopus, Web of Science

1. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., **Shumylo O.**, Voloshyn A., Koskina Y., Volianska Y. (2022). Review of Ship Information Security Risks and Safety of Maritime Transportation Issues. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 16, No. 4, pp. 717-722 DOI:10.12716/1001.16.04.13 (**Scopus**) (автору належить ідентифікацію вразливостей у системах інформаційної безпеки судна в процесі експлуатації та розроблено практичні підходи до їх мінімізації).

2. Melnyk O., Sagaydak O., **Shumylo O.**, Lohinov O. (2023). Modern Aspects of Ship Ballast Water Management and Measures to Enhance the Ecological Safety of Shipping. *Studies in Systems, Decision and Control*, vol 481, 681-694. Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-031-35088-7_39 (**Scopus**) (автором досліджено сучасні методи управління баластними водами на судах щодо забезпечення умов їх екологічності із врахуванням інтеграції до міжнародних стандартів).

3. **Shumylo O.**, Yarovenko V., Malaksiano M., Melnyk O. (2023). Comprehensive Assessment of Hull Geometry Influence of a Modernized Ship on Maneuvering Performance and Propulsion System Parameters. *Pomorstvo*, 37 (2), pp. 314 - 325. DOI:10.31217/p.37.2.13 (**Scopus**) (автором виконано оцінку впливу геометрії корпусу модернізованих суден на маневрові характеристики, що дозволило оптимізувати конструкцію для підвищення ефективності пропульсивної системи, розроблено математичну її модель).

4. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, O., **Shumylo, O.**, Voloshyn, A., Ocheretna, V., & Fedorenko, O. (2024). Implementation Research of Alternative Fuels and Technologies in Maritime Transport. *Modern Technologies in Energy and Transport*. *Studies in Systems, Decision and Control*, 510, 13-31. doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_2 (**Scopus**) (автором досліджено процес застосування альтернативних палив і технологій на морському транспорті, враховуючи інноваційні рішення щодо зменшення парникових газів (вуглецевого сліду), їх вплив на енергоефективність судна).

5. Rudenko S., Shakhov A., Lapkina I., **Shumylo O.**, Mykola Malaksiano, Ihor Horchynskyi. Multicriteria Approach to Determining the Optimal Composition of Technical Means in the Design of Sea Grain Terminals. *Transactions on Maritime Science*. Split, Croatia, 11(1), pp. 28–44. doi: 10.7225/toms.v11.n01.003. doi.org/10.7225/toms.v11.n01.003 (**Scopus**) (проведено аналіз попередніх досліджень та запропоновано модульну схему обробки запитів при завантаженні судна, виконано оцінку його економічної ефективності використання за показниками NPV і EAC);

6. Yarovenko, V. A., Chernikov, P. S., Zaritskaya, E. I., & **Shumylo, O. M.** (2020). Control of electric ships' propulsion motors when moving on curvilinear trajectory. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (5), 58–65.

doi.org/10.20998/2074-272X.2020.5.09 (*Web of Science*) (автором здійснено аналіз різних варіантів моделей управління судновими головними електродвигунами; проведено дослідження режимних показників при виконанні маневру «розгін і вихід судна на циркуляцію», показників якості маневрування при різних законах управління, виконані оптимізаційні розрахунки параметрів сигналів керування, розроблено метод розрахунку перехідних режимів пропульсивних комплексів при маневруванні на криволінійній траєкторії).

7. **Shumylo O.** (2024) Analysis of factors affecting the ship safety on the basis of six-stage risk management model / O. Melnyk, S. Onyshchenko, O. Shumylo, V. Ocheretna, O. Kononova // Systems, Decision and Control in Energy VI. *Energy Informatics and Transport*. Springer, Cham. Vol. 561. 423-441.

DOI: 10.1007/978-3-031-68372-5_23 (*Scopus*) (автором проведено статистичний аналіз морських аварій і інцидентів за останні десятиріччя, досліджено ключові фактори, що впливають на безпеку судна й судноплавства).

8. **Shumylo, O.**, Yarovenko, V., Malaksiano, M., Melnyk, O., Iovchev, S. (2025). Methods for Assessing Electric Ships' Maneuvering and Safety Indicators Based on the Theory of the Dynamic Similarity. In: Melnyk, O., Onishchenko, O., Zaporozhets, A. (eds) *Maritime Systems, Transport and Logistics I. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 580. Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-031-82027-4_15 (*Scopus*) (автором розроблено методи розрахунку маневрових характеристик пропульсивних комплексів електроходів на основі теорії динамічної подібності, визначені критерії динамічної подібності, запропоновано метод розрахунку перехідних режимів цих комплексів).

Перелік статей у виданнях, що входять до переліку наукових фахових видань України (категорії Б)

9. **Shumylo O.M.**, Kononova O.M. (2016) Assessment of average resource of ship's shafting. *Вісник Одеського національного морського університету*, (48), 173-180. ISSN 2226-1893, <http://visnyk.onmu.org.ua/index.php/1/issue/view/50> (автором розроблено метод оцінки довговічності суднових валів з застосуванням ймовірнісним підходів).

10. **Шумило О.М.** (2011). Оцінка живучості деталей і елементів конструкцій при нерегулярному циклічному навантажуванні. *Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал*. № 1, 120-130.

11. **Шумило О.М.** (2010). Експертна оцінка вихідних характеристик опору втомі деталей машин, що зруйнувалися при циклічному навантажуванні. *Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал*. № 1. 15-21.

12. **Шумило О.** (2022). Оптимізація розмірної модернізації пасажирських суден з урахуванням енергоефективності. *Розвиток транспорту*, (4(15), 58-77. Retrieved із <https://journals.onmu.in.ua/index.php/journal/article/view/191>

13. **Shumylo O.** (2022). Визначення оптимальних розмірів подовження пасажирських суден у процесі їх модернізації. *Розвиток транспорту*, (1(12), 85-104. doi.org/10.33082/td.2022.1-12.08
14. **Shumylo O.** (2023). Дослідження впливу розмірної модернізації на геометричні характеристики пасажирського судна. *Розвиток транспорту*, (2(17), 75-89. doi.org/10.33082/td.2023.2-17.07
15. **Shumylo O.** (2023). Дослідження буксирувального опору круїзних суден при їх розмірній модернізації. *Розвиток транспорту*, (4(19), 140-162. doi.org/10.33082/td.2023.4-19.1
16. **Шумило О., Яровенко В., Зарицька О., & Криворучко Д.** (2023). Вплив конструктивних параметрів електроходів на діаграму керованості. *Вісник Одеського національного морського університету*, (68), 53-65. doi.org/10.47049/2226-1893-2023-1-53-65 (автором запропоновано спосіб розрахунку та побудови діаграми керованості на основі математичної моделі перехідних режимів пропульсивних комплексів суден з електрорухом. Розроблено метод побудови діаграми керованості з можливістю аналізу впливу параметрів пропульсивного комплексу на маневреність).
17. **Yarovenko V.O., Chernikov P.S., Schumylo O.M., Zaritska O.I.** (2022) Mathematical Model Of Transient Modes Of Electric Ships' Propulsion Complexes With Thrusters *Розвиток транспорту*, 3(14) 2022 р. С. 110 – 129. doi.org/10.33082/td.2022.3-14.09 (автором розроблено математичну модель і методику розрахунку перехідних режимів рухових комплексів електросуден з підрулюючими установками, виконано розрахунок рушійних гвинтів з урахуванням гідродинамічних процесів їх взаємодії з корпусом судна, в'язкісних втрат і в'язкої взаємодії. Виявлено критерії динамічної подібності та узагальнені безрозмірні параметри комплексу, що впливають на показники маневреності).
18. **Шумило О.М.** (2023). Вплив конструктивних параметрів електроходів на показники виконання маневру «зигзаг». *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. Вип. (26-27). 56-68. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/737>
19. **Шумило О.М.** (2023) Вплив геометричних параметрів корпусу електрохода на інерційні характеристики. *Вісник Одеського національного морського університету*. Вип. 4(71), 36-48. doi.org/10.47049/2226-1893-2023-4-36-48
20. **Шумило О.** (2024). Комплексна оцінка впливу розмірної модернізації на ходовість і пропульсивні характеристики круїзних суден. *Розвиток транспорту*, (1(20), 73-90. doi.org/10.33082/td.2024.1-20.07
21. **Шумило О.** (2024). Аналіз безпечної експлуатації пасажирського судна з розмірною модернізацією корпусу за критерієм забезпечення остійності. *Вісник Одеського національного морського університету*, (73), 87-101. doi.org/10.47049/2226-1893-2024-2-87-101 .
22. **Шумило О.М.** (2024) Технічні та економічні аспекти управління життєвим циклом морського судна. *Вчені записки Таврійського національного*

університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки. Том 35 (74) No 2. 334-344.

https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2024/2_2024/49.pdf

23. **Шумило О.** (2024). Оцінка розмірної модернізації пасажирських суден за критерієм міцності їх корпусів. *Розвиток транспорту*, 3(22), 87-105. doi.org/10.33082/td.2024.3-22.06

24. **Шумило О.**, Григор'єв Ю., & Конопльов А. (2024). Про підходи до перерахунку параметрів кривих втоми. *Вісник Одеського національного морського університету*, (74), 33-50. doi.org/10.47049/2226-1893-2024-3-33-50 (автором розроблено метод оцінки характеристик опору втомі суднових корпусних конструкцій, що ґрунтується на інтегральному підході перерахунку параметрів різних кривих втоми).

25. **Shumylo O.**, Rossomakha, O., & Shakhov A. (2021). Удосконалення моделі визначення вартості життєвого циклу судна. *Розвиток транспорту*, 1(8), 113-124. doi.org/10.33082/td.2021.1-8.11

(автором запропоновано модель визначення вартості життєвого циклу судна за рахунок впровадження методів аналізу ризиків).

26. **Shumylo O.**, & Kupraty, O. (2021). Rotor Sails As A Perspective Ship Power Plant. Роторні вітрила як перспективна суднова енергетична установка. *Розвиток транспорту*, 3(10), 30-51. doi.org/10.33082/td.2021.3-10.03 (автором досліджено ефективність застосування роторних вітрил на борту судна в різних районах і умовах плавання, їх вплив за критеріями економічності і екологічності роботи суднової енергетичної установки).

27. Honcharuk I., Golovan A., **Shumylo O.**, & Shamov O. (2023). Особливості управління безпекою маневрування при виконанні швартових операцій до борту судна. *Розвиток транспорту*, 1(16), 69-78. doi.org/10.33082/td.2023.1-16.06 (автором проведено аналіз попередніх досліджень та запропоновано критерії ідентифікації потенційних загроз експлуатаційній безпеці судна при виконанні маневрів).

28. **Шумило А.Н.**, Кононова О.Н. (2009). Оценка циклической прочности деталей судовых машин по уравнениям подобия усталостного разрушения. *Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. № 2.* 108-113. (автором запропоновано метод визначення границь витривалості відповідальних суднових машин і елементів конструкцій з застосуванням рівнянь подібності руйнування від втоми).

Монографії

29. Гаврилов О. В., Сагайдак О. І., **Шумило О. М.** (2021). Міжнародне регулювання запобігання забрудненню морського середовища. Одеса: КУПРІЄНКО СВ. (автором виконано рекомендації щодо сертифікації суднових дизелів, впливу виду палива на токсичність випускних газів, досліджено основних напрямків подолання екологічних проблем від забруднення морського середовища зі сторони судна, сформовано критерії щодо екологічної безпеки судна).

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

30. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S., **Shumylo O.**, Volyansky S., Bondar A., Cheredarchuk N. (2023) Application of Fuzzy Controllers in Automatic Ship Motion Control Systems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol.13, No.4, 3958-3968. ISSN. DOI:<http://doi.org/10.11591/ijece.v13i4.pp3948-3957> (**Scopus**) (автором застосовано теоретичну базу нечітких регуляторів до автоматизованих систем управління рухом суден, що дозволило вдосконалити методи стабілізації судна в складних умовах)
31. Melnyk O., **Shumylo O.**, Kolegaiev M., Maslii O., Onishchenko O., Bulgakov M. (2023). Magnetic hydrocyclones efficiency survey for application in marine engine oil and hydrophobic substances purification technology. *Journal of Chemistry and Technologies*, 31 (4), 775-785. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v31i4.289124> (**Scopus**) (автором проведено експериментальні дослідження ефективності магнітних гідроциклонів та розроблено рекомендації щодо підвищення їх ефективності в умовах експлуатації).
32. Minchev D., Gogorenko O., Varbanets R., Moshentsev Y., Pi's'te'k V., Kuc'era P., **Shumylo O.** and Kyrnats V. (2022). Prediction of centrifugal compressor instabilities for internal combustion engines operating cycle simulation. *Journal of Automobile Engineering* 1–13 IMechE 2022 Article reuse guidelines: sagepub.com/journals-permissions DOI: 10.1177/09544070221075419 <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/09544070221075419> (**Scopus**) (автором проведено аналіз попередніх досліджень, проведено моделювання нестабільної роботи системи наддуву судових ДВЗ).
33. Concept of vibroacoustic diagnostics of the fuel injection and electronic cylinder lubrication systems of marine diesel engines. Varbanets R., **Shumylo O.**, Marchenko A., Minchev D., Kyrnats V., Zalozh V., Aleksandrovska N., Brusnyk R.. *POLISH MARITIME RESEARCH* 4 (116) 2022 Vol. 29; pp. 88-96 10.2478/pomr-2022-0046. (**Scopus**) DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0046> <https://sciendo.com/article/10.2478/pomr-2022-0046> (автором досліджено сучасні методи математичного моделювання для пошуку несправностей судових дизельних двигунів).
34. Lavrenchenko G.K., Slynko A.G., **Shumylo O.M.**, ...Kozlovskyi S.V., Halkin, V.M. Thermodynamic cycle of regasification of liquefied gases with mechanical energy production. *Journal of Chemistry and Technologies*/ This link is disabled., 2023, 31(4), pp. 798–804 <http://chemistry.dnu.dp.ua/article/view/294929> (**Scopus**) (автором проведено дослідження щодо підвищення ефективності використання механічної енергії в процесі регазифікації зрідженого природного газу з метою покращення екологічних і економічних показників морських суден).
35. Сапіга В.В., Онищенко О.А., **Шумило О.М.** (2022). Розвиток сучасних військово-морських сил збройних сил України: модульні концепції. Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Випуск 2(36).104-120.

<https://vt.duit.in.ua/index.php/home/issue/view/10/11> (автором виконано розділ, присвячений розробці рекомендацій щодо координації зусиль Класифікаційних товариств і спеціалізованих проєктних організацій, спрямованих на підвищення ефективності і якості, швидкості на етапі проєктування суден і кораблів).

36. **Шумило О.М.**, Стариков М.А. (2009). Оцінка дійсних запасів втомної міцності валів і осей. Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. № 1. 89-96 (автором отримано залежність між необхідним запасом міцності деталі і функціями розподілу її втомних властивостей та зовнішніх навантажень, досліджено характеристики розсіювання границь витривалості деталей на основі рівнянь подібності втомного руйнування).

37. **Шумило О.М.** (2009). Визначення оптимальних характеристик опору втомі деталей машин, що знаходяться під дією нерегулярних режимів навантажування. Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал. № 2. 15-26.

38. **Шумило О.М.** Кононова О.М., Витюк Л.С. (2018). Технічна експертиза зруйнування суднового гребного валу, *Вісник Одеського національного морського університету*. №57. 73-92. (автором розроблено алгоритм проведення технічної експертизи суднового валу, зроблені висновки щодо причин такого руйнування).

39. Pizintsali L., **Shumylo O.**, Aleksandrovska N., Rossomakha O., Rossomakha O., & Rabocha T. (2021). Аналіз впливу геополітичних подій на економічну ефективність судна. *Розвиток транспорту*, (2(9)), 47-63. <https://doi.org/10.33082/td.2021.2-9.04> (автором здійснено загальну постановку проблеми щодо оцінки впливу вартості нафти на економічну ефективність судна).

40. Конопльов А., **Шумило О.**, Кононова О., Чередарчук Н., Галевский, В., Рожко, О., & Арпентьева В. (2021). Оцінка точності одного методу прискореного визначення границі витривалості. *Вісник Одеського національного морського університету*, (66), 22-30. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2021-3-22-30> (автором запропоновано підхід для визначення систематичної, випадкової та загальної похибок методу визначення границі витривалості відповідальних конструкцій).

41. **Shumylo O.**, Yarovenko V., & Zaritska O. (2023). Dynamic similarity of electric ships' propulsive complexes. *Transport Development*, (4(15)), 43-57. Retrieved from <https://journals.onmu.in.ua/index.php/journal/article/view/189> (автором розроблено математичну модель і методику розрахунку перехідних режимів рушійних установок електричних суден, запропоновано узагальнені безрозмірні параметри комплексу, визначено методику проведення досліджень з використанням положень теорії динамічної подібності).

42. Golovan A., Honcharuk I., Voloshyn, A., **Shumylo O.**, Nykyforov, Y., & Shamov, O. (2023). Дослідження шляхів зменшення забруднення повітря від судноплавства. *Розвиток транспорту*, (4(15)), 15-23. Retrieved from <https://journals.onmu.in.ua/index.php/journal/article/view/186> (автором обґрунтовано методичний підхід до визначення обсягів шкідливих забруднень від суден, проведено аналіз попередніх досліджень та сформульовано постановку проблеми).

Праці апробаційного характеру

43. Вітюк Л.С., **Шумило О.М.** (2021). Експериментальна установка для визначення ізобарної теплоємності різних рідин. Матеріали III Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри «СЕУ і ТЕ» Навчально-наукового інституту морського флоту Одеського національного морського університету МР&О-2021. (С. 144-148). Одеса: ОНМУ. <http://2021.depas.od.ua/ru/glavnaya/> <https://drive.google.com/file/d/16N35-x7nVsH8S211cOS7zsXPQEa-NcO/view> (автором проведено контрольні дослідження з вимірів ізобарної теплоємності робочих речовин, що застосовуються в судових енергетичних установках і зроблено висновки).

44. Савков Б.П., **Шумило О.М.** (2019). Щодо деяких аспектів боротьби з загрозами на морі з використанням можливостей судна і його екіпажу. Матеріали 10 міжнародної науково-практичної конференції Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування. (С. 291-293). Херсонська державна морська академія. https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2021/02/seutto_2019_.pdf (автором запропоновано вдосконалення процедур підвищення рівня захисту екіпажу, пасажирів і охорони судна від сучасних загроз).

45. **Шумило О.М.** (2020). Модернізація пасажирських суден як інструмент підвищення конкурентоздатності судноплавних компаній. Тези доповідей Збірник матеріалів міжнародної науково-практичної конференції «Дніпровські читання-2020» (С.169-171). Київ: Державний університет інфраструктури і технологій. https://kivt.duit.edu.ua/wp-content/uploads/2022/04/zbirnyk_-dch-2020_duit.pdf

46. **Шумило О.М.**, Кононова О.М. (2021). Комплексна оцінка фізичного зношування морських суден // Тези доповідей Матеріали III міжнародної науково-практичної морської кафедри «СЕУ і ТЕ» Навчально-наукового інституту морського флоту Одеського національного морського університету. (С. 44-48). Одеса: Одеський національний морський університет. <http://2021.depas.od.ua/ru/glavnaya/> <https://drive.google.com/file/d/1LMdhwa4XFEY-96aLSlpraRg7Q6pcUM70/view> (автором виконано аналіз методів оцінки фізичного зношування морських суден, надані рекомендації щодо їх практичного застосування).

47. Конопльов А.В., **Шумило О.М.**, Галевський В.В., Рожко О.К., Кононова О.М., Чередарчук Н.І. (2021). Визначення систематичної похибки прискореного методу оцінки міцності втоми, заснованого на використанні коефіцієнта відносної довговічності // Тези доповідей Матеріали III міжнародної науково-практичної морської кафедри «СЕУ і ТЕ» Навчально-наукового інституту морського флоту Одеського національного морського університету. (С. 185-189). Одеса: ОНМУ 2021 –<http://2021.depas.od.ua/ru/glavnaya/> https://drive.google.com/file/d/1QUUwx2U1AqWVEaPIDNB_DVMl6MX2Awgv/view (автором запропоновано підхід для визначення систематичної, випадкової та загальної похибок методу визначення границі витривалості відповідальних конструкцій).

48. **Шумило О.М.**, Кононова О.М., Бараболя К.Ю. (2021). Застосування кривої втоми нової форми при оцінці міцності суднових конструкцій // Тези доповідей Матеріали 12 міжнародної науково-практичної конференції Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування. (С. 206-208.) Херсон: ХДМА. <https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2021/09/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA-%D0%A1%D0%95%D0%A3%D0%A2%D0%A2%D0%9E%D0%9E-2021.pdf> (автором запропоновано використання в розрахунках на втомну міцність криву втоми нової форми, що складається з двох ділянок - правої, підпорядкованої рівнянню Вейбулла, і лівої - степеневому рівнянню).

49. Конопльов А.В., **Шумило О.М.**, Кононова О.М., Чередарчук Н.І., Галевський В.В., Рожко О.К., Арпентьєва В.О. (2021). Зв'язок випадкової похибки з розсіюванням результатів випробувань на опір втоми та кількістю випробуваних об'єктів. Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції Сучасні тенденції в бізнесі та менеджменті: теорія і практика. (с.157-160). Одеса: ОНМУ. https://onmu.odessa.ua/images/university/news/conf_buss_art_aut_2021.pdf (автором проведено оцінку загальної похибки прискореного методу випробувань на опір втомі з урахуванням двох складових: систематичної і випадкової).

50. Конопльов А.В., **Шумило О.М.**, Кононова О.М., Галевський В.В., Рожко О.К., Чередарчук Н.І., Арпентьєва В.О. (2021). Допустима наведена похибка методів прискорених випробувань на опір втоми. Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції Сучасні тенденції в бізнесі та менеджменті: теорія і практика. (С. 165-168). Одеса: ОНМУ. https://onmu.odessa.ua/images/university/news/conf_buss_art_aut_2021.pdf (автором запропоновано застосувати аналітичні методи розрахунку суднових конструкцій з застосуванням теорії подібності втомного руйнування).

51. Конопльов А.В., **Шумило О.М.**, Кононова О.М., Галевський В.В., Рожко О.К., Чередарчук Н.І. (2021). Оцінка точності методу прискореного визначення границі витривалості відновлених деталей суднових механізмів і машин. Тези доповідей International scientific conference «Maritime security of the Baltic-Black sea region: challenges and threats» Odessa December 23, 2021. Vol. 2. (С. 404-406). Baltija Publishing . <http://www.baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/184/5153/11575-1> (автором проведено оцінку загальної похибки прискореного методу випробувань на опір втомі з урахуванням двох складових: систематичної і випадкової).

52. Rudenko S., **Shumylo O.**, Kononova O., Baraboly K. (2021). Systematic Approaches to Combating Threats at Sea. Тези доповідей International scientific conference «Maritime security of the Baltic-Black sea region: challenges and threats» Odessa December 23, 2021. Vol. 1. (С. 69-72). Baltija Publishing. <http://www.baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/184/5150/11574-1> (автором запропоновано вдосконалення процедур підвищення рівня захисту екіпажу, пасажирів і охорони судна від сучасних загроз).

53. Пізінціалі Л.В., **Шумило О.М.**, Александровська Н.І., Россомаха О.І., Рабоча Т.В. Безпека судноплавства та утилізація суден. (2021). Тези доповідей

International scientific conference «Maritime security of the Baltic-Black sea region: challenges and threats» Odessa December 23, (С. 411-414). Baltija Publishing.

<http://www.baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/184/5150/11574-1>

(автором запропоновано вдосконалення процедур підвищення рівня захисту екіпажу, пасажирів і охорони судна від сучасних загроз).

54. **О.М. Шумило**, О.М. Кононова, К.Ю. Бараболя Перспективи підвищення конкурентоспроможності пасажирських суден при їх модернізації (2022). Тези доповідей Матеріали IV міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри «СЕУ і ТЕ» Одеського національного морського університету MPP&O-2022. (С. 86-93). Одеса: ОНМУ.

<https://2022.depas.od.ua/https://docs.google.com/document/d/1ZrxE6KSyGMRtuNhGIOf7jnQlr3hw3-1b/edit> (автором розроблено концепцію проведення розмірної модернізації пасажирських суден, що ґрунтується на комплексних критеріях, безпеки, функціональності і економічності судна).

55. А.В. Конопльов, О.М. **Шумило**, О.М. Кононова, Н.І.Чередарчук, В.В. Галевський, О.К. Рожко. (2022). Застосування прискореного методу для порівняльної оцінки границі витривалості відновлених різними способами колінчастих валів. Тези доповідей Матеріали IV міжнародної науково-практичної морської кафедри «СЕУ і ТЕ» Одеського національного морського університету MPP&O-2022. (С. 114-117). Одеса: ОНМУ.

https://2022.depas.od.ua/https://docs.google.com/document/d/13SzDH7jphAI5MPEH-92Mz6whi_Ob5Y8b/edit (автором виконано верифікацію прискореного методу визначення границь витривалості нових і відновлених колінчастих валів і зроблено висновки щодо точності цього методу).

56. Яровенко В.О., Черников П.С., **Шумило О.М.**, Зарицька О.І.. (2022). Моделювання перехідних режимів гребних електродвигунів на маневрах. Тези доповідей Матеріали IV міжнародної науково-практичної морської кафедри «СЕУ і ТЕ» Одеського національного морського університету MPP&O-2022. (С. 62-70). Одеса: ОНМУ.

<https://docs.google.com/document/d/1jt2oIdY0MMs5OeGMHtSCCgek0HLgt0wX/edit> (автором запропоновано узагальнений математичний опис перехідних режимів роботи гребних електродвигунів).

57. Пізінцалі Л. В., Россомаха О.І., **Шумило О.М.**, Александровська Н.І., Россомаха О.А., Рабоча Т.В, Малишкін О.В. (2023). Аналіз впливу альтернативних видів палива на вартість життєвого циклу судна. Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference «Science, Education, Innovation: Topical Issues and Modern Aspects» (February 16-18, 2023). (С. 457-460). Tallinn, Estonia. General Engineering and Mechanics № 142.

<https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/issue/view/16-18.02.2023> (автором виконано аналіз залежності вартості життєвого циклу морського судна від традиційних і альтернативних палив, їх вплив на екологічні показники).

58. **Шумило О.М.**, Кононова О.М. (2023). Математична модель оптимізації пасажирських суден при проведенні їх розмірної модернізації. Тези доповідей 14-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні

енергетичні устано-вки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування»(СЕУТТОО-2023). (С.339-348). Херсон: ХДМА.

<https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2023/05/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D0%B8-%D0%A1%D0%95%D0%A3%D0%A2%D0%A2%D0%9E%D0%9E-2023.pdf>

(автором розроблено моделі економічної ефективності, функціональності і безпеки пасажирського судна, які утворюють інтегральну модель розмірної модернізації пасажирського судна).

59. **Шумило О.М.**, Яровенко В.О., Малаксіано М.О., Мельник О.М.. (2024). Вплив габаритних характеристик корпусу електрохода на його маневренні характеристики. Тези доповідей Матеріали V міжнародної науково-практичної морської кафедри «СЕУ і ТЕ» Одеського національного морського університету MPP&O-2024. (С. 118-123). Одеса: ОНМУ. <https://drive.google.com/file/d/1fBHq9FWSiikhIKc-lhEDlHRu9ETlmZzi/view> doi.org/10.13140/RG.2.2.15083.96806 (автором запропоновано математичну модель перехідних режимів судових пропульсивних комплексів, виконано порівняльний аналіз впливу подовження корпусу електрохода на основні показники якості маневрування).

60. **О.М. Шумило**, О.М. Кононова. (2024). Оцінка ходовості круїзних суден при проведенні їх розмірної модернізації. Тези доповідей Матеріали V міжнародної науково-практичної морської кафедри «СЕУ і ТЕ» Одеського національного морського університету MPP&O-2024. (С. 105-117) Одеса: ОНМУ. https://drive.google.com/file/d/1fDVh8TzZYy_HzoF51Dfoj5HQERQPluLR/view doi.org/10.13140/RG.2.2.15083.96806 (автором запропоновано метод оцінки ходовості пасажирського суден, досліджено характер змін пропульсивних характеристик при проведенні їх розмірної модернізації).

61. Конопльов А.В., Кононова О.М., **Шумило О.М.** (2019). Влив моделі кривої втоми на коефіцієнт відносної довговічності. «Суднова енергетика: стан та проблеми» Міжнародна науково-технічна конференція». (С.235-240). Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв. (автором проаналізовано застосування поширених моделей кривих втоми - згідно степеневому, показниковому рівнянню і рівнянню Вейбулла на точність оцінки циклічної довговічності).

62. **Шумило О.М.** (2023). Оцінка впливу геометричних параметрів корпусу електрохода на його інерційні характеристики. Тези доповідей XI Міжнародна науково-технічна конференція(присвячується пам'яті професора Горбова Віктора Михайловича) «СУДНОВА ЕНЕРГЕТИКА: СТАН ТА ПРОБЛЕМИ» (С.78-79), НУК, 7-8 листопада 2023 року

63. Golovan, A., Gritsuk, I., Rudenko, S., Saravas, V., Shakhov, A., & **Shumylo, O.** (2019). Aspects of Forming the Information V2I Model of the Transport Vessel. 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), (pp. 390-393). Kremenchuk, Ukraine, 2019. doi.org/10.1109/MEES.2019.8896595 (автором запропоновано технічні та

експлуатаційні заходи оцінювання ефективності моніторингу стану судна в умовах інтелектуальних транспортних систем).

64. **Шумило О.** (2024). Інтегральна модель обґрунтування розмірної модернізації пасажирського судна. Тези доповідей I Міжнародної науково-практичної конференції «Навігація та керування судном: нові підходи, навчання та моделювання» (N&SH-2024), (С.78-79), 23-24 вересня 2024 р.

<https://doi.org/10.47049/2226-nsh2024.2>

65. Kalinichenko, Y., **Shumylo, O.**, & Kourov, M. (2021). Development of a model for energy efficiency management of a ship at different stages of its lifecycle. Technology Transfer: Fundamental Principles and Innovative Technical Solutions, 17-20. doi.org/10.21303/2585-6847.2021.002176 <http://journal.eu-jr.eu/ttfpits/article/view/2176> *(автором запропоновано враховувати в моделі енергоефективності судна рівнянь: енергетичного балансу СЕУ, балансу витрат енергоносіїв, гідродинамічного балансу, зміни ентальпії енергетичного обладнання).*

66. A.Kholodenko; **O. Shumylo**; O. Gonchar; Y. Navrozova; V. Pashchenko, O. Zabolotnyi (2023). Optimization Terms of Equipment Replacement Based on the Profit Intensity Criterion (Оптимізація термінів заміни обладнання за критерієм рентабельності). IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) (с. 738-743). Харків. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10312841> (індексація в SCOPUS) *(автором встановлено фактори, що формують вибраний критерій оптимальності, визначено їх вплив на оптимальний термін експлуатації).*

67. Сагайдак О.І., **Шумило О.М.** (2023). Вдосконалення процедури прийняття рішень про перевірку судна контролем держави порту на основі оцінки ризиків за допомогою сучасних інформаційних технологій. Матеріали III науково-практичної конференції 2023 Проєктний та логістичний менеджмент: нові знання на базі двох методологій. Том 7, (С. 30-31). Одеса: КУПРІСНКО СВ. *(автором виконані рекомендації щодо формування на основі системного підходу переліку ризиків, які впливають на безпеку судна).*

68. **Шумило О.М.**, Кононова О.М. (2024). Урахування аналізу ризиків при розробці моделі визначення вартості життєвого циклу судна. Матеріали 15-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» (СЕУТТОО-2024) (с. 83-89). Херсонська державна морська академія. *(автором запропоновано модель визначення вартості життєвого циклу за рахунок впровадження методів аналізу ризиків)*

69. **Шумило О. М.** (2024). Динаміка техніко-експлуатаційних та економічних показників протягом життєвого циклу суден. INTERNATIONAL SCIENTIFIC-PRACTICAL CONFERENCE CURRENT ISSUES OF SCIENCE, EDUCATION AND TECHNOLOGY IN MODERN CONDITIONS. (69-72). Book of abstracts March 12, Aarhus, Denmark.

АНОТАЦІЯ

Шумило О.М. Методологічні основи розмірної модернізації пасажирських суден для підвищення ефективності їх експлуатації. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту – Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, 2025.

В дисертаційній роботі вирішена важлива для забезпечення ефективного функціонування морського пасажирського флоту, проблема підвищення ефективності експлуатації пасажирських суден з застосуванням розмірної модернізації, яка створює умови щодо подальшого високоефективного їх використання на протязі певних етапів життєвого циклу, передбачаючи оновлення судна, збільшення пасажиромісткості з забезпеченням додаткового прибутку, дослідження системних властивостей та технічних рішень відповідно до сучасних стандартів в судноплаванні. Проблема вирішується на основі створення нових і удосконалення існуючих стратегій, методів, моделей, які формують нову методологію розмірної модернізації, що ґрунтується на інтегральному розгляді сучасних концепцій забезпечення безпеки, економічності, ефективності і екологічності.

Розроблено стратегію проведення конструктивної (розмірної) модернізації пасажирських суден, яка дозволить забезпечити на протязі певного періоду життєвого циклу їх ефективну експлуатацію, що ґрунтується на вдосконаленні структури основних напрямків проведення модернізації пасажирських суден, здійсненні аналізу часу початку модернізації в життєвому циклі, виокремленні групи суден, для яких її проведення є найбільш доцільним, формуванні системи факторів, які впливають на фактичний термін експлуатації суден та можливість його продовження, інтегральної системи показників, які відображають результати технічної та комерційної експлуатації суден з визначенням динаміки даних показників протягом такого циклу.

Створено інтегральну модель розмірної модернізації, яка описує закономірності впливу ступеню подовження на економічні та техніко-експлуатаційні показники модернізації, і базується на: моделі економічної ефективності з результатами розрахунку додаткового доходу, витрат і прибутків – оцінкою економічних результатів модернізації; моделі функціональності з реалізацією сукупних техніко-експлуатаційних й техніко-виробничих вимог і морехідних якостей; моделі безпеки судна і судноплавства з нормами, правилами, резолюціями Міжнародної морської організації (ІМО) і вимогами класифікаційних товариств. Побудовано ідеологічний базис методології з обґрунтуванням її економічної доцільності, визначенням часу початку, об'єму та постановкою завдань щодо оцінки змін у функціональності та безпеці експлуатації модернізованих суден.

Запропоновано метод визначення граничної довжини судна при розмірній модернізації за критерієм загальної поздовжньої міцності, який ґрунтується на обов'язкових нормах забезпечення поздовжньої міцності корпусу, враховує

закономірності зміни силових факторів в залежності від ступеню подовження судна. Додатково сформовано сукупність критеріїв оцінки граничного подовження корпусів морських круїзних лайнерів з врахуванням додаткових навантажень на них з боку морського середовища, які вимогам та правилам, які стандартизовані Міжнародною асоціацією International Association of Classification Societies (IACS), та Регістром судноплавства.

Удосконалено метод прискореного визначення характеристик опору втомі суднових конструкцій у межах узагальненого методу оцінки локальної міцності корпусу, який ґрунтується на інтегральному методі перерахунку параметрів кривих втоми за степеневою функцією і функцією Вейбулла, що дозволяє оцінювати границі витривалості матеріалу з високою точністю.

Запропоновано методи оцінки змінювання морехідних якостей судна при його подовженні, що дозволяє визначати допустиме подовження корпусу за критеріями, які відповідають цим якостям – ходовості, остійності маневреності, які регламентуються Міжнародною конвенцією (SOLAS-74/78), Кодексом забезпечення остійності суден і Регістром судноплавства. Запропоновано методику обов'язкової перевірки модернізованих суден на відповідність критерію енергоефективності *EEDI* на протязі всього їх життєвого циклу. Удосконалено метод оцінки впливу подовження корпусу на основний експлуатаційний показник морехідних якостей суден – ходовість з оцінкою змін основних факторів, які її визначають – буксирувальний опір та пропульсивний коефіцієнт, та знайдені закономірності впливу на ці параметри, і відповідно на ходовість, ступеню подовження судна.

Створено узагальнені математичні моделі та імітаційні методи дослідження перехідних режимів пропульсивних комплексів з класичною гребною електроенергетичною установкою, з ПП, з РКК Azipod, які забезпечують можливість кількісної оцінки маневрених властивостей суден, та навантажень на СЕЕУ, адекватність таких моделей й методів та достовірність одержуваних результатів підтверджено у попередніх дослідженнях порівнянням результатів моделювання з оприлюдненими результатами натурних випробувань низки суден. Імітаційні моделі JAVA.

Визначено критерії динамічної подібності та узагальнені безрозмірні параметри пропульсивних комплексів. Науково доведено, що використання обраних критеріїв та параметрів створює умови щодо узагальнення результатів досліджень, певного нівелювання впливу неточностей у визначенні окремих параметрів та зовнішніх факторів при прогнозуванні змін показників маневрування при конструктивній модернізації. Сформовано розширений (у порівнянні зі «Стандартом маневрених якостей судна» ІМО) перелік показників якості маневрування. Сукупність запропонованих показників дозволяє оцінювати маневрені характеристики суден, навантаження на СЕЕУ та її можливість щодо забезпечення функціональності суден та безпеки експлуатації.

Створено методи оцінки впливу розмірної модернізації на основні показники маневреності, які (відповідно Стандарту) включають інерційні характеристики, характеристики маневреності та керованості, та показники СЕЕУ суден, з класичною компоновкою гребної електроенергетичної установки.

Підтверджено, що при подовженні суден, ступінь погіршення режимних показників невелика, вона не виходить за допустимі межі – прийняття рішення щодо доцільності подовження судна базується показниками економічної доцільності.

Розроблено методи оцінки впливу розмірної модернізації на показники маневреності та на показники СЕЕУ суден, обладнаних підрулюючими пристроями та РКК Azipoid. Методи характеризуються тим, що режимні показники ПП та РКК Azipoid представлені з урахування гідродинамічних процесів взаємодії їх гвинтів з корпусом судна. Виявлено закономірності впливу основних параметрів ПП та РКК Azipod, умов маневрування й параметрів управління на ефективність експлуатації суден.

Ключові слова: ефективність, технічна експлуатація, модернізація, математичне моделювання, безпечне, високоефективне використання, засоби транспорту, морські судна, маневрування.

ANNOTATION

Shumylo O.M. Methodological foundations of dimensional modernization of passenger ships to increase the efficiency of their operation. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.22.20 - operation and repair of means of transport - National University "Odesa Maritime Academy", Odesa, 2025.

The dissertation work solves the problem of increasing the efficiency of the operation of passenger ships using dimensional modernization, which is important for ensuring the effective functioning of the maritime passenger fleet, which creates conditions for their further highly efficient use during certain stages of the life cycle, providing for the renewal of the ship, increasing passenger capacity with additional profit, researching system properties and technical solutions in accordance with modern standards in shipping. The problem is solved on the basis of creating new and improving existing strategies, methods, models that form a new methodology of dimensional modernization, which is based on an integral consideration of modern concepts of ensuring safety, economy, efficiency and environmental friendliness.

A strategy for carrying out constructive (dimensional) modernization of passenger ships has been developed, which will ensure their effective operation during a certain period of the life cycle, which is based on improving the structure of the main directions of passenger ship modernization, analyzing the start time of modernization in the life cycle, identifying a group of ships for which its implementation is most appropriate, forming a system of factors that influence the actual service life of ships and the possibility of its extension, an integrated system of indicators that reflect the results of technical and commercial operation of ships with the determination of the dynamics of these indicators during such a cycle.

An integrated model of dimensional modernization has been created, which describes the regularities of the influence of the degree of lengthening on the economic and technical and operational indicators of modernization, and is based on: a model of

economic efficiency with the results of calculating additional income, costs and profits - an assessment of the economic results of modernization; a model of functionality with the implementation of the total technical and operational and technical and production requirements and seaworthiness; a model of ship and shipping safety with the norms, rules, resolutions of the International Maritime Organization (IMO) and the requirements of classification societies. An ideological basis for the methodology has been built with the justification of its economic feasibility, determination of the start time, volume and setting of tasks for assessing changes in the functionality and safety of operation of modernized ships.

A method for determining the maximum length of a ship during dimensional modernization using the criterion of overall longitudinal strength is proposed, which is based on mandatory standards for ensuring the longitudinal strength of the hull, takes into account the patterns of changes in force factors depending on the degree of elongation of the ship. Additionally, a set of criteria for assessing the maximum elongation of the hulls of sea cruise liners has been formed, taking into account additional loads on them from the marine environment, which meet the requirements and rules standardized by the International Association of Classification Societies (IACS) and the Register of Shipping.

The method of accelerated determination of fatigue resistance characteristics of ship structures within the framework of the generalized method of assessing local hull strength has been improved, which is based on the integral method of recalculating the parameters of fatigue curves using the power function and Weibull function, which allows estimating the endurance limits of the material with high accuracy.

Methods for assessing changes in the seaworthiness of a vessel during its lengthening are proposed, which allows determining the permissible lengthening of the hull according to criteria that correspond to these qualities - maneuverability, stability, maneuverability, which are regulated by the International Convention (SOLAS-74/78), the Code for Ensuring the Stability of Ships and the Register of Shipping. A method for mandatory verification of modernized vessels for compliance with the EEDI energy efficiency criterion throughout their entire life cycle is proposed. The method for assessing the impact of hull lengthening on the main operational indicator of the seaworthiness of vessels - maneuverability is improved with an assessment of changes in the main factors that determine it - towing resistance and propulsive coefficient, and regularities of the impact on these parameters, and accordingly on maneuverability, of the degree of vessel lengthening are found.

Generalized mathematical models and simulation methods for studying transient regimes of propulsion complexes with a classical rowing electric power plant, with a propeller, with an Azipod have been created, which provide the possibility of quantitatively assessing the maneuverability properties of vessels and loads on the SEEU. The adequacy of such models and methods and the reliability of the results obtained have been confirmed in previous studies by comparing the modeling results with the published results of full-scale tests of a number of vessels. JAVA simulation models.

The criteria for dynamic similarity have been determined and the dimensionless parameters of propulsion complexes have been generalized. It has been scientifically

proven that the use of the selected criteria and parameters creates conditions for generalizing the results of research, some leveling of the influence of inaccuracies in determining individual parameters and external factors when predicting changes in maneuvering indicators during constructive modernization. An expanded (in comparison with the IMO “Standard of Maneuvering Qualities of a Ship”) list of maneuvering quality indicators has been formed. The set of proposed indicators allows assessing the maneuvering characteristics of ships, the load on the SEEU and its ability to ensure the functionality of ships and operational safety.

Methods have been developed to assess the impact of dimensional modernization on the main maneuverability indicators, which (according to the Standard) include inertial characteristics, maneuverability and controllability characteristics, and SEEU indicators of vessels with a classical arrangement of the rowing electric power plant. It has been confirmed that when lengthening vessels, the degree of deterioration of operational indicators is small, it does not go beyond the permissible limits - making a decision on the feasibility of lengthening the vessel is based on indicators of economic feasibility.

Methods for assessing the impact of dimensional modernization on maneuverability indicators and on the performance of the SEEU of vessels equipped with thrusters and Azipoid thrusters have been developed. The methods are characterized by the fact that the operating parameters of the Azipoid thrusters and Azipoid thrusters are presented taking into account the hydrodynamic processes of interaction of their propellers with the vessel hull. The patterns of the influence of the main parameters of the Azipod thrusters and Azipoid thrusters, maneuvering conditions and control parameters on the efficiency of vessel operation have been revealed.

Keywords: efficiency, technical operation, modernization, mathematical modeling, safe, highly efficient use, means of transport, sea vessels, maneuvering.