

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

Навчально-науковий інститут автоматики та електромеханіки
Кафедра електричної інженерії та електроніки

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

на тему:

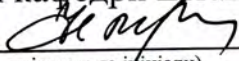
ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ПРОГНОЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ
ПІДРУЛЮЮЧИМИ ПРИСТРОЯМИ КОМБІНОВАНОГО
ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСУ

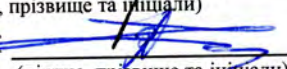
Виконав: студент 6 курсу, група 3601
спеціальності 271 «Морський та внутрішній
водний транспорт»,
ОПП «Експлуатація суднового
електрообладнання і засобів автоматики»
(шифр і назва спеціальності, назва ОПП)

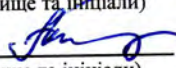
 Філімонов Дмитро Андрійович
(підпис, прізвище та ініціали)

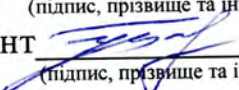
Допущений до захисту 11.12.2024
(дата малого захисту)

завідувач кафедри ЕІтаЕ

 М. Й. Муха
(підпис, прізвище та ініціали)

Керівник  В. В. Будашко
(підпис, прізвище та ініціали)

Нормоконтролер  А. І. Шестака
(підпис, прізвище та ініціали)

Рецензент  Т. М. Гвоздева
(підпис, прізвище та ініціали)

м. Одеса – 2024 рік

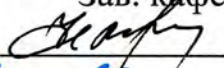
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

Навчально-науковий інститут автоматики та електромеханіки

Кафедра електричної інженерії та електроніки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою ЕІтаЕ

 М. Й. Муха
« 17 » 12 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на атестаційну дипломну роботу

Філімонова Дмитра Андрійовича

Тема випускної атестаційної роботи

"~~Вивчення~~ системи прогнозованого управління підрулюючими пристроями комбінованого пропульсивного комплексу"

~~Визначена~~ наказом ректора академії від 04 грудня 2024 р. № 1703

В Термін здати курсантом закінченої роботи до	<u>10.12.2024 р.</u>
В Діючі дні до роботи: характеристика пропульсивного комплексу	
Висхідний двигун (ГД):	3516 В 1600 kW
Висхідні :	2 ГФК 1010 1200 kW/347 RPM
Висхідні дизель-генератори (ДГ):	4x1600 kW;
Висхідні електричні двигуни :	5
Висхідний підрулюючий пристрій (ПП):	1
Висхідний ПП :	2
Висхідний ДГ	
Висхідні гвинти :	800 kW / 325 RPM 800 kW / 1750 RPM

~~В~~ Дослідницька частина кваліфікаційної роботи за освітньо-
~~професійною~~ програмою Експлуатація суднового електрообладнання і
~~автоматики~~ спеціальності 271 «Морський та внутрішній водний
~~транспорт~~» другого (магістерського) рівня вищої освіти:

- ~~4.1~~ Формулювання та об'єднання принципів моделювання та управління
- ~~4.2~~ Динамічні властивості транспортних засобів морського базування із
комутаторними підрулюючими пристроями, як об'єктів управління
- ~~4.3~~ Уточнення кінематичних зв'язків з урахуванням ступеневих
об'єктів
- ~~4.4~~ Ефективне математичне моделювання підрулюючих пристроїв
з врахуванням кількості ступенів свободи
- ~~4.5~~ Приблизно оптимальне управління підрулюючими пристроями в
можливості від матриці розташування
- ~~4.6~~ Оптимізація розподілення упорів між підрулюючими пристроями в
процесі керування переміщенням судна

4.7 Організація розподіленого управління у відповідності до матриці розташування ПП

4.8 Принципи розробки системи управління рухом із інформаційними зворотними зв'язками

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1.	Формулювання та об'єднання принципів моделювання та управління	01.10.24-10.10.24	
2.	Динамічні властивості транспортних засобів морського базування із азимутальними підрулюючими пристроями, як об'єктів управління	11.10.24-20.10.24	
3.	Узагальнення кінематичних зв'язків з урахуванням ступеневих обмежень	20.10.24-30.10.24	
4.	Енергоефективне математичне моделювання підрулюючих пристроїв із врахуванням кількості ступенів свободи	1.11.24-11.11.24	
5.	Прогнозоване оптимальне управління підрулюючими пристроями в залежності від матриці розташування	12.11.24-20.11.24	
6.	Оптимізація розподілення упорів між підрулюючими пристроями в процесі керування переміщенням судна	21.11.24-30.11.24	
9.	Організація розподіленого управління у відповідності до матриці розташування ПП	1.12.24-05.12.24	
10.	Принципи розробки системи управління рухом із інформаційними зворотними зв'язками	06.12.24-09.12.24	
11.	Аналіз результатів моделювання	09.12.24-10.12.24	

Курсант-дипломник 
(підпис)

Філімонов Д.А.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи 
(підпис)

Будашко В.В.
(прізвище та ініціали)

Реферат

Дипломний робота складається із записки пояснення на 82 сторінках і списку літератури зі 101 джерел.

Автоматизація маневрування судна в обмежених умовах плавання вимагає, як правило, 100% резервування підрулюючих пристроїв (ПП) різних модифікацій і їх розташування відповідно до матриці. Ієрархія системи керування рухом розгалужена за рівнями з використанням контролерів високого рівня та алгоритмів розподілу керування ПП, що дозволяє створити модульну конструкцію з програмним забезпеченням, де контролер високого рівня може бути розроблений без вичерпної інформації про двигун двигуна. двигуни, а розгалуження вхідного сигналу та обмеження швидкості обробляються контролером руху. Але для певних конфігурацій ПП це розгалуження призводить до зниження ефективності керування через обмеження даних про фізичні характеристики судна і роботу контролера руху.

У цьому дослідженні розглядаються різні підходи до підвищення ефективності керування з використанням методів нелінійних прогнозних моделей управління як основи для розробки контролерів руху з оптимізацією рішень на основі відповідних обмежень. Реалізована розгалужена система є результатом вирішення двох простих задач руху судна, які виділяють суміжні проблеми. Критичні автоматизовані маневри для суден зазвичай вимагають надлишкового набору двигунів. Ієрархію системи керування рухом зазвичай поділяють на кілька рівнів із використанням високорівневого контролера руху та алгоритму розподілу двигунів.

Це дозволяє створити модульну конструкцію програмного забезпечення, де контролер високого рівня може бути розроблений без вичерпної інформації про двигуни, а детальні питання, такі як насичення вхідного сигналу та обмеження швидкості, обробляються системою управління. Однак для певного набору конфігурацій ПП це роз'єднання може призвести до поганої продуктивності керування через обмежені знання у контролера високого рівня про фізичні обмеження судна та поведінку ПП. У цій роботі досліджуються різні підходи до покращення продуктивності керування з використанням нелінійного прогнозованого керування моделлю (МРС) як основи для розроблених контролерів руху через його оптимізоване рішення та здатність задовольняти обмеження. По-перше, реалізується відокремлена система та надаються результати для двох простих рухових завдань, що показують проблеми, пов'язані з роз'єднанням. Після цього застосовуються два різні підходи для усунення виявлених недоліків. Розроблено нелінійний контролер МРС, що поєднує контролер руху та розподіл двигуна, що призводить до більш надійної системи керування. Потім, щоб зберегти модульність системи керування, проводиться дослідження можливих шляхів розширення відокремленої системи для досягнення подібної продуктивності, як у комбінованій системі.

Abstract

The thesis consists of an explanatory note on 82 pages and a list of references from 101 sources.

Automation of ship maneuvering in limited sailing conditions usually requires 100% redundancy of thrusters (THR) of various modifications and their locations in accordance with the matrix. The hierarchy of the motion control system is branched by levels using high-level motion controllers and THR control distribution algorithms, which allows for a modular design with software, where the high-level controller (HLC) can be designed without comprehensive information about the thruster motors, and the input signal branching and speed limits are handled by the motion controller. But, for certain THR configurations, this branching leads to the decrease in control efficiency due to the limitation of data on the physical characteristics of the ships and the operation of the motion controller.

This research examines different approaches to improving control efficiency using methods of nonlinear predictive control models as a basis for developing motion controllers with decision optimization based on relevant constraints. The implemented branched system is the result of solving two simple problems of ship's motion, which highlight the related problems.

Critical automated maneuvers for ships typically require a redundant set of thrusters. The motion control system hierarchy is commonly separated into several layers using a high-level motion controller and a thruster allocation (TA) algorithm. This allows for a modular design of the software where the high-level controller can be designed without comprehensive information on the thrusters, while detailed issues such as input saturation and rate limits are handled by the TA. However, for a certain set of thruster configurations this decoupling may result in poor control performance due to the limited knowledge in the high-level controller about the physical limitations of the ship and the behavior of the TA. This thesis investigates different approaches of improving the control performance, using nonlinear Model Predictive Control (MPC) as a foundation for the developed motion controllers due to its optimized solution and capability of satisfying constraints. First, a decoupled system is implemented and results are provided for two simple motion tasks showing problems related to the decoupling. Thereafter, two different approaches are taken to remedy the observed drawbacks. A nonlinear MPC controller is developed combining the motion controller and thruster allocation resulting in a more robust control system. Then, in order to keep the control system modularized, an investigation of possible ways to augment the decoupled system so as to achieve similar performance as the combined system is carried out. One proposed solution is a nonlinear MPC controller with time-varying constraints accounting for the current limitations of the thruster system. However, this did not always improve the control performance since the behavior of the ta still is unknown to the MPC controller.

Зміст

Реферат.....	4
Abstract	5
Зміст	6
Перелік умовних скорочень	7
Список рисунків	8
Список таблиць	10
Вступ	11
РОЗРОБКА СИСТЕМИ ПРОГНОЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ПІДРУЛЮЮЧИМИ ПРИСТРОЯМИ КОМБІНОВАНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ	12
1.1. Формулювання та об'єднання принципів моделювання та управління.....	12
1.2. Динамічні властивості транспортних засобів морського базування із азимутальними підрулюючими пристроями, як об'єктів управління.....	17
1.2.1. Узагальнення кінематичних зв'язків з урахуванням ступеневих обмежень.....	19
1.2.2. Узагальнення кінематичних зв'язків з урахуванням ступеневих обмежень.....	20
1.3. Енергоефективне математичне моделювання підрулюючих пристроїв із врахуванням кількості ступенів свободи.....	22
1.4. Методологія прогнозованого оптимального управління підрулюючими пристроями в залежності від матриці розташування.....	26
1.5. Оптимізація розподілення упорів між підрулюючими пристроями в процесі керування переміщенням судна	30
1.6. Організація розподіленого управління у відповідності до матриці розташування ПП	42
1.7. Методологія розробки систем управління рухом із інформаційними зворотними зв'язками.....	53
1.8. Висновки	65
Список використаних джерел	68

Перелік умовних скорочень

Скорочення, терміни, позначення	Пояснення
<i>ACADO</i>	<i>Automatic Control and Dynamic Optimization</i>
<i>DOF</i>	<i>Degrees of freedom</i>
<i>GNC</i>	<i>Guidance, navigation and control</i>
<i>GitHub</i>	<i>AI-powered developer platform</i>
<i>MCS</i>	<i>Motion Control System</i>
<i>MPC</i>	<i>Model Predictive Control</i>
СУР	Система управління рухом

Список рисунків

Рис. 2.1 Ієрархічна структура суднової автоматизованої системи управління рухом.....	15
Рис. 2.2 Швидкості, розкладені в нерухомій системі координат ТЗМБ:.....	20
Рис. 2.3 Визначення прикладення моментів і орієнтації судна, обладнаного кормовим підрулюючим пристроєм.....	23
Рис. 2.4 Відокремлена система керування рухом.....	30
Рис. 5 Модель багатофункціонального пропульсивного комплексу.....	32
Рис. 6 Зображення руху моделі в горизонтальній площині.....	34
Рис. 7 Результати першого тестового випробування для відокремленого режиму управління <i>MCS</i>	36
Рис. 8 Результати другого тестового випробування для відокремленого режиму управління <i>MCS</i>	40
Рис. 9 Структура комбінованої системи управління рухом.....	42
Рис. 10 Різниця між функцією абсолютного значення та апроксимацією, заданою (32) для $\varepsilon = 0,01$	43
Рис. 11 Результати першого тестового випробування для комбінованого режиму управління <i>MCS</i>	48
Рис. 12 Результати другого тестового випробування для відокремленого режиму управління <i>MCS</i>	51
Рис. 13 Структура системи управління рухом, доповненої інформаційним зв'язком.....	53
Рис. 14 Визначення розрахункових траєкторій для першого тестового випробування.....	55
Рис. 15 Обмеження для τ_c^d на горизонті прогнозування $k = 1, \dots, N$ для $T_s = 1$, обчислений у момент часу t , коли $n = 0$ і $\alpha = 0$. Асиметрія імпульсу пов'язана з обмеженням від'ємних обертів гвинта, які встановлені нижче додатних.....	58

Рис. 16 Залежності заданої τ_c^d і фактичної сили τ_c , яка діє на судно.....	59
Рис. 17 Зображення руху моделі в горизонтальній площині	59
Рис. 18 Визначення розрахункових траєкторій із змінними в часі обмеженнями	60
Рис. 19 Експериментальна система із використанням комбінованої <i>MCS</i> як контролера руху високого рівня інтегрованим із контролером розташування ПП (<i>TA</i>)	61
Рис. 20 Сила, що діє на судно τ_c , і розрахована сила, яка має діяти на судно з урахуванням (12).....	62
Рис. 21 Рух моделі судна у горизонтальній площині.....	64
Рис. 22 Контрольовані від матриці розташування ПП залежності n і α	65

Список таблиць

Таблиця 1	Система параметрів або змінних для різних <i>DOF</i> судна або підводного апарату	17
Таблиця 2	Параметри фізичної моделі багатофункціонального пропульсивного комплексу та ініціалізованих підрулюючих пристроїв33	
Таблиця 3	Зведені дані процедури параметризації ініціалізованих підрулюючих пристроїв	34
Таблиця 4	Алгоритм розрахунку обмежень результуючої сили з урахуванням вимірювань (n, α)	56

Вступ

Об'єктом дослідження є метод побудови нелінійних прогнозних моделей управління як основи для розробки контролерів руху з оптимізацією рішень на основі відповідних обмежень.

Предметом дослідження є підвищення продуктивності із використанням нелінійного прогнозованого керування моделлю через його оптимізоване рішення та здатність задовольняти обмеженням функціонування комбінованого пропульсивного комплексу.

Методи дослідження. В роботі поєднуються теоретичні, чисельні та експериментальні методи дослідження. Теоретичні методи розроблялися у випадках, коли доводилося стикатися з абсолютно новими проблемами, що не досліджувалися раніше, або якщо застосування відомих методів виявлялося не раціональним для вирішуваних завдань. За допомогою теоретичних розробок створені розрахункові методи і система підтримки прийняття рішень, що їх реалізує. Експериментальні методи використовувались для верифікації отриманих результатів і математичних моделей. При цьому експерименти проводилися на розробленій фізичній моделі багатофункціонального пропульсивного комплексу зі змінною структурою і в суднових умовах, що дозволило максимально наблизити роботу до вирішення практичних завдань.

Дані, отримані в результаті експериментальних досліджень, і теоретичні результати зіставлені з чисельними рішеннями. Це зіставлення підтвердило достовірність результатів, що одержано за допомогою створеної системи підтримки прийняття рішень.

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ПРОГНОЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ПІДРУЛЮЮЧИМИ ПРИСТРОЯМИ КОМБІНОВАНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ

1.1. Формулювання та об'єднання принципів моделювання та управління

У цій главі обґрунтовується та описується методологія застосування нелінійного прогнозованого управління (англ. [*Model Predictive Control*](#) – MPC) КПК морських суден з підрулюючими пристроями, які використовуються як основа в системах управління рухом. У [15, 46] наводяться результати останніх досліджень у галузі гідродинаміки, навігації та систем управління морськими суднами. Авторами доводиться, як реалізація математичних моделей і сучасної теорії управління може бути використана для моделювання та верифікації систем управління, систем підтримки прийняття рішень і систем ситуаційної ідентифікації. Дослідження включають гідродинамічні моделі для морських суден, вітру, хвиль і океанських течій, динаміку та стабільність морських суден, розширені принципи динамічного позиціонування, синтез та визначення датчиків та аспекти інерційної навігації [53].

Найновіші інструменти для аналізу та проектування передових систем навігації (англ. [*Guidance, navigation and control*](#) – GNC) наведено у [67] де обговорюються безпілотні підводні апарати, надводні апарати та автономні апарати. Надаються посилання та приклади інженерних розробок, аналіз існуючих проєктів, а також *MatLab*-сценарії для практичної реалізації та тестування програмного забезпечення. Основні аспекти сучасного стану розвитку нелінійного прогнозованого управління включають:

- актуальні тематичні дослідження та робочі приклади, які [До змісту](#)

демонструють методи застосувати моделювання та керування дизайном щодо власних проектів;

- репозиторій [GitHub](#) зі *MatLab*-сценаріями та набором інструментів відповідних інструментів, сумісним з останніми версіями програмного забезпечення від *Mathworks*;
- новий вміст математичного моделювання, включаючи моделі для суден і підводних апаратів, гідродинаміки, керуючих сил та моментів;
- нові методи орієнтації та навігації, включаючи закони навігації прямої видимості (англ. [line of sight](#) – *LOS*), сенсорні системи, навігаційні системи на основі моделей та інерційні навігаційні системи.

Одні з найбільш проблемних систем сьогодення є системи динамічного позиціонування (англ. *Dynamic Positioning – DP*) [9, 15, 41, 57, 68, 94, 96, 100], які використовуються для утримання судна або бурової установки в нерухомому стані в горизонтальній площині або рухатися з низькою постійною швидкістю, використовуючи лише наявні підрулюючи пристрої (ПП). Основним критерієм щодо ефективності використання систем *DP*, є критерій мінімальної витрати палива з мінімальним зносом силової установки.

Судна, працюючи в режимі *DP*, для утримання позиції застосовують найбільшу кількість ПП, що призводить до перевантаження суднової електроенергетичної системи або її неефективного використання. Це відбувається, з одного боку, внаслідок забезпечення точного позиціонування, а з іншого – за рахунок надмірного резервування потужності на випадок відмови одного чи кількох ПП. За сприятливих умов це може зробити задачу керування більш простою, зводячи проблему *DP* до компенсації в трьох ступенях свободи горизонтальної площини за допомогою (трьох) незалежних *PID*-контролері [46].

Розширюючи робочий простір традиційних *DP*-систем, наприклад, щоб включити автоматизоване швартування та постановку у док для танкерів або низьку швидкість руху пасажирських поромів, необхідно адаптувати ці

системи для нового переліку суден. Ці судна, як правило, розробляються без надлишкової енергооснащеності і можуть бути не такими маневровими, на відміну від суден, що підтримують *DP*. Це означає, що система керування має краще використовувати доступну енергоефективність, забезпечуючи як вищий рівень автоматизації для широкого спектру суден, так і підвищення енергоефективності судна із системою *DP*. Розширення робочого простору, у якому працюють розроблені контролери, відбувається за рахунок застосування алгоритмів методу *Low Speed Motion Control* [47, 56, 82]. Останні досягнення оптимального управління разом із постійно зростаючим рівнем обчислювальної потужності дозволяють реалізувати в реальному часі вдосконалені контролери, працюючи за принципом прогнозованого управління, що забезпечує майже оптимальне керування судном і ПП.

Алгоритмічна структура [19], є загальною для багатьох автоматизованих суден. Система управління рухом (СУР) (англ. [*Motion Control System*](#) – *MCS*) найвищого рівня розраховує загальні сили та моменти, які повинні бути прикладені до судна. Алгоритм розподілу чи матриця розташування ПП обчислює задане значення орієнтації та швидкості гвинтів для окремих двигунів, щоб отримати сили, які задаються контролером руху. Цей метод відомий як роз'єднане управління [44]. Роз'єднання забезпечує більш гнучку та модульну конструкцію, оскільки налаштування контролеру високого рівня може залишатися незмінним для суден із різними конфігураціями ПП, тоді як оновлюються лише значення упорів ПП за новою конфігурацією. Однак це також може бути важливим недоліком. Наприклад, створення замкнутих алгоритмів управління вимагає, щоб контролер руху високого рівня не враховував фізичні обмеження судна та двигунів ПП. Це може створити проблему щодо загальної енергоефективності системи управління. На Рис.1 показано огляд загальної системної ієрархії для автоматизованих суден.

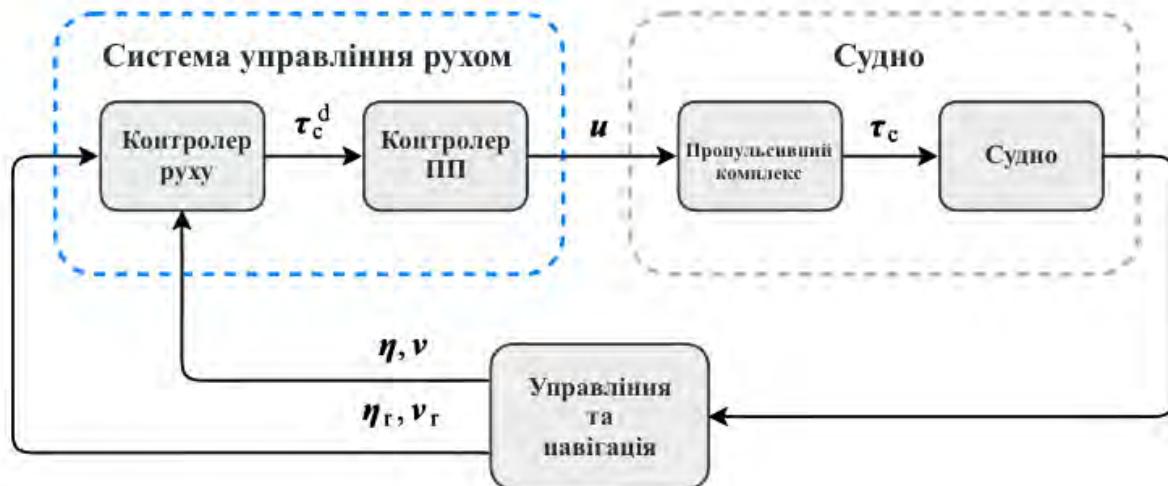


Рис.1 Ієрархічна структура суднової автоматизованої системи управління рухом

Основною проблемою на сьогодні залишається забезпечення енергоефективного управління рухом судна на низькій швидкості в горизонтальній площині із використанням контролера прогнозованого управління високого рівня.

Ціллю дослідження є реалізація та оцінка енергоефективності багаторівневого контролера для традиційної замкнутої системи управління рухом судна. Результатом має стати створення еталонного контролера, що поєднує багаторівневий контролер руху та алгоритм управління ПП в залежності від матриці розташування. І, нарешті, підвищення функціональності замкнутої системи до того рівня комбінованого контролеру.

Найбільш значущими протиріччями в цьому контексті залишаються:

- робочий простір розроблених контролерів обмежений переміщенням судна у горизонтальній площині;
- управління рухом здійснюється на низькій швидкості, тобто судном рухається зі швидкостями менше 2 м/с, щоб зменшити вплив нелінійних ефектів;
- вимірювання та оцінка положення та швидкості судна має вирішальне значення для точного керування рухом. Це завдання стає все більш

[До змісту](#)

складним через детермінований рух, викликаний хвилями. Таким чином, під час проектування контролера передбачається, що всі стани оцінюються за допомогою існуючого алгоритму або вимірюються безпосередньо;

- існуючі результати включають лише розробки контролерів СУР, тому що інтеграційні методи не досліджувалися. Крім того, алгоритмічні сторони вирішення задачі нелінійного управління не розглядалися;

- для зменшення складності математичного моделювання та налаштування, в основному в дослідженнях розглядалося одне конкретне судно з заданою конфігурацією ПП КПК.

Для вирішення зазначених проблем необхідно спочатку провести теоретичне дослідження динаміки судна та динамічного позиціонування, щоб ознайомитися із відмінностями традиційних методів, моделювання і термінології, що використовуються. Також необхідно проаналізувати теорію та попередні дослідження з використанням прогностного керування моделями.

Багаторівневий нелінійний *MPC*-контролер має бути розроблений і реалізований для замкнутої СУР із існуючим "чорним ящиком" та системою управління ПП. Існуюча конфігурація тестується та виводиться з рівноваги для знаходження недоліків, що виникають через роз'єднання. Після цього контролер розширяється за рахунок включення в контур модуль розподілу упорів між двигунами ПП, таким чином вирішуючи комбіновану проблему керування рухом і ПП. Це буде розглядатися як еталонний контролер для замкнутої СУР судна. На основі попередніх результатів планується покращення енергоефективності замкнутої системи шляхом включення більшої інформації в *MPC*-контролер високого рівня.

Технологія розробки *MPC*-контролерів заснована на використанні інтерфейсу *MatLab* для набору інструментів *ACADO* ([*Automatic Control and Dynamic Optimization*](#)) з відкритим кодом [58] з проблемою оптимізації, вирішеною у [61]. Для онлайн-розв'язувача був згенерований код [74],

реалізований в середовищі моделювання *Simulink* за допомогою *S*-функції *MatLab*.

1.2. Динамічні властивості транспортних засобів морського базування із азимутальними підрулюючими пристроями, як об'єктів управління

Транспортний засіб морського базування (ТЗМБ), як об'єкт із 6-ма ступенями свободи, рухається у відповідності до законів, описаних в [8] та наведено у [Таблиця 1](#). У [45, 90, 101] загальна модель, що описує динаміку судна представлена виразами:

$$\dot{\eta} = J(\eta)v, \quad (1)$$

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau, \quad (2)$$

де (1) описує кінематику ТЗМБ, а (2) описує кінетику. Матриця $J(\eta) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ є матрицею перетворення, тоді як матриці $M \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$, $C(v) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ та $D(v) \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ описують інерційність приєднаних мас, сили Коріоліса та демпфування транспортного засобу відповідно. Вектор $g(\eta) \in \mathbf{R}^6$ описує відновні сили, що діють на транспортний засіб за рахунок плавучості та гравітації. У правій частині (2) $\tau \in \mathbf{R}^6$ є вектором сил і моментів, що створюються виконавчими механізмами підрулюючих пристрів та факторами зовнішнього середовища (вітер, хвилі, течія) та діють на ТЗМБ впродовж певного експлуатаційного режиму:

$$\tau = \tau_c + \tau_{env}, \quad (3)$$

де τ_c – керуючі сили та моменти, а τ_{env} – сили та моменти, що виникають внаслідок збурень довкілля.

Таблиця 1

Система параметрів або змінних для різних *DOF* судна або підводного апарату

[До змісту](#)

№ з/п	<i>DOF</i>	Визначення параметра або змінної	Опис
1	6	$\eta = [xyz\phi\Theta\psi]^T \in \mathbf{R}^6$	Орієнтація ТЗМБ за 6 ступенями свободи, заданим положенням і кутами Ейлера в інерційній системі
2		$v = [uvw\omega pqr]^T \in \mathbf{R}^6$	Лінійна та кутова швидкості в нерухомій системі координат тіла
3		$\tau = [XYZKMN]^T \in \mathbf{R}^6$	Декомпозиція сил і моментів для нерухомої системи координат тіла
4	3	$\eta = [xy\psi]^T \in \mathbf{R}^3$	Горизонтальна орієнтація із 3 ступенями свободи, задана декартовою позицією (x, y) і курсового кута ψ
5		$v = [uvr]^T \in \mathbf{R}^3$	Швидкості судна в нерухомій системі координат під час прямолінійного руху (u), хитавиці (v) і нищпоренні (r) відповідно
6		$\tau = [XYN]^T \in \mathbf{R}^3$	Сили та моменти в системі координат, закріплених за тілом, під час прискорень (X), коливань (Y) та поворотів (N) відповідно.

Однак ці припущення стосуються керування положенням і курсом об'єкту управління на поверхні води, тобто для удосконалення саме цієї

[До змісту](#)

складової системи управління та задля зменшення ступеню математичних моделей розглядається лише горизонтальний рух. Таким чином, модель, наведена у (1), (2), зменшується до 3-*DOF*. Рух при хитовиці z , тангажі θ та крені ϕ на цьому етапі не відстежується і не компенсується.

1.2.1. Узагальнення кінематичних зв'язків з урахуванням ступеневих обмежень

У моделюванні було використані дві різні системи координат: інерційна (нерухома) система координат, яка використовується для опису положення та орієнтації судна в глобальних координатах та кутах Ейлера, як $[x \ y \ z]^T$ та $[\phi \ \theta \ \psi]^T$, відповідно та рухома система координат, що описує сили, крутні моменти, лінійні швидкості та кутові швидкості $[X \ Y \ Z]^T$, $[K \ M \ N]^T$, $[u \ v \ w]^T$, $[x \ y \ z]^T$, а також $[p \ q \ r]^T$ відповідно. Рухома система координат, змінні позначені індексом $\{b\}$, зазвичай пов'язана із ТЗМБ через те, що точка відліку знаходиться в центрі ваги, а вісь x_b спрямована вперед, у бік носа, вісь y_b – правий борт, а z_b – спрямована донизу [19, 45]. Нерухома система координат – декартова локальна дотична система координат *NED* (північ-схід-вниз, англ. – *North-East-Down*), змінні позначені індексом $\{n\}$. Початок координат фіксується в точці на поверхні Землі, вісь x_n спрямована на північ, вісь y_n – на схід, а вісь z_n – до центру Землі. У цій главі *NED*-система вважається інерційною, що є доцільним з точки зору того, що враховані швидкості задіяні в законах управління рухом на відносно низьких швидкостях. Узагальнюючий візуальний опис використовуваних систем координат, що характеризує зв'язок між *NED* і рухомою системою координат із розкладеними швидкостями, показаний на Рис. 2.

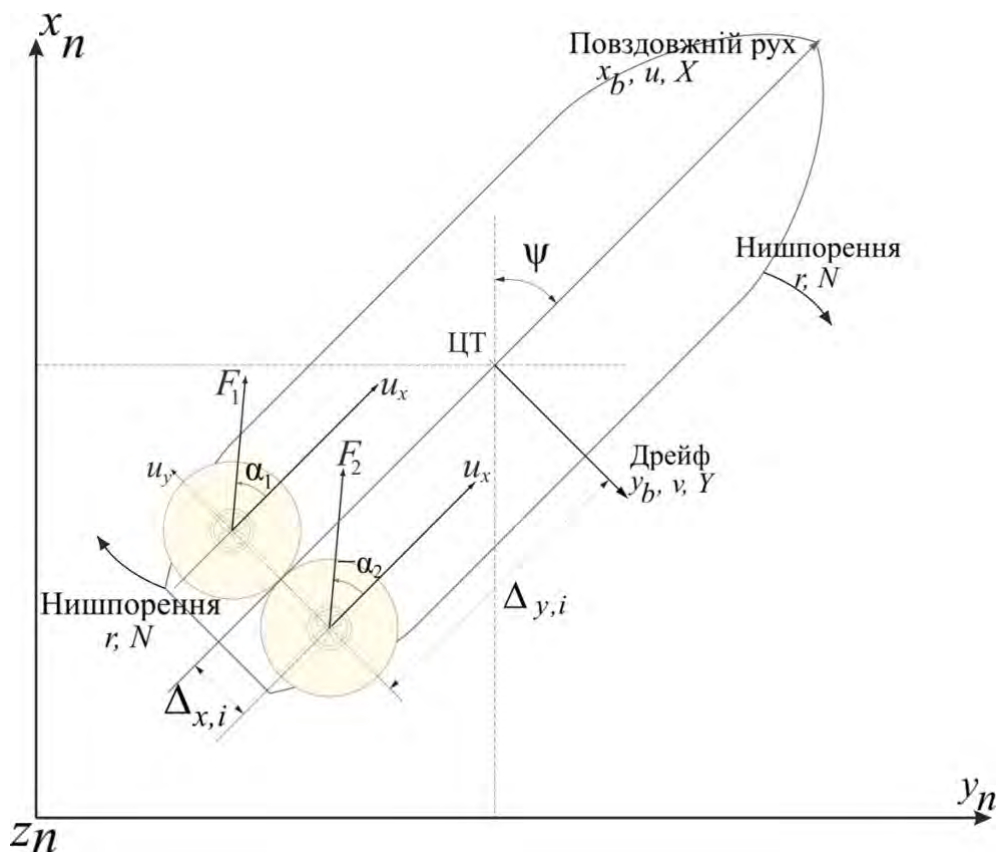


Рис. 2 Швидкості, розкладені в нерухомій системі координат ТЗМБ:

ψ – курсовий кут.

Положення та курс η судна вимірюється в $\{n\}$, тоді як швидкості v і сили τ будуть розкладені в $\{b\}$ (Рис. 2). Це є підставою для суто геометричних перетворення матриць у (2), які в результаті зводиться до:

$$\dot{\eta} = R(\psi)v, \quad (4)$$

у 3-DOF, де $R(\psi) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ є матрицею, що обертається, заданою

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

1.2.2. Узагальнення кінематичних зв'язків з урахуванням ступеневих обмежень

Кінетика описує рух тіла під дією сил і моментів. Модель кінетичного руху ТЗМБ можна вивести за допомогою механіки твердого тіла та теорії гідродинаміки [46, 50, 86, 89]. При розгляді руху ТЗМБ у 3-DOF, (2) разом із (3) зводиться до:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau}_c + \boldsymbol{\tau}_{env}, \quad (6)$$

де $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}(\mathbf{v})$ і $\mathbf{D}(\mathbf{v}) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$.

З метою проектування контролера часто зручно працювати з лінійними моделями [14, 52]. Для обмежень щодо низьких швидкостей і з урахуванням квадратичної залежності непостійних членів у $\mathbf{C}(\mathbf{v})$ і $\mathbf{D}(\mathbf{v})$, рівняння (6) можна спростити до лінійного динамічного рівняння:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau}_c + \boldsymbol{\tau}_{env}. \quad (7)$$

Якщо припустити, що ТЗМБ є симетричним у площині $x_b z_b$ із початком координат $\{b\}$, що співпадає із центром тяжіння, то відповідні матриці, як правило, мають наступну структуру:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 \\ 0 & \times & \times \\ 0 & \times & \times \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \times & 0 & 0 \\ 0 & \times & \times \\ 0 & \times & \times \end{bmatrix}, \quad (8)$$

таким чином, що поступальний рух відокремлюється від хитами та нишпорення. Матричні елементи в $\mathbf{M}$ впливають з механічних властивостей конкретного ТЗМБ, таких як маса та інерція, а також з гідродинаміки, яка описує поведінку приєднаних мас води, тоді як елементи в $\mathbf{D}$ є чисто похідними від гідродинаміки.

Підсумовуючи наведені вище, констатуємо, що спрощена модель динаміки ТЗМБ для 3-х ступенів свободи знайдена шляхом об'єднання (4) і (7), як

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{R}(\boldsymbol{\psi})\mathbf{v} \quad (9)$$

та

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau}_c + \boldsymbol{\tau}_{env}, \quad (10)$$

зі станами $[\eta^T v^T]^T$ і входом τ_c . Модель можна записати як просторову модель станів, шляхом перестановки (10) із перемноженням обидвох сторін матриці на обернену матрицю M .

1.3. Енергоефективне математичне моделювання підрулюючих пристроїв із врахуванням кількості ступенів свободи

ТЗМБ можуть бути оснащені ПП різних типів, основне призначення яких полягає в створенні контрольованої сили поштовху для отримання бажаного руху [17, 18]. В управлінні рухом на низькій швидкості найчастіше використовуваним є азимутальні ПП. В такому випадку моделювання передбачає квадратичне співвідношення між тягою та керуючою змінною, що робить його загальним для більшості ПП даного типу.

Керуючі сили та моменти τ_c , створювані ПП, залежать від його розташування та орієнтації відносно діаметральної площини та від абсолютної величини створюваної сили (тяги). Таким чином, у загальному випадку для матриці M ПП [17] τ_c можна записати як:

$$\tau_c = h(\alpha, n), \quad (11)$$

де $\alpha \in \mathbf{R}^M$ – вектор кутів розташування рушіїв, $n \in \mathbf{R}^K$ – вектор швидкостей гвинта. Для низьких швидкостей h зазвичай має вигляд [18, 19]:

$$\tau_c = T(\alpha) f(n), \quad (12)$$

де $f(n) \in \mathbf{R}^M$ – вектор величини тяги для кожного двигуна ПП, а

$$T(\alpha) = [t_1, \dots, t_N] \in \mathbf{R}^{n \times M} \quad (13)$$

описує геометрію конфігурації двигуна. Для $n = 3-DOF$, стовпці $T(\alpha)$ задані як

$$t_i(\alpha_i) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_i) \\ \sin(\alpha_i) \\ \Delta_{x,i} \sin(\alpha_i) - \Delta_{y,i} \cos(\alpha_i) \end{bmatrix}, i = 1, \dots, M, \quad (14)$$

де $\Delta_{x,i}$ та $\Delta_{y,i}$ – плече прикладення моменту, задані в фіксованій системі координат тіла, а α_i зумовлює кут розташування ПП, такий що позитивним за годинниковою стрілкою від осі x_b , Рис. 3.

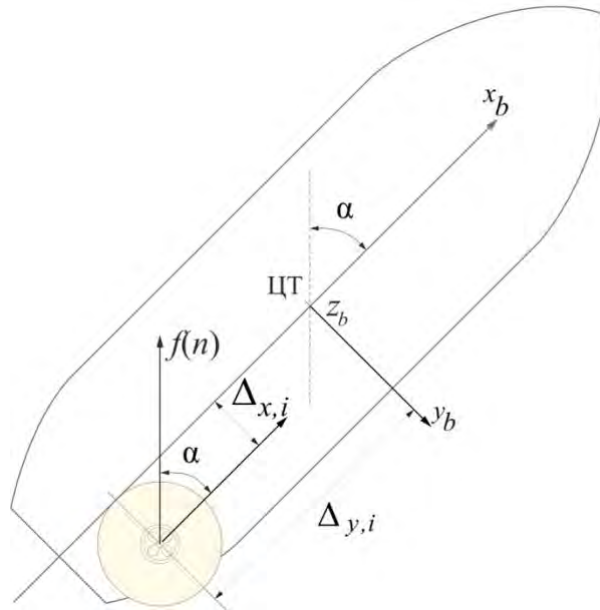


Рис. 3 Визначення прикладення моментів і орієнтації судна, обладнаного кормовим підрулюючим пристроєм.

Для управління рухом на низькій швидкості передбачається, що тяга f , що створюється двигуном ПП, пропорційна квадрату швидкості обертання гвинта. Точніше, за умови тяги від кнехту (нерухоме судно), усталена осьова тяга $f(i)$ i -го двигуна ПП симетрично розташованих гвинтів визначається як:

$$f_i = k_i n_i |n_i|, i = 1, \dots, M, \quad (15)$$

де k_i – константа, а n_i – кутова швидкість гвинта [22, 26, 28]. Згодом вектор тяги $f(n)$ у (12) можна записати у вигляді:

$$f(n) = \begin{bmatrix} f_1(n_1) \\ \vdots \\ f_M(n_M) \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} n_1 |n_1| \\ \vdots \\ n_M |n_M| \end{bmatrix}, \quad (16)$$

де $K \in \mathbf{R}^{M \times M}$ – діагональна матриця з $[k_1, k, \dots, k_N]$ по діагоналі. Однак, треба зауважити, що загалом створювана тяга ПП залежить від швидкості рідини

навколо гвинта, яка, у свою чергу, пов'язана зі швидкістю судна [10, 11, 20, 22, 26].

Було встановлено, що тяга, створювана гвинтом, за деякими припущеннями пропорційна квадрату швидкості обертання. Це також справедливо для прикладеного крутного моменту [93, 95]. З механіки відомо, що потужність ПП P пропорційна крутному моменту T при частоті обертання ω .

Таким чином, загальне наближення для потужності, необхідної для обертання гвинта, є

$$P \propto n^3 \quad (17)$$

де n – швидкість обертання гвинта ПП, об/хв. Крім того, наведене вище співвідношення зазвичай виконується для умов відкритої води, тобто пропелер перебуває під дією безперешкодного і рівномірного потоку води.

Для азимутальних ПП це може бути не так, коли упор здійснюється за рахунок зворотного обертання гвинта. Крім того, гвинти іноді розроблені таким чином, щоб бути більш ефективними в одному напрямку, ніж в іншому. Таким чином, ефективність двигуна ПП може бути різною залежно від того, реверсивний він чи ні. Такі двигуни ПП є асиметричним.

Декомпозиція керування асиметричними ПП – це метод, який часто використовується в аерокосмічній та морській інженерії для керування надлишковістю приводів при проєктуванні динамічних систем, працюючих в експлуатаційних режимах із перевантаженням [1, 6, 27, 32, 35]. Потім система управління розділяється за законом, що визначає загальне зусилля керування, яке необхідно створити, і алгоритм розподілу керування, який розподіляє зусилля між виконавчими механізмами. Розподіл керування ідентифікується відносно двигуна ПП, маючи на увазі завдання розподілу бажаної узагальненої сили τ^d_c між двигунами ПП. Таким чином, головним принципом розташування ПП є реалізація τ^d_c у будь-який час. Однак, через надлишковість у приведенні в дію є свобода у виборі способу розподілу сил, тобто вибору керуючого входу

[До змісту](#)

$u = (n, \alpha)$. Чим більшою кількістю ПП обладнане судно, тим більше комбінацій вхідних даних можна використовувати для отримання τ_c^d . Проблема вибору вхідного параметра u природно вирішується шляхом його формування як задачі оптимізації, де функція витрат зазвичай передбачає мінімізацію споживання палива або енергії, а обмеження враховують обмеження конкретного двигуна ПП та його зносостійкість [31, 33, 34, 38, 46, 49].

Можливо, найпростішу форму розподілу упорів ПП можна знайти у сумісному вирішенні (12) та (16). Зміна змінної $v_i = n_i |n_i|$ відбувається введенням унікальної зворотної $n_i = \text{sign}(v_i) \sqrt{|v_i|}$, що призводить до співвідношенню

$$\tau_c^d = T(\alpha) K v, \quad (18)$$

між бажаним завданням упору від контролера руху τ_c^d і завдань управління приводом ПП n і α . Із урахуванням того, що α є постійною величиною, тобто двигуни ПП мають фіксовану орієнтацію відносно діаметральної площини, $T(\alpha) K$ також є постійним. Якщо фізичні обмеження положення ПП не розглядаються, то оптимізаційну задачу можна сформулювати як зважену задачу найменших квадратів:

$$\begin{aligned} \min_v \quad & v W v^T \\ \text{s.t.} \quad & \tau_c^d - H v = 0. \end{aligned} \quad (19)$$

Рішення знаходиться шляхом диференціювання та встановлення операційного нуля, наступним чином:

$$v = W^{-1} H^T (H^T W^{-1} H)^{-1} \tau_c^d. \quad (20)$$

Якщо $W = I$, то рішення (20) зводиться до псевдооберненої матриці Мура-Пенроуза [5].

Однак при розгляді азимутальних ПП α не є постійним. Крім того, не гарантується, що дане розташування ПП здатне забезпечувати бажану силу поштовху τ_c^d , якщо для цього необхідна сила, яка перевищує можливості

двигунів ПП, наприклад, внаслідок насичення. Узагальнена постановка проблеми буде наступною:

$$\begin{aligned} \min_{u,s} \quad & p(\eta, v, u, s, t) \\ \text{s.t.} \quad & \tau_c^d - h(\eta, v, u, t) = s' \\ & g(\eta, v, u, t) = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

де p – деяка функція оцінювання станів (η, v) , входів $u = (n, \alpha)$, змінних затримки s і часу t . Обмеження p у (21) представляє головний пріоритет розподілу упору двигуна, але з додаванням s у випадку, якщо це неможливо.

Для визначення пріоритету змінна затримки зазвичай має набагато більшу вагу в p , ніж інші змінні. Для низької швидкості функція h зазвичай представлена правою частиною (12). Обмеження у (21) представляють собою технічні обмеження ПП, такі як обмеження моменту або потужності.

Загалом, проблема розподілу упорів та моментів двигунів ПП (21) на сьогодні є невирішеною. Це означає, що розв’язання оптимізації може зупинитися в якомусь локальному мінімумі. Для асиметричних ПП, які розроблені для максимальної ефективності в одному напрямку, але не є такими ефективними під час обертання в зворотному напрямку, це означає, що ПП може в кінцевому підсумку не забезпечити необхідну тягу. Цю проблему можна вирішити різними способами, зокрема, загальним підходом є наявність екзогенного алгоритму, який оцінює, чи є обертання двигуна ПП ефективним для певного експлуатаційного режиму [24, 34, 60, 72, 78, 84, 85].

1.4. Методологія прогнозованого оптимального управління

підруючими пристроями в залежності від матриці розташування

Прогнозоване управління (англ. – *Model Predictive Control, MPC*) базується на стратегії, основні функції якої включають можливість керувати

системами з декількома входами та декількома виходами із використанням внутрішньої моделі для прогнозування майбутніх станів і здатністю явно обробляти обмеження на стани та вхідні дані, такі як напруга живлення або рівень моменту опору. Різниця між лінійними і нелінійними системами *MPC* полягає в тому, що остання можуть працювати з нелінійною динамікою та обмеженнями. У будь-якому випадку вхідний сигнал керування обчислюється шляхом розв'язання задачі оптимального керування із кінцевим значенням на кожному інтервалі вибірки. У безперервному часі закон оптимального управління можна сформулювати наступним чином:

$$\begin{aligned}
 & \min_{u(\cdot)} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t, x(t), u(t), x_r(t), u_r(t)) dt + f_N(x(t_0+T), x_r(t_0+T)), \\
 & s.t. \quad x(t_0) = x_0, \\
 & \quad \dot{x}(t) = f(x(t), u(t)), \quad \forall t \in [t_0, t_0+T], \\
 & \quad g(t, x(t), u(t)) \leq 0, \quad \forall t \in [t_0, t_0+T].
 \end{aligned} \tag{22}$$

де $x(t) \in \mathbf{R}^{nx}$ – стани системи, а $u(t) \in \mathbf{R}^{mu}$ – керуючі входи. Вхідними даними для системи керованого оптимального управління є поточна оцінка стану x_0 і опорні траєкторії $x_r(t)$ і $u_r(t)$, $\forall t \in [t_0, t_0+T]$. Завдання контролеру визначається функцією енергетичних втрат (22), яка тут складається з двох членів: поточних втрат $f(\cdot)$ і кінцевих $f_N(\cdot)$. Функція кінцевих втрат полягає в оцінці їх досягнення кінцевого стану $x(t_0+T)$, тоді як поточні втрати представляють завдання та втрати для досягнення цього завдання. Поширеним способом побудови термінів та межі втрат є використання цільової функції найменших квадратів, зважування різниці між станами, вхідними даними та відповідними обмеженнями:

$$\begin{aligned}
 f(\cdot) &= \|x(t) - x_r(t)\|_{Q_x}^2 + \|u(t) - u_r(t)\|_{Q_u}^2, \\
 f_N(\cdot) &= \|x(t) - x_r(t)\|_{R_x}^2.
 \end{aligned} \tag{23}$$

Динамічна моделі, які використовуються для прогнозування, задаються формулами для безперервних величин (22), які містять задані обмеження

системи. Проектні змінні включають межу прогнозування T , яка визначає наскільки контролер є оптимальним з точки зору прогнозу, і вагові матриці $Q_x \geq 0$, $Q_u > 0$ і $R_x \geq 0$, що визначають записи завдань в функції втрат.

Однак, для розв'язання (22) його необхідно дискретизувати. Існує цілий ряд різних методів дискретизації неперервних систем, таких як вибірка Ейлера та методи Рунге-Кутта. Дискретною версією (22) з урахуванням (23) із частотою дискретизації $1/T_s$ є:

$$\begin{aligned} \min_{U_i} \sum_{k=0}^{N-1} & \|x_{i+K} - x_{i+K}^{ref}\|_{Q_x}^2 + \|u_{i+K} - u_{i+K}^{ref}\|_{Q_u}^2 + \|x_{i+N} - x_{i+N}^{ref}\|_{R_x}^2, \\ \text{s.t.} \quad & x_i = x_0, \\ & x_{i+K+1} = f_d(x_{i+K}, u_{i+K}), \quad k = 0, \dots, N-1, \\ & g_{d,i}(x_{i+K}, u_{i+K}) \leq 0, \quad k = 0, \dots, N-1. \end{aligned} \quad (24)$$

де $N=T/T_s$. Рішення, яке є мінімумом (24) у момент часу i , є траєкторією керуючих входів $U_i^* \in R^{N \times nu}$. Ця траєкторія обчислюється у відкритому циклі, і для досягнення зворотного зв'язку використовується лише перший елемент в U_i^* . Потім система розширюється, і проблема знову вирішується в наступному інтервалі вибірки $i+1$. Оскільки задача оптимізації вирішується на кожному інтервалі вибірки, системи прогнозованого управління мають тенденцію до ускладнення обчислення. Складність проблеми зростає із збільшенням кількості станів і входів, а також діапазону та вектору прогнозування N . Таким чином, існує компроміс між великими діапазоном та вектором прогнозування та швидким контролером.

У випадку лінійної моделі та відповідних обмежень будемо мати:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k, \\ F_x x_k &\leq b_x, \\ F_u u_k &\leq b_u. \end{aligned} \quad (25)$$

(24) можна переформулювати як задачу квадратичного програмування (англ. – *Quadratic Programming, QP*) [5, 16, 28, 42, 55, 92]. Тоді проблема

оптимізації є опуклою з точки зору глобального оптимального рішення. Розв'язання нелінійної задачі (24) ускладнюються тим, що задача оптимізації в загальному випадку стає неопуклою. Одним із поширених підходів до вирішення неопуклих задач є лінеаризація системи навколо деякої точки, наприклад еталонної, а потім формулювання стандартного QP . Це дозволяє розв'язувачу знайти глобальне рішення апроксимованої проблеми. Інші методи, такі як послідовне квадратичне програмування (англ. – *Sequential Quadratic Programming, SQP*), методом послідовної ітерації вирішують численні проблеми QP , наближаючи нелінійну програму до збіжності. Натомість набір інструментів *ACADO* експортує схему ітерацій у реальному часі (англ. – *Real Time Iterations, RTI*) для оптимізації, спрямованої на надання приблизного, але швидкого рішення. Схема *RTI* по суті працює шляхом лінеаризації проблеми навколо оцінки поточного стану та вирішення одного QP на кожній ітерації, таким чином роблячи її лише незначно повільнішою, ніж лінійна система *MPC* [54, 61, 66].

Таким чином вирішення завдання прогнозованого управління формулюють в безперервному часі із залежністю від t для станів і елементів керування. Дискретизація проблеми здійснюється за допомогою або набору інструментів *ACADO*, де можливо експортувати як індивідуальні явні, так і неявні методи інтеграції [5, 16, 28, 42, 55, 92], або для контролерів використовують нелінійний *MPC*-контролер.

1.5. Оптимізація розподілення упорів між підрулюючими пристроями в процесі керування переміщенням судна



Рис. 4 Відокремлена система керування рухом

ТЗМБ, які маневрують на низьких швидкостях або працюють в режимі *DP*, як правило, обладнані надлишковою кількістю ПП з точки зору забезпеченості безперебійності, що означає існування більше одного або однакової кількості керуючих входних сигналів n_u для відповідної кількості ступенів свободи *DOF* n [2, 4, 7, 18, 19, 26]. Це дозволяє збільшити точність керування судном у горизонтальній площині та, у разі резервування, підтримувати керованість на випадок відмови одного або кількох ПП. Процедура імплементації методу складається з опису ієрархії керування та впровадженню цієї ієрархії з використанням нелінійної моделі прогнозованого керування та ітераційного усування недоліків в залежності від отриманих результатів.

Традиційний *MCS* для ТЗМБ ділиться на кілька рівнів [13, 17, 21, 23]. По-перше, контролер руху високого рівня приймає вимірний або оцінений стан судна (η, v) і опорний сигнал (η_r, v_r) як входні дані. Опорним сигналом може бути задане значення, шлях або траєкторія. Потім завдання полягає в тому, щоб обчислити бажану узагальнену силу, що прикладається до судна τ_c^d ,

відповідну еталонному завданню. Для цієї мети необхідно розробити декілька різних алгоритмів, починаючи від роз'єднаних *PID* до лінійно-квадратичних і нелінійних контролерів. По-друге, алгоритму розподілу упорів ПП призначений для створення бажаної сили τ_c^d шляхом керування швидкостями та орієнтацією ПП $u=(n, \alpha)$ (Рис.1).

MPC-контролер є контролером руху високого рівня, динамічна модель якого (9) та (10) використовується для прогнозування, але із заміною τ_c^d , замість τ_c , оскільки останнє не впливає безпосередньо на судно (Рис. 4).

Для застосування фізичних обмежень на судно та систему ПП, вхідний сигнал τ_c^d , необхідно обмежити як по амплітуді, так і по швидкості, що реалізуються шляхом доповнення моделі за допомогою:

$$\begin{aligned}\dot{\tau}_c^d &= T_c \left(-\tau_c^d + \tau_a \right), \\ \dot{\tau}_a &= u_\tau,\end{aligned}\tag{26}$$

де $T_c \in \mathbf{R}^{n \times n}$ – діагональна матриця постійних часу, а u_τ тепер – керуюча змінна. Таким чином, обмеження швидкості τ_c^d можна сформулювати як обмеження величини u_τ .

Об'єднавши динамічну модель (9) та (10) з (26) разом із обмеженнями, нелінійний безперервний час закону оптимального управління сформулюється наступним чином:

$$\begin{aligned}\min_{u_\tau} \quad & \int_0^{T_s N} \left(\|\eta - \eta_r\|_{Q_\eta}^2 + \|v - v_r\|_{Q_v}^2 + \|\tau_c^d\|_{Q_\tau}^2 + \|u_r\|_{Q_{d\tau}}^2 \right) dt, \\ \text{s.t.} \quad & \dot{\eta} = R(\psi)v, \\ & M\dot{v} + Dv = \tau_c^d, \\ & \dot{\tau}_c^d = T_c \left(-\tau_c^d + \tau_a \right), \\ & \dot{\tau}_a = u_\tau, \\ & \tau_c^d \leq \tau_c^d \leq \bar{\tau}_c^d, \\ & u_{-\tau} \leq u_\tau \leq \bar{u}_\tau,\end{aligned}\tag{27}$$

де отримання кінцевого значення передбачає ті ж самі умови, що й проміжні. Проміжні функції у (27) дозволяють змінювати час на η і v , тоді як величина

узагальненої сили та її швидкість відповідно корегуються. Вагові матриці Q_x можуть бути змінені в залежності від стратегії управління. Наприклад, якщо потрібно рухатися за траєкторією, курс ψ і повздовжній рух u можуть бути точніше скореговані, одночасно корегуючи вагові коефіцієнти τ_c^d за відповідними висями (x, y) . Обмеження у (27) визначають динамічну модель і обмежують величину та швидкість узагальненої сили τ_c^d .

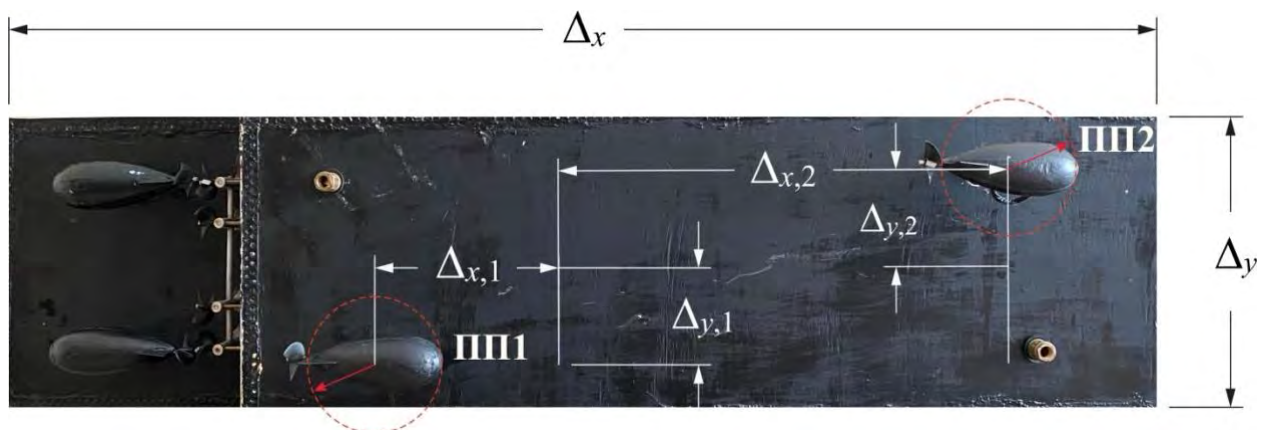
Ефективність керування перевіряється в моделюванні з використанням відповідної моделі багатофункціонального пропульсивного комплексу для варіанту роботи двох ПП типу *Azipod*[®], максимально рознесеними відносно діаметральної площини судна (

Рис. 5). Високорівнева організація системи *MPC* реалізована за добре відомим низько швидкісним алгоритмом із розташуванням ПП для варіанту (21). Крім того, для даного випадку можливе асиметричне розташування ПП. Таким чином, намагаючись миттєво досягти бажаного упору, для мінімізації споживання енергії застосовується одночасне обертання двигунів ПП з частотою обертання, яка вважається додатною проти годинникової стрілки.

Рис. 5 Модель багатофункціонального пропульсивного комплексу

Із (

Рис. 5) стає очевидним, що ПП забезпечують упор з усіма трьома



ступенями свободи, оскільки двигуни ПП можуть обертатися у будь-якому напрямку. Однак, в залежності від орієнтації ПП, в деякі моменти тяга в певному напрямку може дорівнювати нулю. Ці обмеження у (27) є досить

[До змісту](#)

складними та неоднозначними для визначення. Для випадку, коли потоки від двигунів ПП нерухомі (постійний кут α), використовують (12) із урахуванням специфікації конкретного ПП для розрахунку відповідних обмежень амплітуди та швидкості збільшення завдання τ^d_c . Таким чином, обмеження розглядаються більше як параметри налаштування, ніж фактичні фізичні обмеження.

Моделювання режимів *MCS* виконувалося у широкого діапазоні маневрування для випадків еталонної швидкості $v_r = 0$ та кроку еталонної позиції η_r при $t = 8$.

Параметри фізичної моделі, зображеної на (Рис. 5), наведені у (Таблиця 2).

Таблиця 2

Параметри фізичної моделі багатофункціонального пропульсивного комплексу та ініціалізованих підрулюючих пристроїв

№ з/п	Параметр	Значення	
1	Довжина, Δ_x	140 см	
2	Ширина, Δ_y	40 см	
3	Осадка	20 см	
4	Водотоннажність	243 кг	
		ПП1	ПП2
5	$ \Delta_x $	38 см	64 см
6	$ \Delta_y $	16 см	16 см
7	Час азимутального обертання	22 с	22 с
8	Максимальна частота обертання гвинта	± 145 об/хвил	± 145 об/хвил
9	Максимальне прискорення частоти обертання гвинта	$\pm 0,06$ об/с ²	$\pm 0,06$ об/с ²

Відмінності між моделюваннями полягають у еталонній позиції та початковій орієнтації ініціалізованих двигунів ПП (див. Таблиця 3). Параметри налаштування залишаються постійними продовж моделювання, під час якого здійснюються відхиляючі дії для провокування відхилення параметрів ПП від заданих. Збурення навколишнього середовища τ_{env} у всіх симуляціях не застосовувалося, щоб підкреслити поведінку судна для

відокремленої (автономної) природи MCS. Результати підсумовані на Рис. 6, де візуалізовано рух моделі для обох моделювань.

Таблиця 3

Зведені дані процедури параметризації ініціалізованих підрулюючих пристроїв

№ з/п	Початкове положення моделі	Початковий кут розташування ПП	Крок еталонної позиції η_r	Постійна часу T_s , с	Горизонт прогнозування N , с
1	$[-50, 0, 0]^T$	$[0, 0]^T$	$[80, 0, 0]^T$	1	80
2	$[-10, 40, 0]^T$	$[\pi/2, \pi/2]^T$	$[0, -50, 0]^T$	1	80

У першому випадку система управління моделлю отримує команду рухатися на позицію перед нею і команду зупинки.

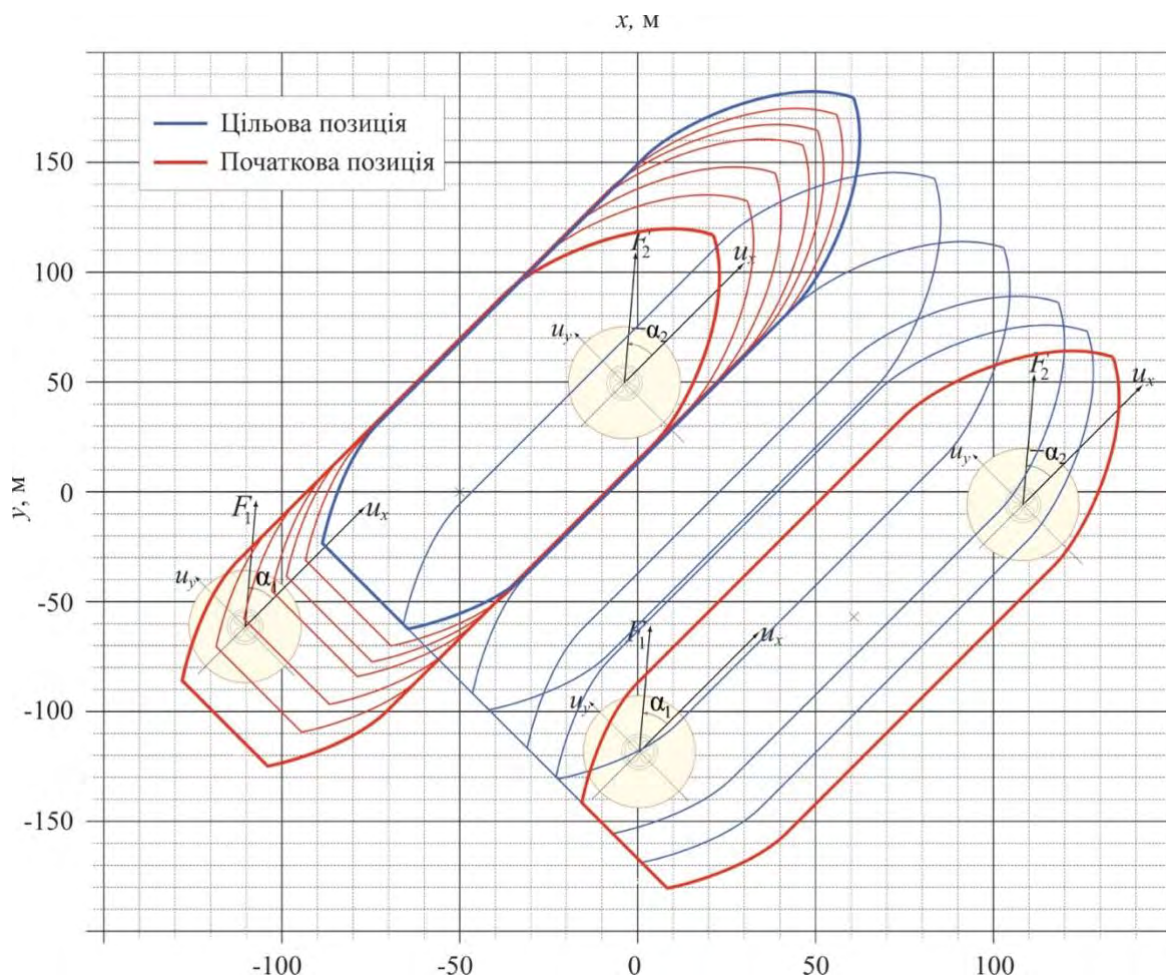
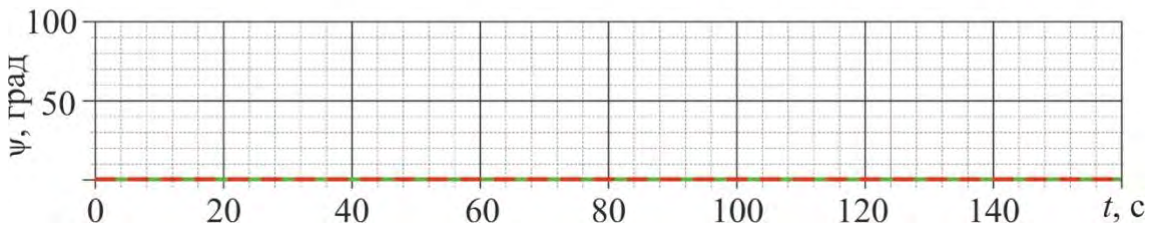
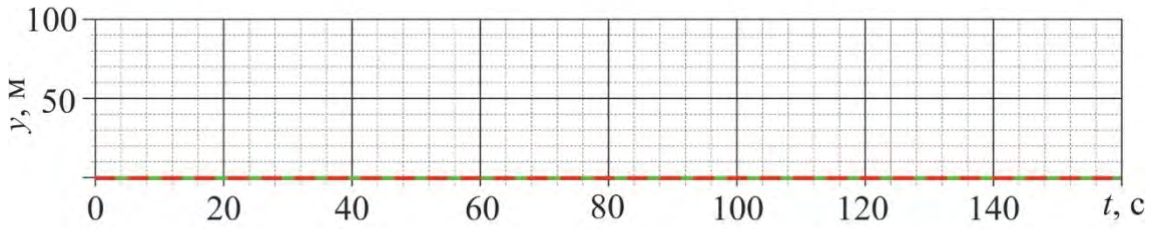
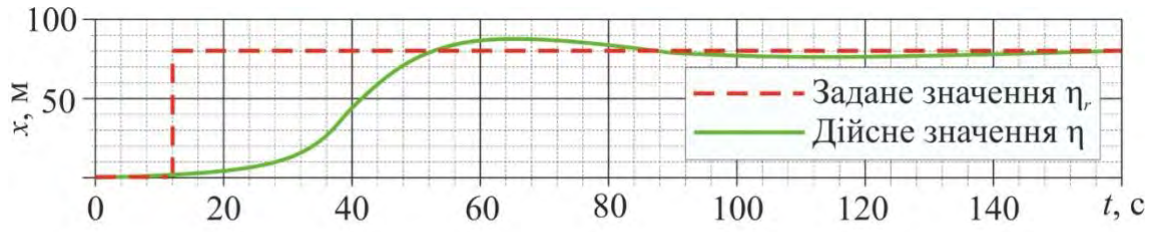
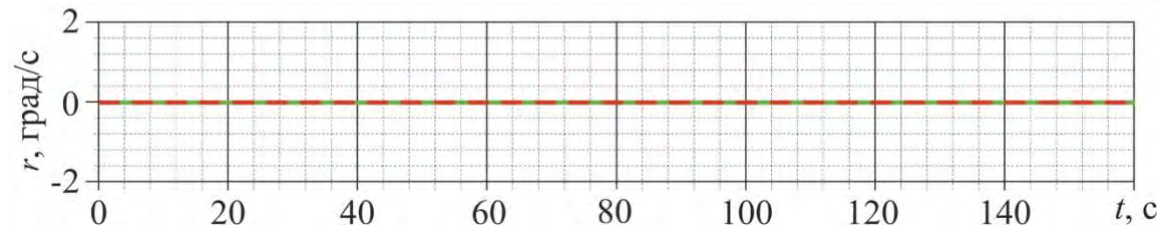
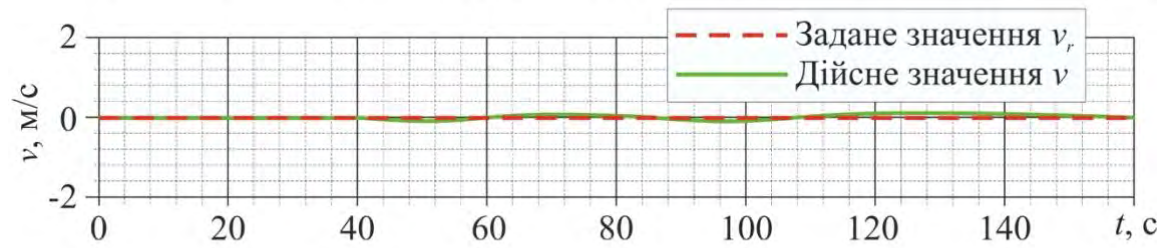
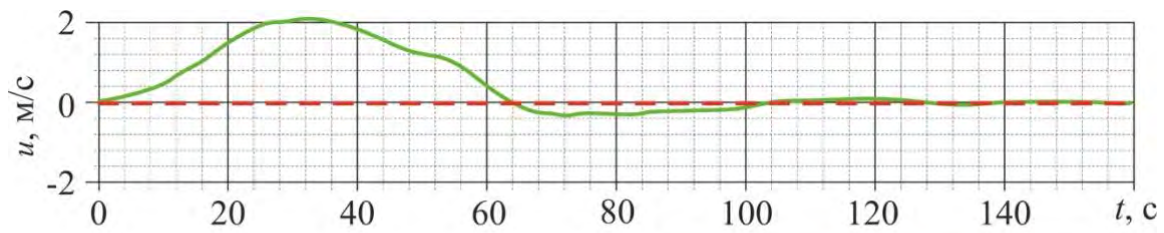


Рис. 6 Зображення руху моделі в горизонтальній площині.



a



б

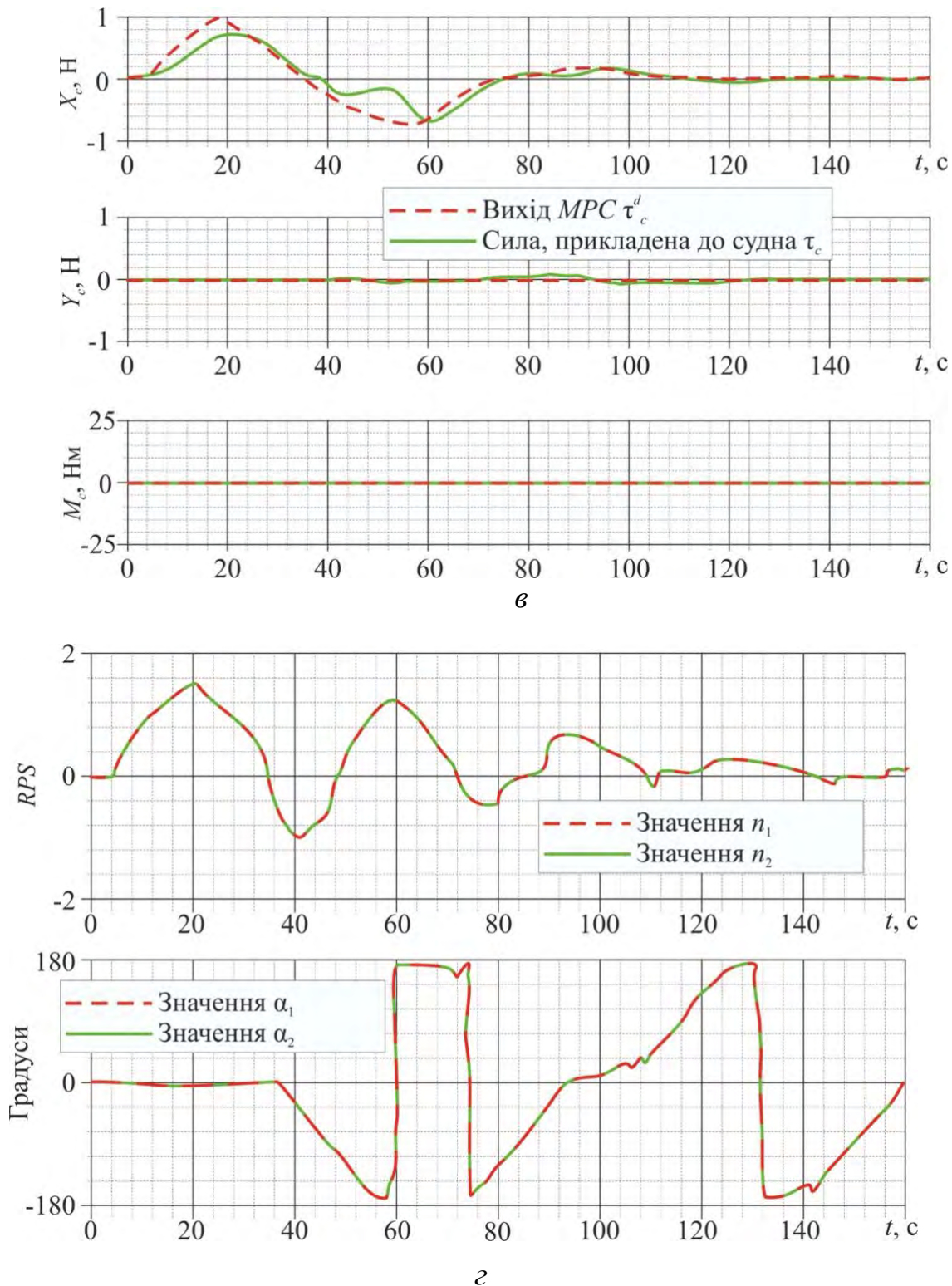


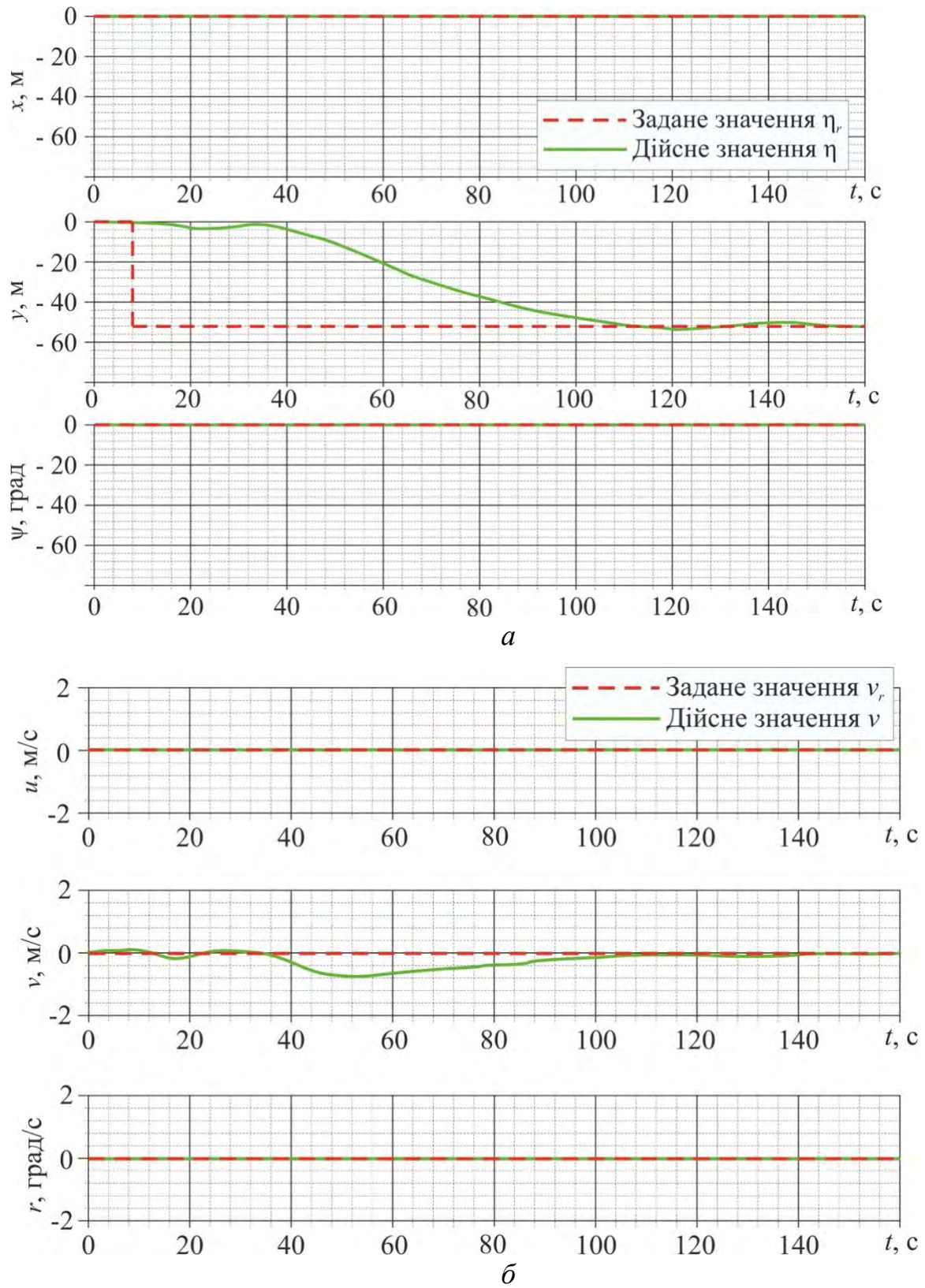
Рис. 7 Результати першого тестового випробування для відокремленого режиму управління MCS: а – задані (η_r) та дійсні (η) значення положення судна в системі DOF; б – дійсне (v) та задане (v_r) значення швидкості моделі; в – залежності сили, що діє на судно (τ_c), і завдання на виході системи MPC високого рівня (τ_c^d); г – залежності частоти обертання гвинтів (n) та кута розташування (α) ПП в межах $[\pm 180^\circ]$.

Рушії ПП спочатку спрямовані в напрямку руху. Результати експерименту показано на Рис. 7 (а-г). На Рис. 7, а видно суттєвий неконтрольований вихід моделі за межі цільової позиції. Проте, при моделюванні, позитивним результатом реалістичний рух судна у зворотному напрямку, що є причиною негативної швидкості хвилі u на Рис. 7, б. Розуміння такої поведінки судна можна побачити, вивчивши Рис. 7, в і Рис. 7, г. При $t = 38$ с обидва двигуни ПП обертаються в одному напрямку, наприклад, за годинниковою стрілкою (Рис. 7, г). У той же час система *MPC* високого рівня починає подавати команду на "реверс" (Рис. 7, в), а двигуни ПП змінюють напрямок обертання. Однак, через кілька секунд обертання двигунів ПП повинно відповідати завданню τ^d_c . Це означає, що судно буде не в змозі створювати рушійну силу для подолання моменту опору у відповідності до обертання ПП. Оскільки це лежить поза межами налаштувань *MPC*-контролеру, існуватиме значна невідповідність між τ_c і τ^d_c , як показано на Рис. 7, в для $t \in [50, 70]$ секунд. Довжина тривалості пов'язана зі швидкістю обертання двигунів ПП. Фактично, подібну невідповідність сил можна спостерігати протягом $t \in [100, 120]$ секунд, коли *MPC*-контролер формує команду на зниження швидкості судна у момент зміни напрямку обертання двигунів ПП, що призводить до невеликої невідповідності положення судна заданому (див. Рис. 7, а). Можна зробити висновок, що така поведінка моделі викликана помилками налаштування, і це було б частково правильно. Як згадувалося, налаштування в цьому випадку є досить кардинальними з точки зору недетермінованого впливу на модуль судна з метою завдання швидкості близько 2 м/с на хвилі, що межує з випадками, коли лінійне демпфування домінує над нелінійними ефектами [25, 29, 30, 59, 69, 70, 75, 76]. Перевищення завдання було б меншим або навіть повністю усунуто, наприклад, якби вдалося підвищити значення елементи в Q_v у (27), що призвело б до зниження швидкості. Це змусить модуль рухатися повільніше, таким чином затримка в силі буде не такою значною. Однак, невідповідність все одно буде існувати

через неможливість змодельовати затримку обертання в *MPC*-контролері. Для виявлення цього було вибрано тестовий приклад і налаштування. Крім того, з точки зору впровадження, невігідно мати систему керування настільки залежну від належного налаштування через зазвичай обмежений час для введення в експлуатацію на реальному судні.

У другому випадку модель має рухатися у зворотному напрямку y_b . Детальні результати показані на [Рис. 8](#). Рушії від початку спрямовані розташовані в напрямку y_b , що співпадає з напрямком руху ([Рис. 8, з](#)). У момент завдання позиції призначення *MPC*-контролер негайно потребує великої від'ємної сили коливання, оскільки орієнтація та фізичні обмеження системи двигунів ПП не задані ([Рис. 8, в](#)). Це призводить до значної невідповідності між бажаною силою та фактичною силою, яка діє на судно. Намагаючись негайно виконати τ_c^d , система управління розташуванням ПП починає запускати двигуни ПП у зворотному напрямку, одночасно обертаючи двигуни, щоб мінімізувати споживання енергії. Коли двигуни спрямовані відповідно на корму та ніс, при $t = 20$, немає сенсу рухати двигуни у зворотному напрямку, оскільки неможливо отримати відповідну силу. Таким чином, система управління розташуванням ПП починає сповільнювати рух ПП, продовжуючи їх обертати в бік лівого боку. Однак рух гвинтів ще недостатньо сповільнився, що змушує судно знову рухатися в протилежно заданому напрямку y_b . Положення судна показано на [Рис. 8, а](#), а швидкість – на [Рис. 8, б](#). Це, з точки зору споживання енергії, є негативним результатом. Хоча, на відміну від першого сценарію, цього разу перевищення не відбулося, оскільки *MPC*-контролер не видає сигнал на зменшення швидкості руху судна через її нижче значення і більший опір руху.

Для обох випадків одним із способів вирішення проблеми енергозбереження може бути обмеження швидкості завдання τ_c^d до такого низького ступеня, щоб це врахувало затримку, яка співпадає з часом повороту двигунів ПП. Однак це суттєво зменшує доступну продуктивність системи управління двигунами ПП.



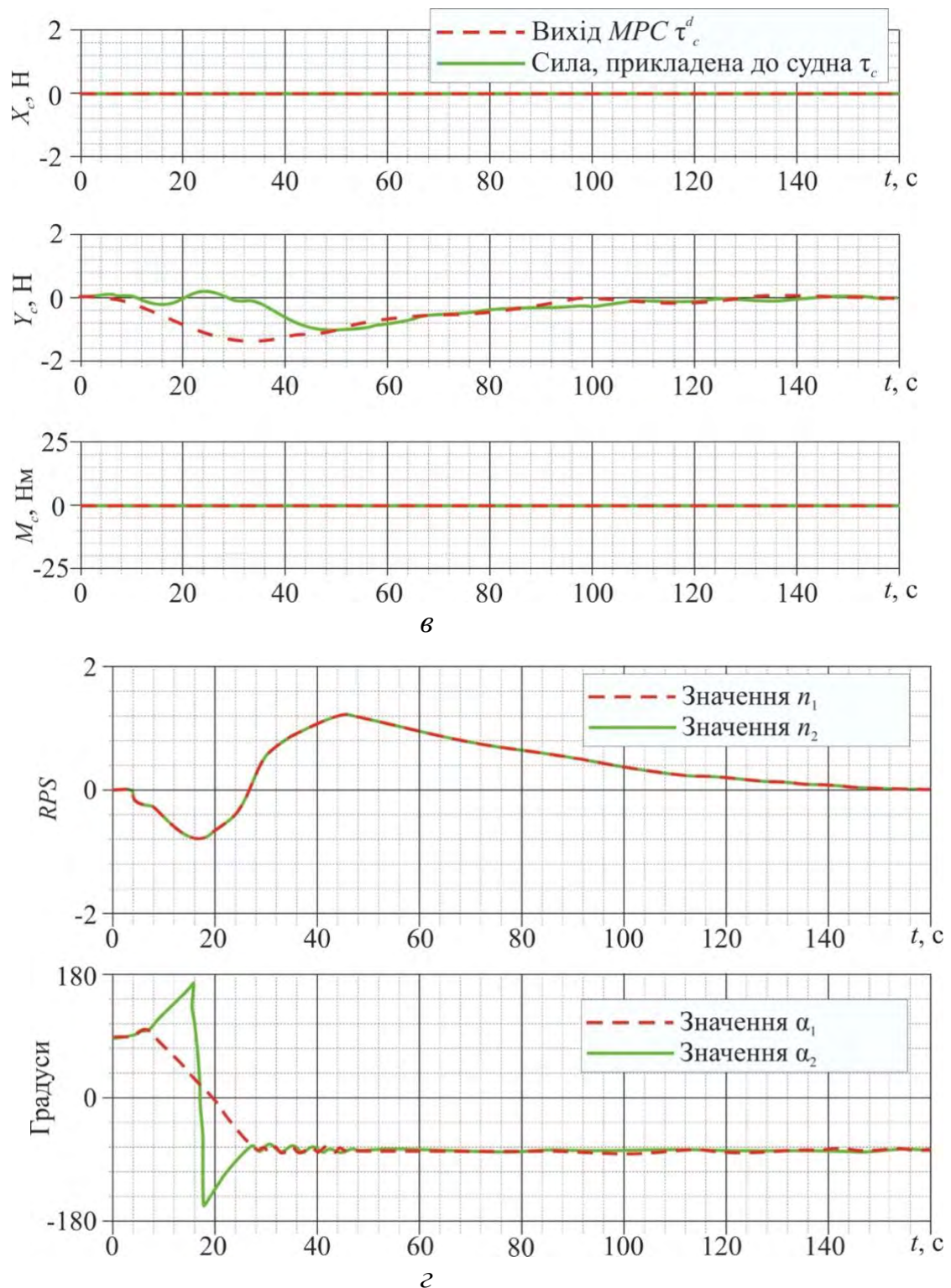


Рис. 8 Результати другого тестового випробування для відокремленого режиму управління *MCS*: *a* – задані (η_r) та дійсні (η) значення положення судна в системі *DOF*; *б* – дійсне (v) та задане (v_r) значення швидкості моделі; *в* – залежності сили, що діє на судно (τ_c), і завдання на виході *MPC*-контролеру високого рівня (τ_c^d); *г* – залежності частоти обертання гвинтів (n) та кута розташування (α) ПП в межах $[\pm 180^\circ]$.

[До змісту](#)

Можна зробити висновок, що відокремлений режим роботи *MCS* виявляє переваги, коли справа доходить до впровадження, за рахунок модульного методу організації програмного забезпечення. Однак, як показав експеримент, продуктивність *MCS* може знизитися через нездатність контролера високого рівня знати та передбачати величини створюваних сил. Було показано два випадки, коли поведінка судна не відповідає завданню. Загальною рисою експериментів є те, що алгоритм система управління розташуванням ПП має обертати двигуни, щоб досягти сили, яку запитує *MPC*-контролер. Це відзначається переходом від позитивної сили до негативної в будь-якій формі. Оскільки до *MPC*-контролеру не надходить інформація про положення та орієнтацію двигунів ПП, це призводить до того, що судно на короткий час не забезпечується необхідною рушійною силою, що, в свою чергу, призводить до тимчасової затримки між τ_c^d і τ_c , пов'язаної з часом обертання двигунів ПП. Випадки, коли можна передбачити погіршення продуктивності відокремлених *MCS*, пов'язані із необхідністю створювання зусилля в більш ніж одній ступені свободи одночасно, наприклад, для завдання сили руху та моменту повороту. Це може статися, оскільки *MPC*-контролер не моделює жодного зв'язку між силами та моментом. Цей недолік зумовлюється обраною конфігурацією розташування двигунів ПП (

[Рис. 5](#)), що не дозволяє *MPC*-контролеру самостійно генерувати сили та моменти у всіх ступенях свободи, або, на мить, створити силу в якомусь напрямку. Насправді динамічна модель *MPC*-контролеру моделює судно, оснащене достатньою кількістю приводів ПП, щоб давало можливість незалежно створювати силу та момент у всіх ступенях свободи. Однак це може призвести до значних витрат, особливо для суден, яким зазвичай не потрібно використовувати всі приводи ПП.

1.6. Організація розподіленого управління у відповідності до матриці розташування ПП

У попередніх підрозділах оптимальний розподіл ПП із відповідною організацією контролеру високого рівня були сформульовані як окремі проблеми оптимізації. Відхиляючись від традиційної структури реалізація одного MPC-контролеру поєднує обидва алгоритми (Рис. 9).

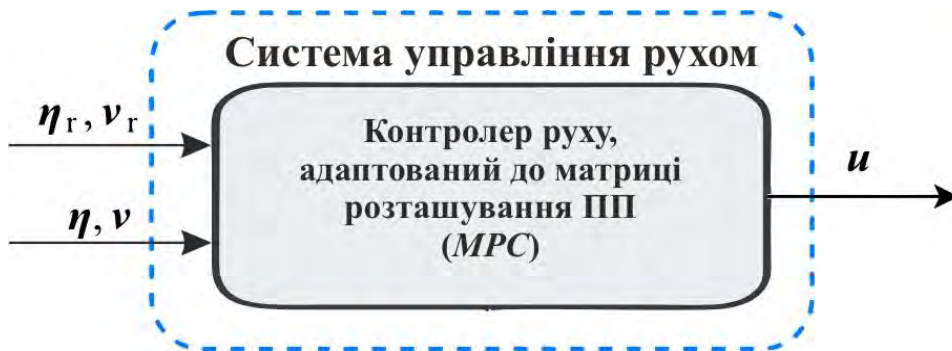


Рис. 9 Структура комбінованої системи управління рухом

Комбінована задача керування рухом і розподілу управління у відповідності до матриці розташування ПП моделюється шляхом поєднання (9), (10) та (12) відповідно до:

$$\dot{\eta} = R(\psi)v, \quad (28)$$

$$M\dot{v} + D(v)v = T(\alpha)f(n) + \tau_{env}, \quad (29)$$

зі станами (η, v) та входами управління (n, α) . Однак визначення абсолютного значення функції $f(n)$ (16) проблематично реалізувати в *ACADO*, але можна вирішити наступними методами. Перший полягає у визначенні вхідних сигналів (n^+, n^-) замість n , де n^+ позначає додатні оберти гвинта, а n^- від'ємні, тоді як обидва обмежені додатними значеннями [15, 32, 84, 85]. При такому підході значення тяги $f_i(n_i)$, що створюється i -м двигуном ПП (15), може бути записана як:

$$f_i(n_i) = k_i \left((n_i^+)^2 - (n_i^-)^2 \right), \quad n_i^+, n_i^- \geq 0. \quad (30)$$

Такий метод також дозволяє визначити пріоритет додатних обертів за хвилину шляхом порівняння функції перевищення n^- відносно n^+ , моделюючи асинхронний режим роботи двигунів ПП із застосуванням нелінійного обмеження:

$$n_i^+, n_i^- = 0 \quad (31)$$

для завдання нульового значення для одного змусити один із входів продовж всього часу моделювання. Інакше може виникнути випадок обмеження частоти обертів гвинта при ненульових вхідних сигналах. Інший метод полягає в простому наближенні абсолютного значення за допомогою неперервної функції, диференційованої методом підбору поліну або використовуючи рівняння

$$|x| \approx x^2 + \varepsilon, \quad (32)$$

де ε – постійна величина, що набуває числових значень і характеризується напрямком у просторі як показано $\sqrt{n^2 + 0.01}$ на

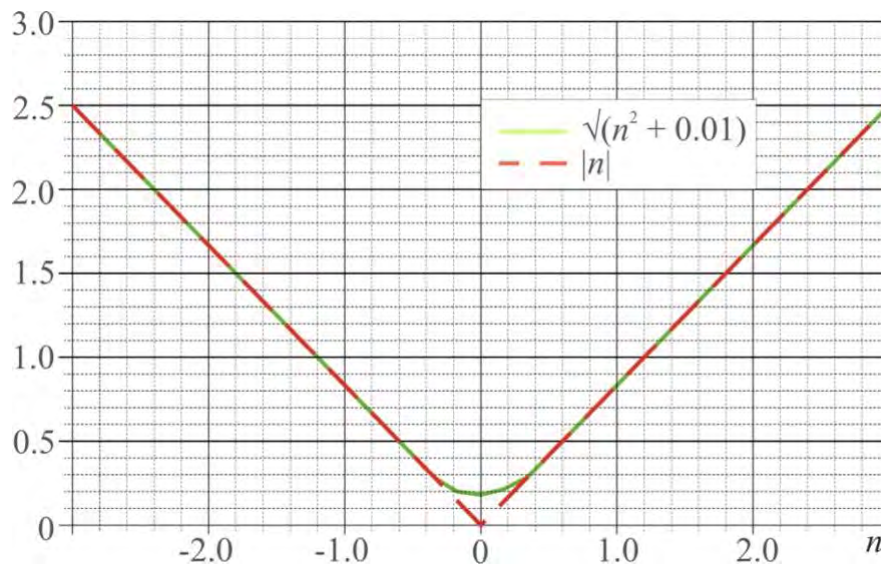


Рис. 10.

Рис. 10 Різниця між функцією абсолютного значення та апроксимацією, заданою (32) для $\varepsilon = 0,01$

Таким чином, $f_i(n_i)$ апроксимується як

$$\tilde{f}_i(n_i) = k_i n_i \sqrt{n_i^2 + \varepsilon}. \quad (33)$$

Обидва вхідних сигнали (n, α) підлягають фізичним обмеженням. Частота обертання гвинтів n обмежена як за величиною, так і за швидкістю збільшення, тоді як кути α розташування ПП обмежені лише за швидкістю. Обмеження швидкості реалізуються шляхом додавання додаткових станів (див. підрозділи 1.3, 1.4, 0). Поєднуючи (28), (29) та (33) з урахуванням обмежень, задачу нелінійної неперервної оптимізації формулюємо наступним чином:

$$\begin{aligned} \min_{\dot{n}, \dot{\alpha}} \quad & \int_0^{T_s N} \left(\|\eta - \eta_r\|_{Q_\eta}^2 + \|v - v_r\|_{Q_v}^2 + \|n\|_{Q_n}^2 + \|\dot{\alpha}\|_{Q_{d\alpha}}^2 + \|\dot{n}\|_{Q_{dn}}^2 \right) dt \\ \text{s.t.} \quad & \dot{\eta} = R(\psi)v \\ & M\dot{v} + Dv = T(\alpha)\tilde{f}(n) \\ & \underline{n} \leq n \leq \bar{n} \\ & |\dot{\alpha}| \leq \bar{\dot{\alpha}} \\ & \underline{\dot{n}} \leq \dot{n} \leq \bar{\dot{n}} \end{aligned} \quad (34)$$

де кінцеві значення залежать початкових умов на кожному етапі апроксимації. По аналогії з (27) функція ідентифікації дозволяє змінювати постійні часу завдань η та v . Відповідно до (17) потужність пропорційна кубу n . У (34) необхідно мінімізувати потужність, однак фіксація квадрату направлена для формулювання цільової функції, як у (23), де останні два члени є стабілізаційними для швидкості зміни входів управління. Це застосовується для зменшення швидкості зміни вхідних даних та, відповідно, зменшення навантаження енергетичної установки. Обмеження (34) ідентифікують динамічну модель та є стабілізаційними щодо входів управління.

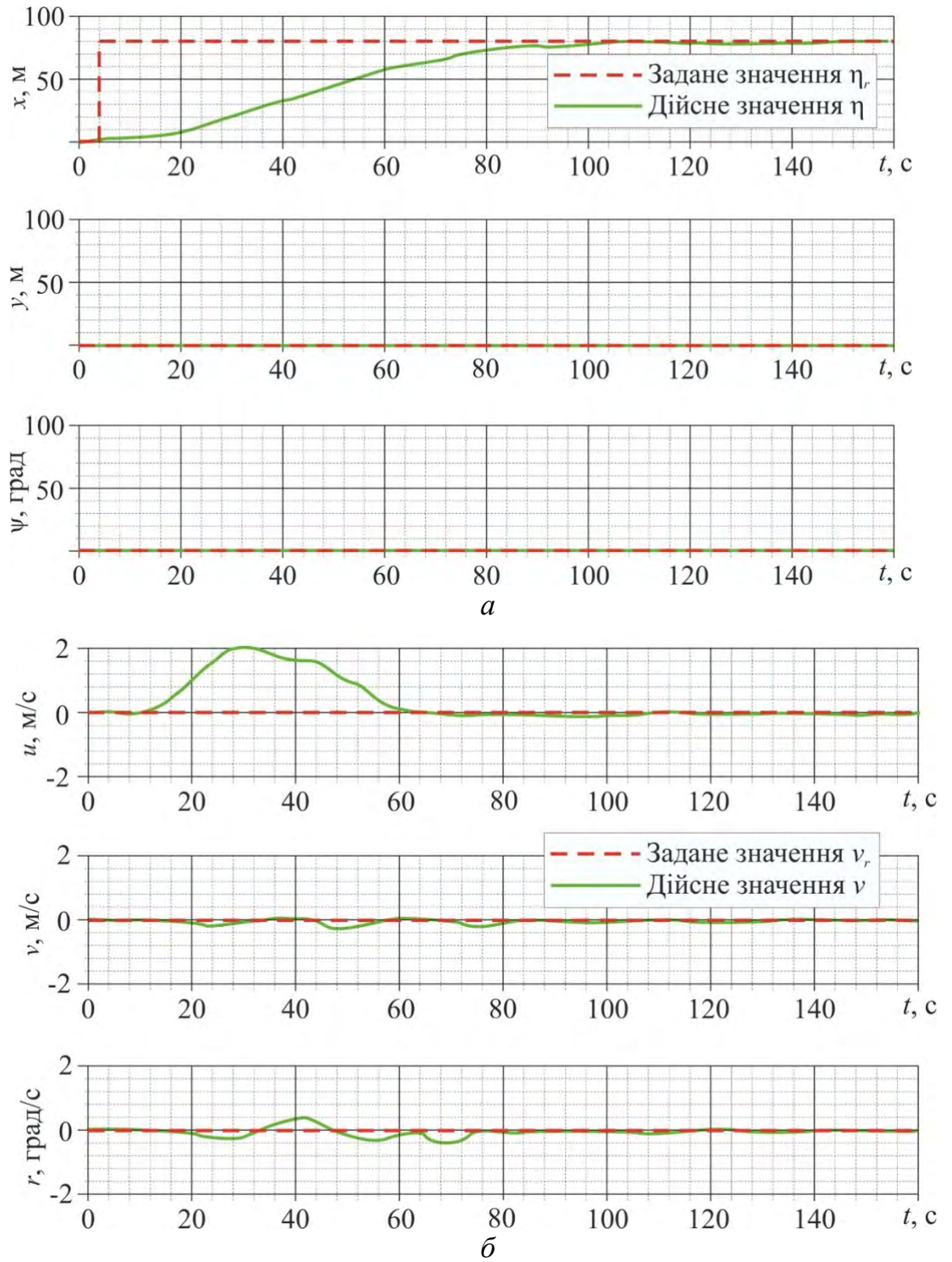
Таким чином, можна зробити висновок, що режим комбінованого управління *MCS* було промодельований із обмеженнями швидкості (34) у відповідності до обраної конфігурації розташування ПП відповідно до

специфікацій електродвигунів (див. підрозділи 1.3, 1.4, 0). Верхня межа налаштування відповідно до матриці розташування ПП (34) також була обрана відповідно до специфікацій, однак нижня межа була обрана на частку зазначеної нижньої межі, таким чином зменшуючи силу, яку можна досягти під час руху заднім ходом. Це було зроблено з метою моделювання асинхронного режиму роботи ПП для оптимізації їх кутів повороту в режимі створення протилежних упорів.

Дослідження комбінованого режиму роботи *MCS* проводилися для двох випадків, аналогічно, як це робилося у підрозділах 1.3, 1.4 та 0. Для адекватного порівняння горизонт прогнозування та час вибірки були вибрані такими ж, як і для високорівневого *MPC* (Рис. 6). Найгірший час відпрацювання *MPC*-контролеру, об'єднаний для цього випадку у *MCS*, для обох тестових прикладів, становив приблизно 0,5 секунди на комп'ютері з процесором *Intel i9* із тактовою частотою 2,9 ГГц та 32 ГБ оперативної пам'яті. Переміщення модулі у горизонтальній площині зображено на Рис. 6.

На Рис. 11, *a* показано положення судна в часі, якого воно досягає без перерегулювання. Швидкості показано на Рис. 11, *б*. Тут варто зазначити, що модель досягає зазначених швидкостей так само, як і для режиму відокремленої *MCS*, показаних на Рис. 7, *б*. На Рис. 11, *в* показані відповідні сили, які діють на судно. Замість побудови τ_c і τ_c^d (див. підрозділи 1.3, 1.4, 0), τ_c було нанесено на графік моделювання у відповідності до (12), де n і α є виходами комбінованої *MCS*. Оскільки в (34) використовується майже ідентична модель, це можна інтерпретувати як інтерактивну задану силу, порівняно з Рис. 7, *в*. Графіку практично повторюють один одного із лише невеликою невідповідністю через немодельовану динаміку ПП та ефекти, пов'язані із компенсаційними рульовими силами. Тобто, коли електродвигун ПП азиподного типу знаходиться під кутом 90 градусів до руху судна, виникає значний опір, що призведе до появи від'ємної сили, що спостерігається при $t = 40$ с (див. Рис. 5). Роз'яснення того, як в цьому випадку відпрацьовує комбінована *MCS* показано на Рис. 11, *г*. Коли відбувається зміна кроку

управління ПП, *MCS* починає створювати упереджуючу тягу, використовуючи обидва двигуни ПП. Через деякий час, при $t = 28$ с, починає змінювати положення ПП2, одночасно зменшуючи оберти n_2 , щоб не створювати занадто великий момент повороту. Коли гвинт ПП2 опиняється в додатковому напрямку, до корми, знову відбувається збільшення частоти обертання гвинта для гальмування судна. Тим часом інший ПП здійснює реверс, щоб зменшити швидкість і скорегувати поворот судна і нищпорення.



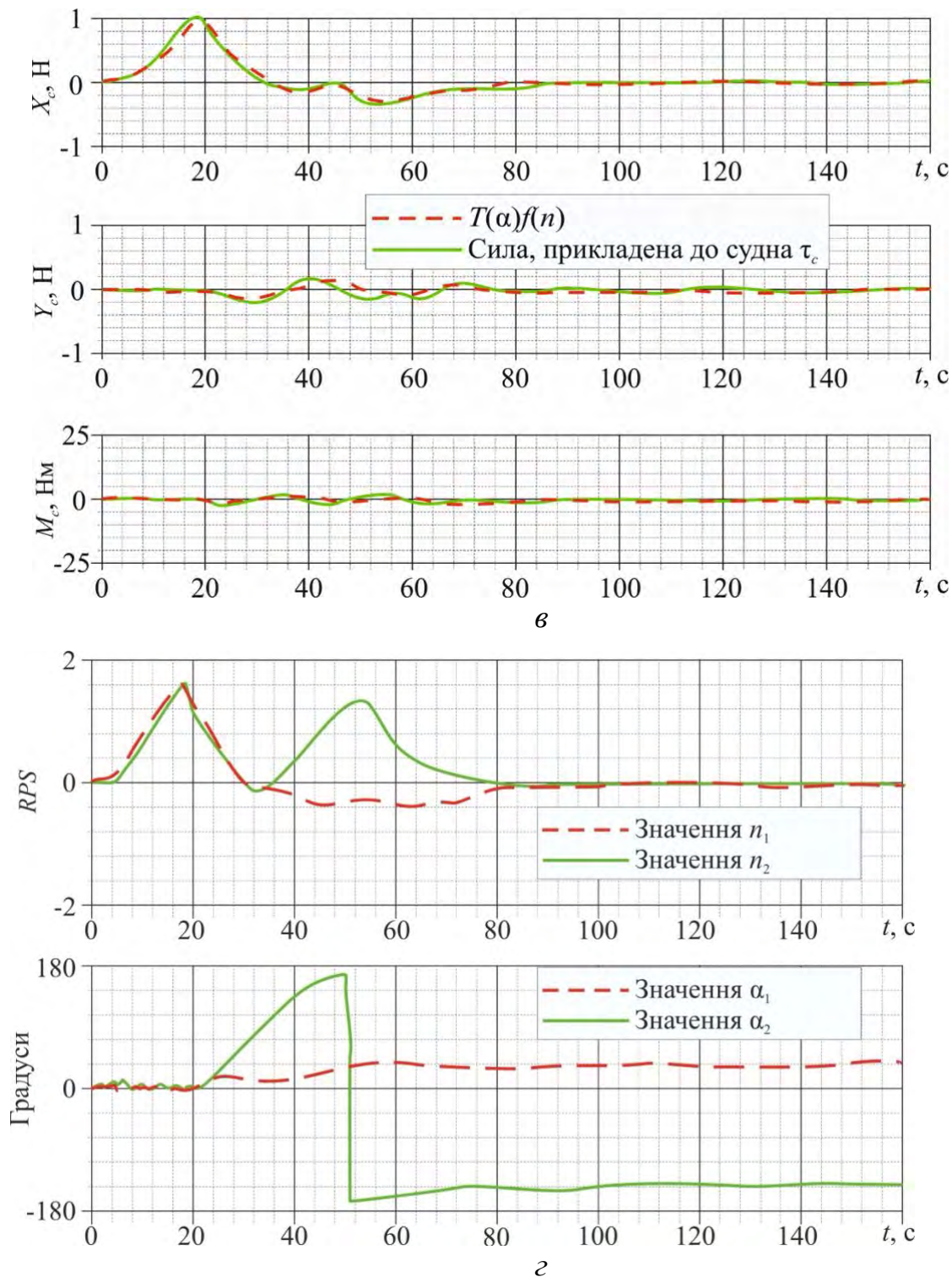
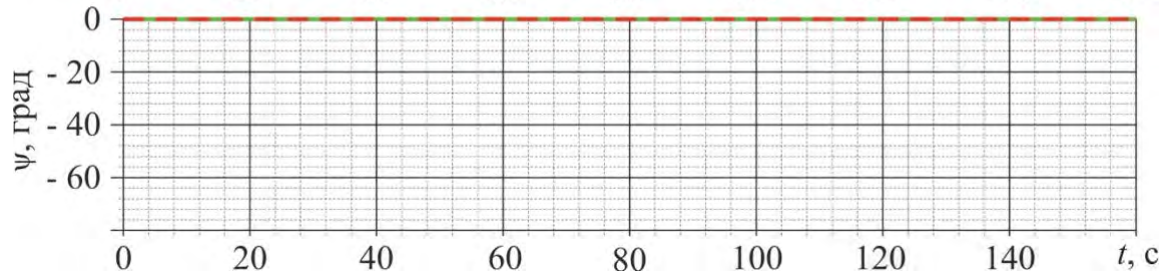
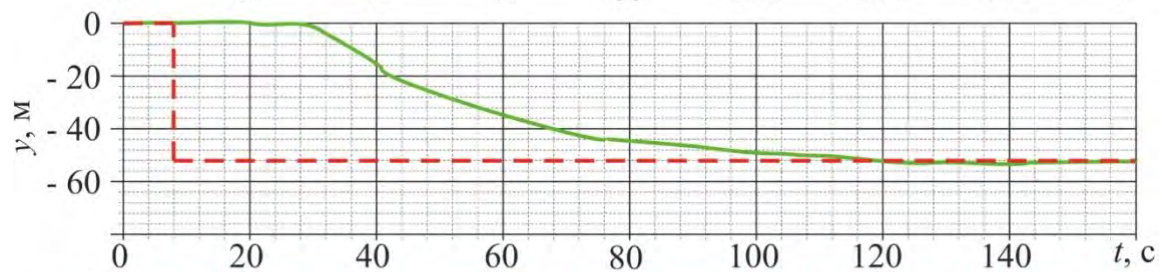
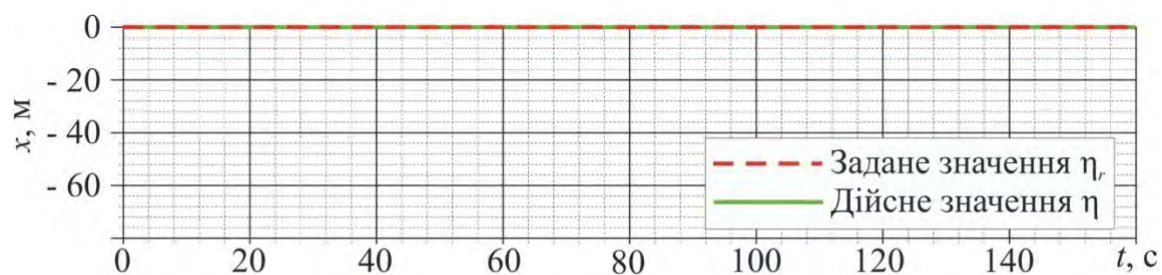


Рис. 11 Результати першого тестового випробування для комбінованого режиму управління MCS : *a* – задані (η_r) та дійсні (η) значення положення судна в системі DOF ; *b* – дійсне (v) та задане (v_r) значення швидкості моделі; *c* – залежності сили, що діє на судно (τ_c) і завдання у відповідності до (12); *d* – залежності частоти обертання гвинтів (n) та кута розташування (α) ПП в межах $[\pm 180^\circ]$.

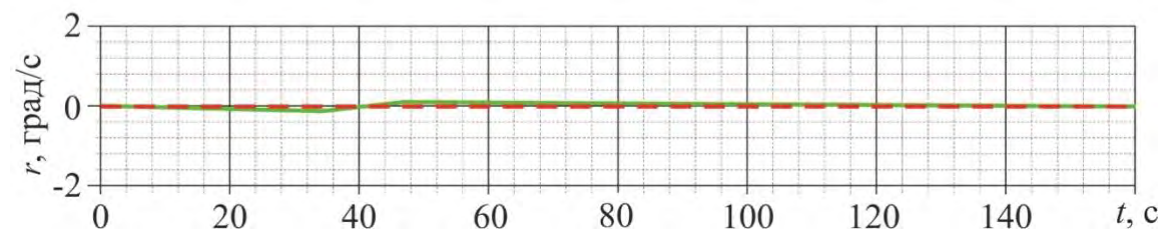
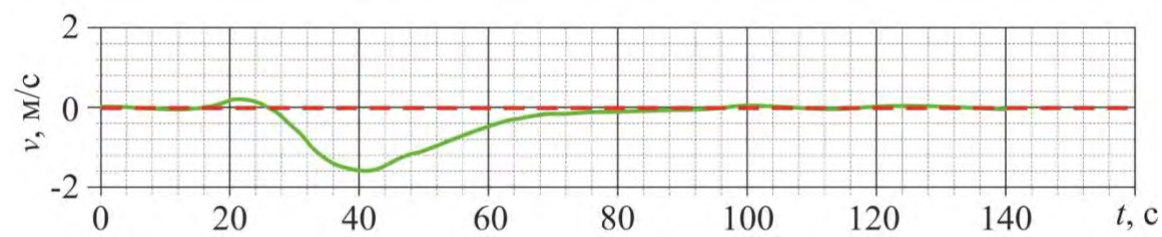
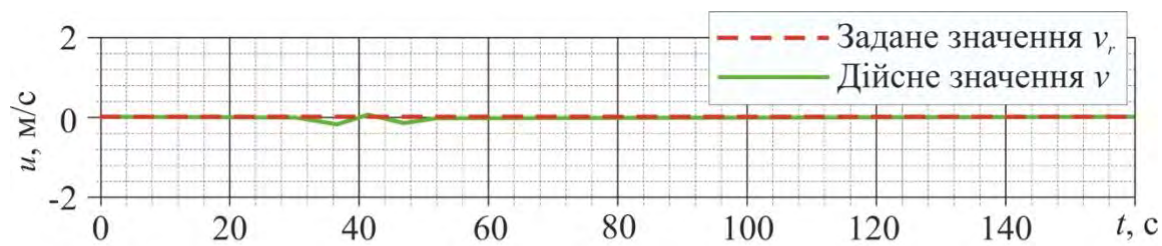
[До змісту](#)

На Рис. 11, *а* показано положення судна в часі, якого воно досягає без перерегулювання. Швидкості показано на Рис. 11, *б*. Тут варто зазначити, що модель досягає зазначених швидкостей так само, як і для режиму відокремленої *MCS*, показаних на Рис. 7, *б*. На Рис. 11, *в* показані відповідні сили, які діють на судно. Замість побудови τ_c і τ_c^d (див. підрозділи 1.3, 1.4, 0), τ_c було нанесено на графік моделювання у відповідності до (12), де n і α є виходами комбінованої *MCS*. Оскільки в (34) використовується майже ідентична модель, це можна інтерпретувати як інтерактивну задану силу, порівняно з Рис. 7, *в*. Графіку практично повторюють один одного із лише невеликою невідповідністю через немодельовану динаміку ПП та ефекти, пов'язані із компенсаційними рульовими силами. Тобто, коли електродвигун ПП азиподного типу знаходиться під кутом 90 градусів до руху судна, виникає значний опір, що призведе до появи від'ємної сили, що спостерігається при $t = 40$ с (див. Рис. 5). Роз'яснення того, як в цьому випадку відпрацьовує комбінована *MCS* показано на Рис. 11, *г*. Коли відбувається зміна кроку управління ПП, *MCS* починає створювати упереджуючу тягу, використовуючи обидва двигуни ПП. Через деякий час, при $t = 28$ с, починається зміна положення ПП2 з одночасним зменшенням обертів n_2 , для запобігання виникнення занадто великого моменту повороту. Коли гвинт ПП2 опиняється в додатному напрямку до корми, знову відбувається збільшення частоти обертання гвинта для гальмування судна. Тим часом інший ПП здійснює реверс, щоб зменшити швидкість для корегування повороту судна і нишпорення.

Результати другого тесту показано на Рис. 12. Положення моделі відповідає базовій позиції (Рис. 12, *а*) без перерегулювання. Що стосується першого тестового випробування τ_c точно відповідає розрахованій силі комбінованого режиму *MCS*, оскільки було враховано орієнтацію та обмеження двигунів ПП (Рис. 12, *г*).



a



б

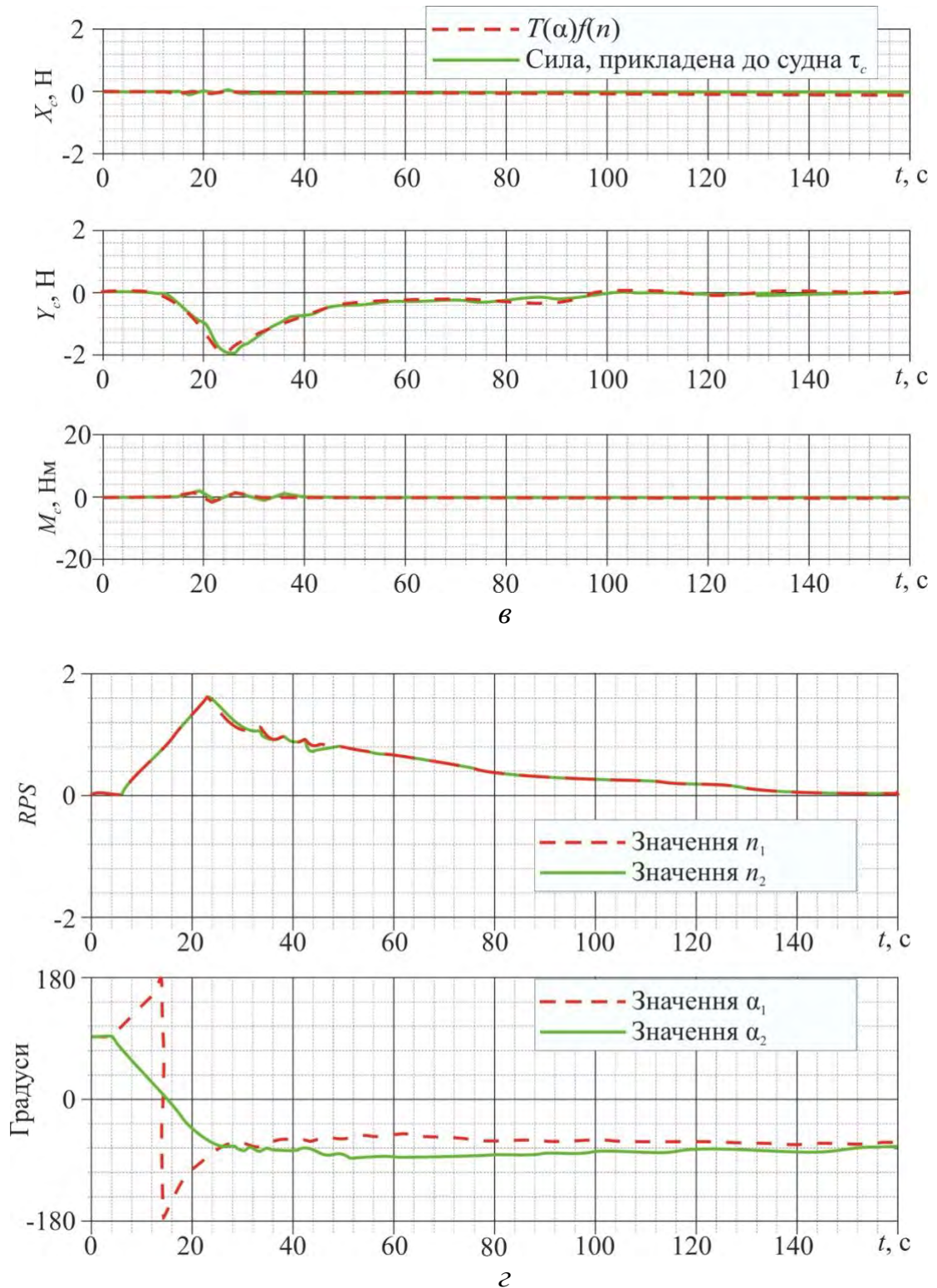


Рис. 12 Результати другого тестового випробування для відокремленого режиму управління MCS: *a* – задані (η_r) та дійсні (η) значення положення судна в системі *DOF*; *b* – дійсне (v) та задане (v_r) значення швидкості моделі; *в* – залежності сили, що діє на судно (τ_c) і завдання у відповідності до (12); *г* – залежності частоти обертання гвинтів (n) та кута розташування (α) ПП в межах $[\pm 180^\circ]$.

Якщо порівняти [Рис. 12, б](#) із [Рис. 8, б](#), можна зробити висновок, що замість реверсу двигунів ПП для швидкого прискорення до цільової позиції, модель спочатку прискорюється приблизно через 15 секунд після початку обертання двигунів у додатному напрямку. Це добре видно на [Рис. 12, з](#), де показано вихідні дані *MCS*. Після ініціалізації завдання, двигуна починають обертатися у протилежному напрямку, збільшуючи швидкість гвинта таким чином, що значна тяга створюється коли $\alpha_1, \alpha_2 < 0$, тобто коли обидва двигуни спрямовані в бік лівого боку.

Можна зробити висновок, що комбінований режим роботи *MCS* реалізує значні покращення в продуктивності керування порівняно з відокремленим режимом *MCS* (див. [підрозділи 1.3, 1.4, 0](#)). Оскільки *MPC* оперує даними про стан та обмеження двигунів ПП, у перспективі він може координувати їх більш ефективно з точки зору прогнозованого управління. Таким чином, це пояснює затримку, викликану часом обертання двигунів під час планування руху. Це робить його більш адаптивним до різних налаштувань і впливу збурюючих чинників.

З точки зору оптимальності, мета може бути досягнута тільки у випадку гарантованої збіжності налаштувань при розв'язуванні проблеми із уникненням локальних мінімумів (25) ([підрозділ 1.4](#)). Тестування слід проводити, наприклад, за допомогою послідовного квадратичного програмування (англ. – *Sequential Quadratic Programming, SQP*) для ідентифікації розбіжностей у поведінці моделей. Однак, при використанні схеми ітераційних оптимізацій у реальному часі (англ. – *Real Time Iterations, RTI*), результати тестування та час виконання на тестовому комп'ютері вказують на те, що цей контролер можна запускати в режимі реального часу на більш сучасному обладнанні.

1.7. Методологія розробки систем управління рухом із інформаційними зворотними зв'язками

Під час реалізації відокремлених систем управління рухом було встановлено, що відокремлений характер будь-якої системи має переваги з точки зору їх розробки та впровадження, але ці системи мають певні недоліки щодо продуктивності та надійності, які можливо усунути шляхом поєднання системи керування рухом, яка враховує матрицю розташування ПП та параметри високорівневого контролеру управління у єдиному алгоритмі, що теоретично забезпечує оптимальну ефективність керування. Натомість досліджування, які дають можливість розширити роз'єднані системи управління рухом за допомогою інформаційного зв'язку між матрицею розташування ПП та параметрами контролеру високого рівня, залишаються актуальними (Рис. 13). В цьому випадку метою є досягнення збільшення продуктивності та надійності комбінованої системи управління рухом із збереженням переваг відокремлених систем управління.

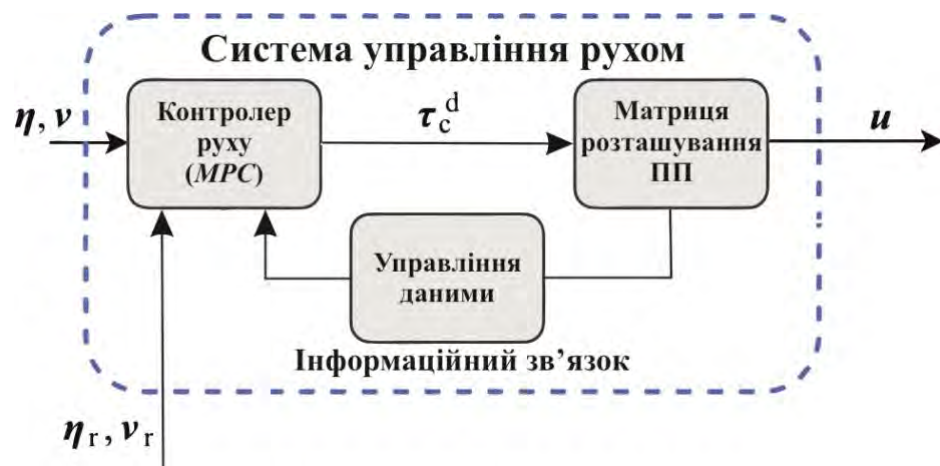


Рис. 13 Структура системи управління рухом, доповненої інформаційним зв'язком

Для початку були введені деякі технологічні обмеження запропонованої структури. По-перше, для збереження переваг відокремлених систем управління, а саме того аспекту, що контролери високого рівня для різних

типів суден відрізняються лише налаштуваннями та параметрами моделі, за винятком конкретної інформації про конфігурацію двигунів ПП. Це означає, що у контролер високого рівня може не надходити інформація кількість ПП або їх матрицю розташування. По-друге, оскільки алгоритм роботи ПП в залежності від матриці розташування підпадає під поняття «чорної скриньки», неможливо вносити жодних змін у його роботу, що дало б можливість доповнювати працюючі суднові системи без необхідності перепрограмування відповідних алгоритмів. Крім того, реалізація певної системи управління рухом повинна ґрунтуватися лише на фізичних обмеженнях і не залежати від надлишкових спеціальних налаштувань.

За результатами моделювання та відповідного обговорення у попередніх розділах стає очевидним, що продуктивність керування погіршується через невідповідність між τ_c^d і фактичною силою керування, що діє на судно, в наслідок ненадходження до *MPC* інформації щодо фізичних обмежень судна в поточний момент часу. Водночас, в *MPC*-контролер, що входить до складу комбінованої *MCS*, надходить вичерпна інформація про систему двигунів ПП. Цю різницю можна додатково візуалізувати, побудувавши траєкторії, обчислені в кожний проміжок часу для двох альтернативними *MPC* (Рис. 14). На Рис. 14, *a* показані траєкторії для розподіленої системи управління. Та сама невідповідність, яку можна побачити на Рис. 7, *в*, тут розглядається як різниця між кривими зеленого та синього кольорів. Починаючи з $t = 40$ с, траєкторії, розраховані *MPC*-контролером високого рівня, суттєво відрізняються від початкової, зсунуті праворуч і вниз. Точніше, *MPC*-контролер генерує завдання більшого значення зворотної імпульсної сили, оскільки початкове завдання сили не було виконано. На Рис. 14, *б* показано результат роботи комбінованої *MCS*. По-перше, для сходження ітераційних оптимізацій у реальному часі, їх кількість повинна бути суттєво вища. Далі, близько $t = 30$ с, траєкторії деякий час залишаються біля нульової позначки. Це може статися тому, що *MPC*-контролер, що по суті є об'єднаною *MCS*, здатний на генерацію

будь-якої великої зворотної сили викиду відразу в цей час. Невідповідність між розрахованою та фактичною силами пов'язана з немодельованими збурюючими силами, що діють на систему управління. Висновок полягає в тому, що для адекватної роботи *MPC*-контролеру, генерація такої величини негативної імпульсної сили для зупинки судна, по факту є меншою, ніж було заплановано.

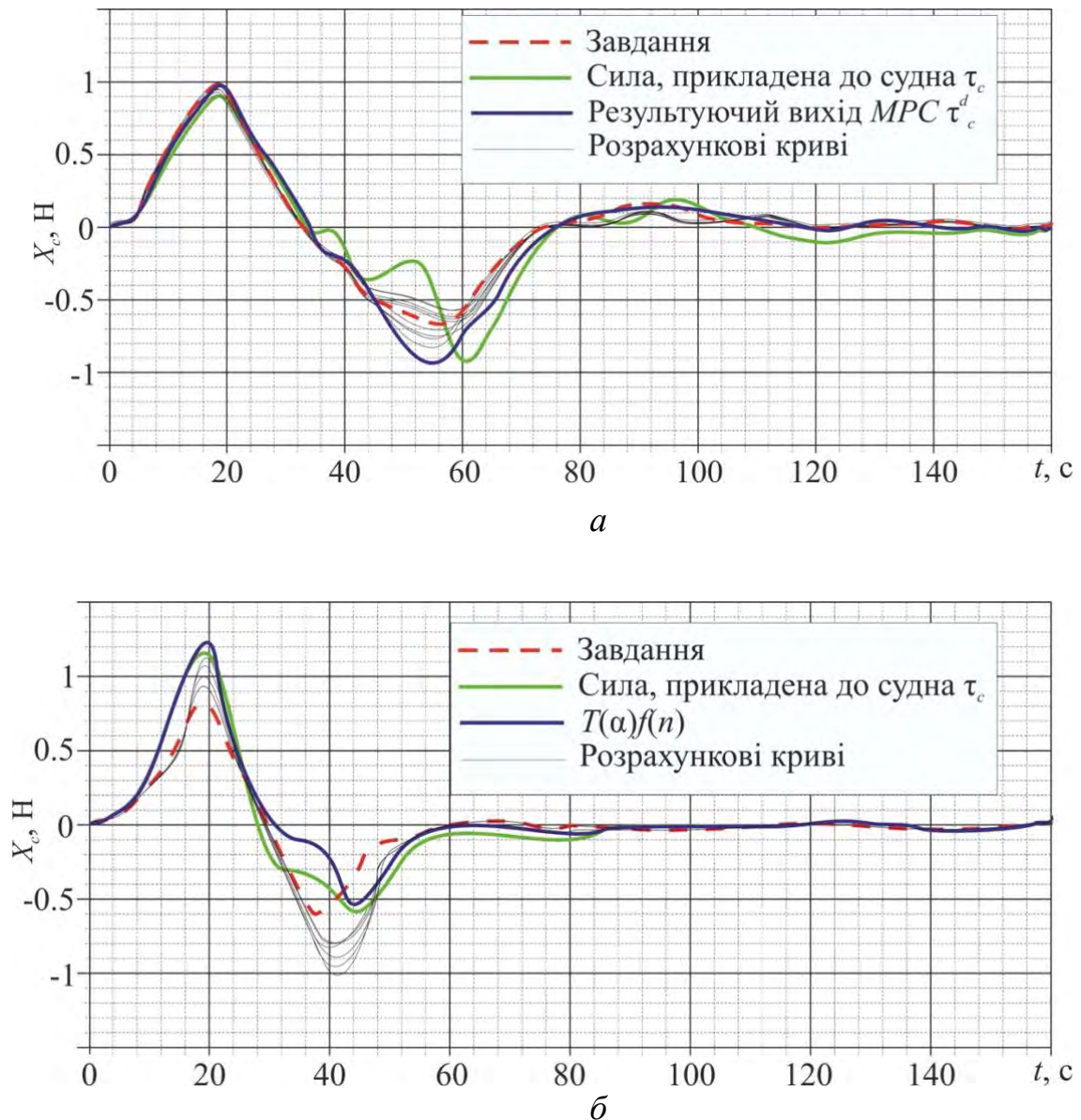


Рис. 14 Визначення розрахункових траєкторій для першого тестового випробування: *а* – за вхідними параметрами контролера високого рівня (Рис. 7); *б* – за вхідними параметрами комбінованої системи управління рухом (Рис. 11)

Необхідно зауважити, що крива синього кольору представляє результуючий вихід відповідного *MPC*-контролеру, тоді як τ_c є фактичною керуючою силою, що діє на судно.

Для дослідження функціонування комбінованої *MCS* була зроблена спроба введення до високорівневого *MPC*-контролеру відокремленої *MCS* інформації про фізичні обмеження електродвигунів ПП. Тобто, була зроблена процедура накладання обмежень на (n, α) на обмеження на τ^d_c . Ці розрахунки було виконано за допомогою екзогенного алгоритму (Таблиця 4).

Таблиця 4

Алгоритм розрахунку обмежень результуючої сили з урахуванням вимірювань (n, α)

№ з/П	Функція алгоритму	Процедура розрахунку
1	<i>function Calculate_constraints</i> (n, α)	
2	<i>Initialize</i> $N, \bar{\alpha}, \bar{n}$	
3	<i>for</i> $i = 1$ <i>to</i> N <i>do</i>	
4	$n_v \leftarrow \text{Make_vector}(n, \bar{n})$	Функція <i>Make_vector</i> (a, b) повертає рівномірне значення вектору у діапазоні $[a - b, a + b]$
5	$\alpha_v \leftarrow \text{Make_vector}(\alpha, \bar{\alpha})$	
6	$[nn, \alpha\alpha] \leftarrow \text{Make_grid}(n_v, \alpha_v)$	Функція <i>Make_grid</i> (a, b) повертає координатну площину (aa, bb) у декартовій системі координат із точок, визначених векторами a і b
7	$\tau \leftarrow \text{Thruster_model}(nn, \alpha\alpha)$	Функція <i>Thruster_model</i> $(nn, \alpha\alpha)$ обчислює узагальнену силу, що діє на судно, для всіх точок у діапазоні $nn, \alpha\alpha$
8	$\bar{\tau}(i) \leftarrow \max(\tau)$	Знаходження максимального та мінімального значень сили у заданий проміжок часу у горизонті прогнозування
9	$\underline{\tau}(i) \leftarrow \min(\tau)$	
10	<i>end for</i>	
11	<i>return</i> $\bar{\tau}, \underline{\tau}$	
12	<i>end function</i>	

Алгоритм оперує виміряними безпосередньо вхідними даними (n, α) ідентифікації положення ПП у відповідності до матриці розташування. Разом із обмеженнями швидкості та величини є можливість розрахувати всі можливі комбінації (n, α) у найближчому приближенні. Після цього, у відповідності до (12), як відповідність між (n, α) і τ_c^d , розраховуються максимальна і мінімальна досяжні сила для кожного степеню свободи. Ітераційна послідовність в N разів дозволяє знайти верхню та нижню межі величини τ_c^d для кожного кроку у горизонті прогнозування. Далі цей алгоритм виконується з тією ж частотою і для *MPC*-контролеру високого рівня, що у безперервному формулюванні призводить до обмежень, що змінюються в часі із заміною постійного набору обмежень (27):

$$\tau_{-c}^d(t) \leq \tau_c^d \leq \bar{\tau}_c^d(t). \quad (35)$$

На

Рис. 15 показаний приклад розрахованих обмежень для горизонту прогнозування $N = 80$ секунд у момент часу, коли $n = 0$ і $\alpha = 0$. Потребує уваги невелике значення обмежень при $k = 0$, які не дорівнюють нулю.

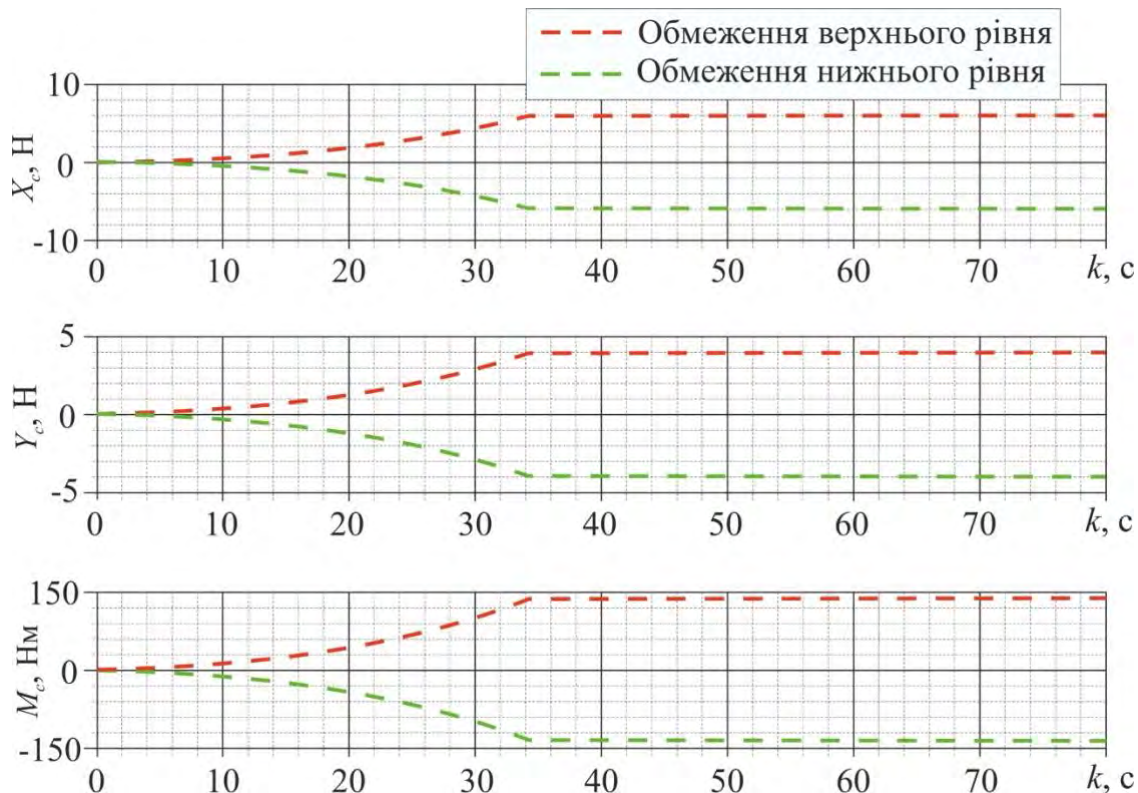


Рис. 15 Обмеження для τ_c^d на горизонті прогнозування $k = 1, \dots, N$ для $T_s = 1$, обчислений у момент часу t , коли $n = 0$ і $\alpha = 0$. Асиметрія імпульсу пов'язана з обмеженням від'ємних обертів гвинта, які встановлені нижче додатних

Далі представлені результати для розширеної *MCS*, яка забезпечує обмеження, що змінюються в часі, для першого тестового випробування. Параметри для високорівневого *MPC*-контролеру і матриці розташування ПП ідентичні тим, що використовуються для розподіленої *MCS* у попередніх розділах.

Вихідний сигнал високорівневого *MPC*-контролеру для розширеної *MCS* нанесено на графік відносно фактичної сили, що діє на судно. На інтервалі часу $t \in [40, 60]$ секунд, коли судно починає зменшувати швидкість, все ще є присутня невідповідність. Однак, на відміну від результатів, показаних на Рис. 7, 6, τ_c^d тут близьке до нуля, тоді як τ_c є більш від'ємним, а не навпаки. Таким чином, обмеження забезпечують високорівневий *MPC*-контролер від генерування недопустимої сили.

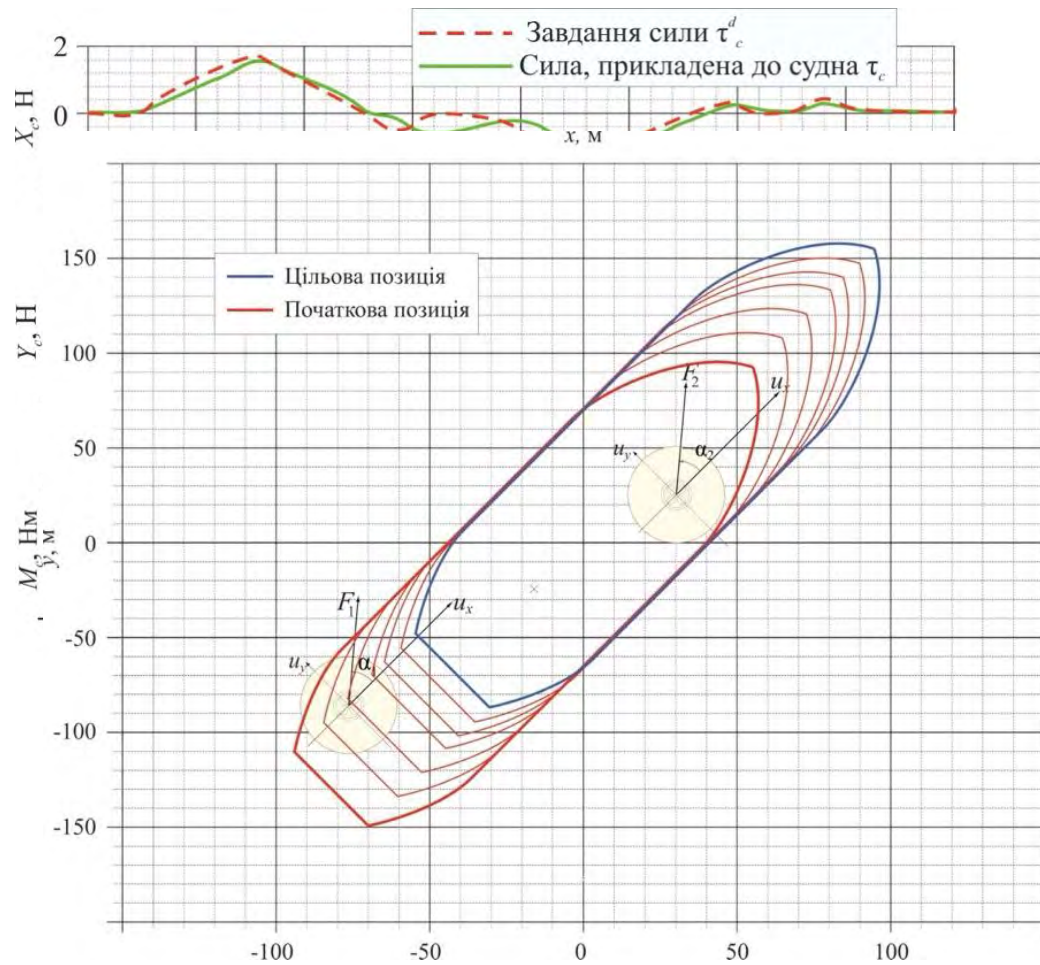


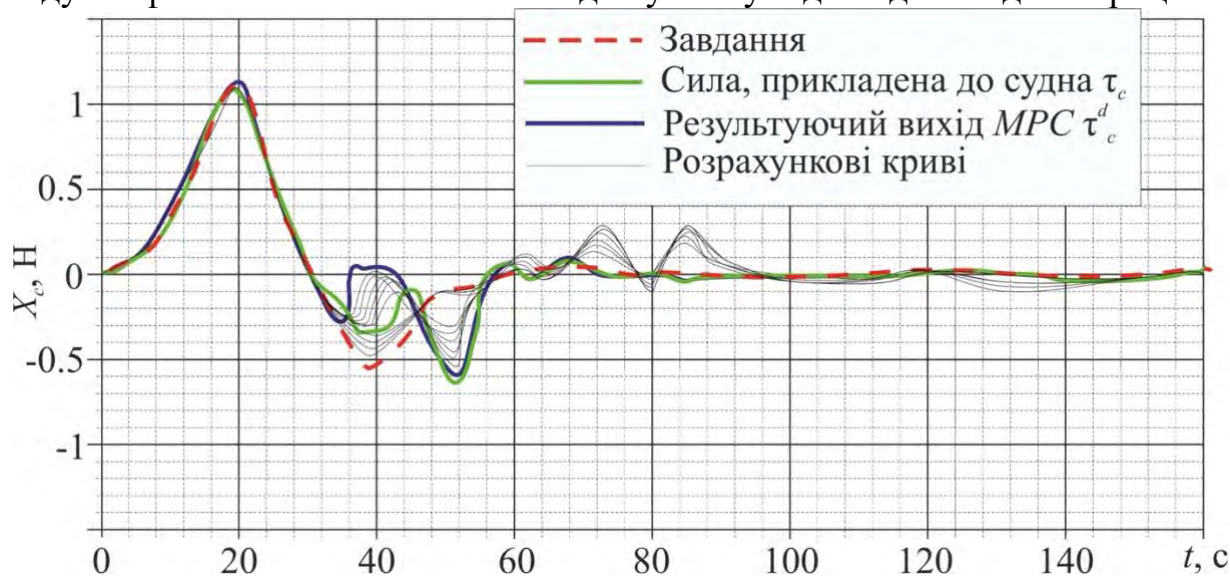
Рис. 16 Залежності заданої τ_c^d і фактичної сили τ_c , яка діє на судно.

Натомість, невідповідність пов'язана з немодельованою динамікою ПП та деградаційними ефектами на лініях гребних гвинтів, які, натомість, діють у синергізмі із системою керування для цього тестового випробування, зменшуючи швидкість судна. Однак, все одно, судно зупиняється із забіганням позиції відносно цільової точки Рис. 17. Розрахункові вхідні траєкторії, розраховані для високорівневого MPC-контролеру, показані на Рис. 18., які на початку моделювання практично збігаються до заданої траєкторії.

Рис. 17 Зображення руху моделі в горизонтальній площині

За обмеженнями це можлива траєкторія, оскільки вона задовольняє конусоподібним обмеженням, показаним на

Рис. 15. Таким чином рух судна планується за цією траєкторією. Однак вона дуже схожа на початкову траєкторію, яка виявилася нездійсненною з огляду на фізичні обмеження та поведінку ПП у відповідності до матриці їх



розташування. Близько часу $t = 40$ с обмеження, що змінюються в часі, обмежують початкову траєкторію, змушуючи вихідний сигнал наближатися до нуля, оскільки двигуни ПП продовжують обертатися. Таким чином, необхідно розрахувати нові вхідні траєкторії, які істотно відрізняються від попередніх. Це затримує заплановане зниження швидкості судна приблизно на стільки часу, скільки потрібно для повороту двигунів ПП, що змушує судно зміщуватися на позицію за межами заданої. Таким чином, поведінка судна не сильно відрізняється від поведінки розширеної *MCS* без змінних у часі обмеженнях.

Рис. 18 Визначення розрахункових траєкторій із змінними в часі обмеженнями

Враховуючи обмеження, що змінюються в часі, до *MPC*-високого рівня надходить прогнозована інформація про сили, що використовується при розрахунку які траєкторії руху. Тобто, як рухома сила в момент часу $k + 1$ повинна співвідноситися з управлінням в момент часу k . Що стосується *MPC*-контролеру високого рівня для розгалужених *MCS*, це відноситься лише до

[До змісту](#)

постійних обмежень швидкості. Таким чином, початково розрахована вхідна траєкторія подібна до тієї, що була згенерована лише з обмеженнями корпусу моделі (Рис. 14, *a*). Завдання моделювання полягало у варіації обмежень з метою їх мінімізації.

Для перевірки роботи відокремленої *MCS*, проводився експеримент із фізичним обмеженням сили, прикладеної до судна, для *MPC* високого рівня. Комбінована *MCS* у попередніх розділах позиціонується як контролер



високого рівня разом із неідентифікованою матрицею розташування ПП. Вихідні дані комбінованої *MCS*, n і α , перетворюються в бажану силу τ_c^d за допомогою (12), а потім надсилаються до контролеру розташування ПП (Рис. 19). Результати моделювання показані на Рис. 20. Як і на Рис. 12, *в*, на Рис. 20 показаний результат роботи комбінованої *MCS* із створення бажаної сили, нанесеної на графік, у порівнянні із фактичною силою, що діє на судно.

Рис. 19 Експериментальна система із використанням комбінованої *MCS* як контролера руху високого рівня інтегрованим із контролером розташування ПП (*TA*)

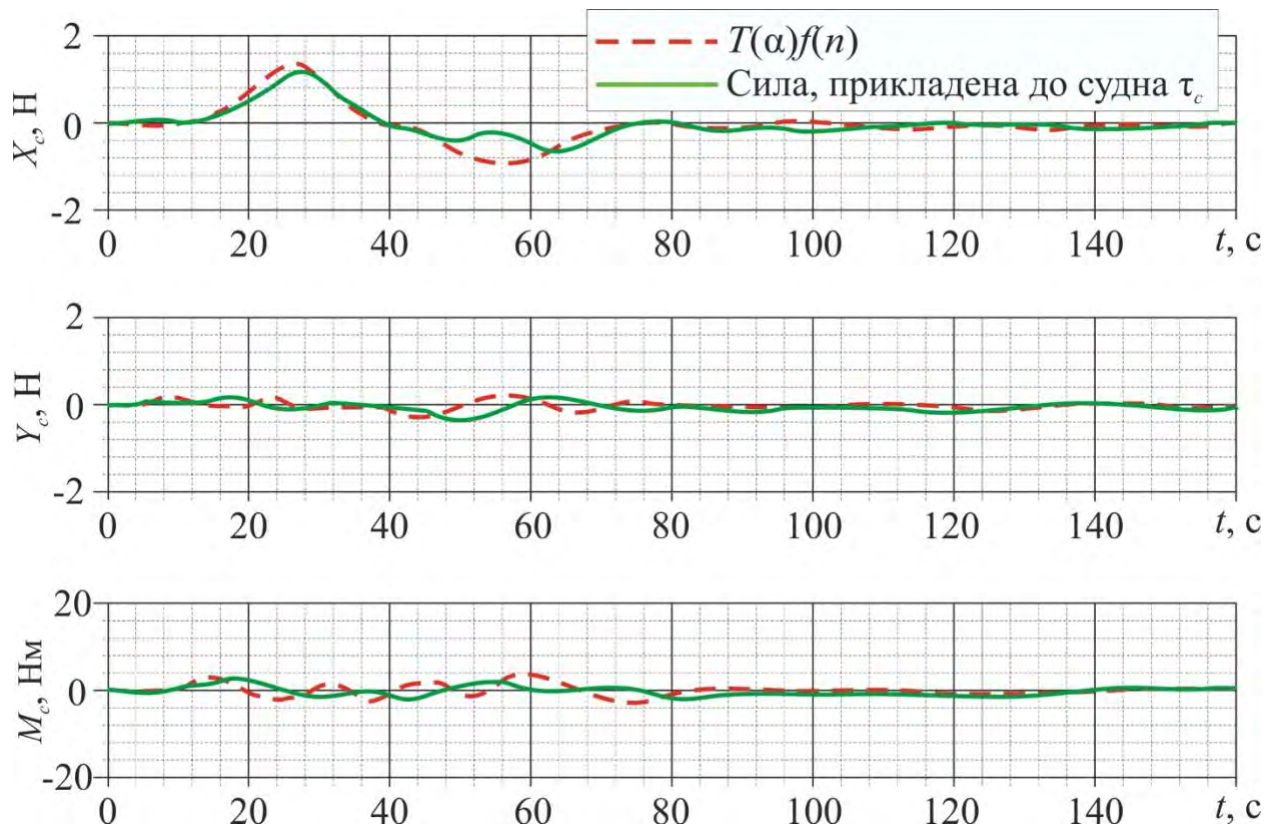


Рис. 20 Сила, що діє на судно τ_c , і розрахована сила, яка має діяти на судно з урахуванням (12)

Хоча бажана сила є близькою до нуля протягом деякого часу біля $t = 30$, дозволяючи продовж цього часу обертатися двигунам ПП, існує чітко видима невідповідність у збуренні силі близько $t = 55$, коли комбінована MCS високого рівня створює гальмівну силу опору руху судна. Результуючий рух судна показано Рис. 21 Рух моделі судна у горизонтальній площині

, де видно значне неспівпадіння заданої і дійсної позицій. Деяке пояснення дає

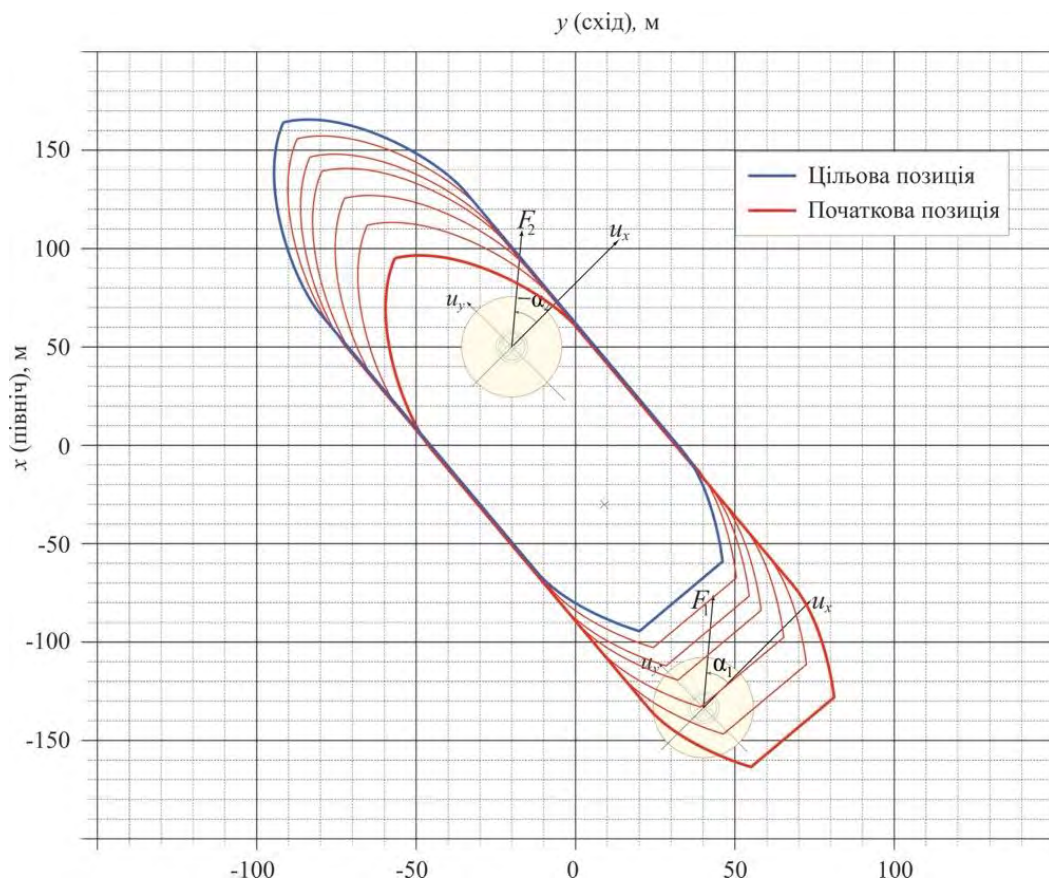


Рис. 22, на якому показано вихідний сигнал контролеру розташування ПП, який створює сигнал розвороту двигунів ПП приблизно на 10 секунд пізніше, ніж це відбувалося для автономного режиму комбінованої *MCS* (Рис. 12, *г*).

Рис. 21 Рух моделі судна у горизонтальній площині

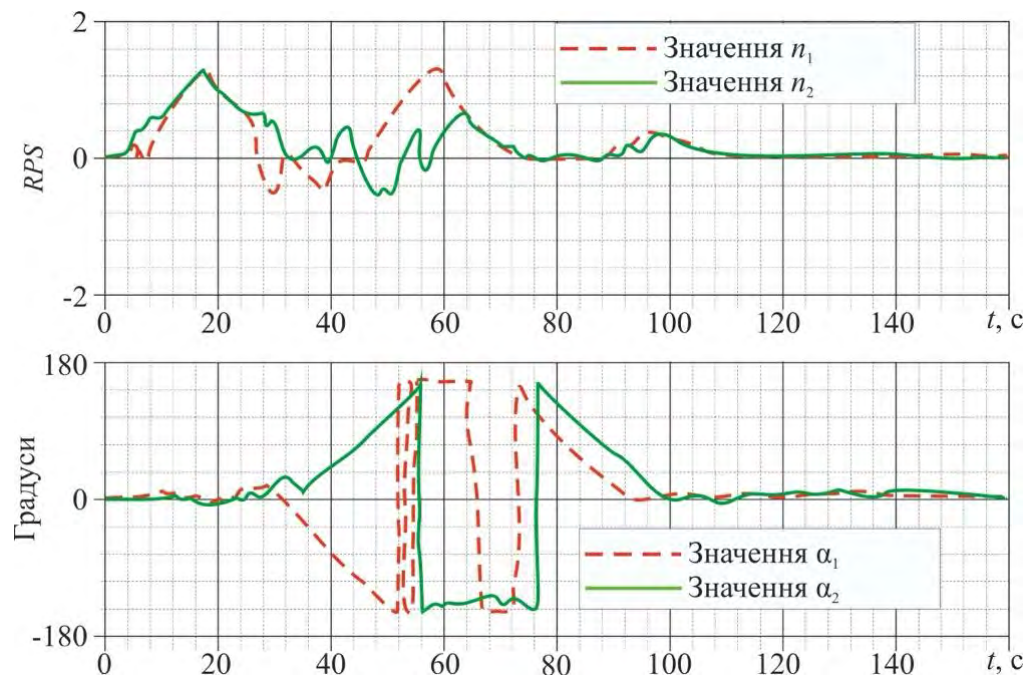


Рис. 22 Контрольовані від матриці розташування ПП залежності n і α .

1.8. Висновки

Результати демонструють можливість контролеру високого рівня спланувати фізично траєкторію руху судна із незначним зниженням продуктивності відокремленої системи, що пов'язано із обмеженнями, у порівнянні із комбінованою *MCS*, щодо матриці розташування ПП в залежності від типу судна. Таким чином, у цьому випадку контролер високого рівня може управляти двигунами ПП лише у разі від'ємного значення заданого упору гвинтів, замість заздалегідь заданого сигналу обертання одного ПП в упередження зниження швидкості судна. При чому, немає значення, протягом якого часу задана сила буде близькою до нуля, зважаючи на фізичні обмеження, якщо контролер розташування ПП не передбачає кінцевої від'ємної сили. Завдяки цьому ефекту затримка сили в результаті обертання двигунів ПП все одно буде присутня. Це вказує на те, що при використанні *MPC* як контролера високого рівня в роз'єднаних *MCS* можна отримати значні переваги в продуктивності та надійності, якщо наявний стабільний обґрунтований зв'язок між контролерами високого рівня та розташування ПП.

Результати вказують на те, що підвищення продуктивності та надійності системи керування рухом можливо за рахунок розширення роз'єднаної системи із використанням лише фізичних обмежень, що вказує на необхідність моделювання *MPC*-контролером високого рівня поведінки ПП, в залежності від матриці розташування, шляхом формування більш розширених обмежень або ітераційного надсилання інформації. Після цього *MPC*-контролер високого рівня забезпечується поточною інформацією як по обмеженням, що змінюються в часі, так і додатковою інформацією про розташування ПП, що дозволить підвищити ефективність забезпечення поточної бажаної сили.

Реалізація системи керування рухом на низькій швидкості можливо за умови проведення попереднього тестування з різними руховими завданнями. Наявні проблеми спровоковані необхідністю екстремальних завдань через немодельовані фізичні обмеження та непередбачувану поведінку контролеру розташування ПП, що призводить до зайвого руху судно відносно заданої позиції. Вдосконалення відокремленої системи за рахунок використання інформаційного каналу від контролеру розташування ПП до контролера високого рівня. Результати показали, що моделювання фізичних обмежень системи управління двигунами ПП виявилось недостатнім для досягнення адекватної продуктивності у порівнянні із комбінованою *MCS*, без передачі у *MPC*-контролер високого рівня поточної інформації про розташування ПП.

Дослідження, спрямовані на покращення продуктивності відокремлених *MCS*, в першу чергу, зосереджені на переналаштуваннях контролеру високого рівня із врахуванням зміни завдань контролеру розташувань ПП.

Інші напрямки майбутніх досліджень пов'язані із застосуванням еталонних генераторів, що дозволить усунути проблеми, виявлені щодо відокремлених *MCS*, забезпечивши *MPC*-контролер високого рівня інформацією щодо реальної еталонної траєкторії руху судна з фізичними обмеженнями що поведінки ПП. Фактично, це було б корисно для всіх представлених реалізацій *MCS*. Параметри налаштування контролеру

розташування ПП та системи керування рухом наразі досить чутливі до вибору заданої позиції судна, оскільки квадрат помилки позиції зважений у функції вартості. Крім того, ймовірно, що еталонний генератор зможе спланувати рух у часі, наприклад, враховуючи задану позицію. Тоді можна було б використати всю прогностичну потужність структури *MPC*, якщо генератор еталонних даних також надсилає *MPC*-контролеру налаштування щодо горизонту прогнозування.

Робочим простором розроблених систем керування рухом є низькошвидкісним. Таким чином, лінійна кінетична модель, що описує судно, є інформаційно достатньою. Крім того, упори, створювані двигунами ПП, залежать від швидкості води повздовж корпусу судна, де квадратичне співвідношення між тягою та обертами на хвилину зазвичай зберігається близько до нульової швидкості. Крім того, як було зазначено та обговорено, незмодельовані сили руху ПП мають суттєвий вплив на точність утримання позиції. Майбутні розробки повинні ґрунтуватися на більш точних моделях суден та двигунів ПП для забезпечення управління на більш високих швидкостях, або компенсації помилки моделювання, які призводять до значного погіршення ефективності керування.

У всіх симуляціях збурення довкілля τ_{env} були встановлені на нуль, включаючи сили від вітру, течії та хитавиці. Але, компенсація факторів навколишнього середовища має вирішальне значення для досягнення адекватного рівня функціонування системи динамічного позиціонування. Збурення можна грубо розділити на високочастотні та низькочастотні компоненти. Високочастотні компоненти зазвичай відкидаються хвильовим фільтром, тоді як низькочастотні компоненти можуть бути інтегровані в контролері високого рівня. Подальші дослідження мають на меті дослідити застосування цих методів для компенсації збурень та підвищення надійності керування рухом у реальних експлуатаційних режимах.

Список використаних джерел

1. Abdessameud, A. Motion coordination of thrust-propelled under actuated vehicles with intermittent and delayed communications [Text] // A. Abdessameud, I.G. Polushin, A. Tayebi // Systems & Control Letters. – 2015. – V. 79. – P. 15–22. Doi:[10.1016/j.sysconle.2015.02.006](https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2015.02.006).
2. Akyuz, E. A marine accident analyzing model to evaluate potential operational causes in cargo ships [Text] / E. Akyuz // Safety Science. – 2017. – V. 92. – P. 17–25. Doi:[10.1016/j.ssci.2016.09.010](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.09.010).
3. Andreas, A. Multivariate Modeling and Adaptive Control of Autonomous Ferries / A. Andreas, B. Morten, E. Bjørn-Olav // IFAC-PapersOnLine. – V. 54(16). – P. 395–401. Doi: [10.1016/j.ifacol.2021.10.122](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.122).
4. Arditti, F. Experimental Analysis of a Thrust Allocation Algorithm for *DP* Systems Considering the Interference between Thrusters and Thruster–Hull [Text] / F. Arditti, E. A. Tannuri // IFAC Proceedings Volumes. – 2012. – V. 45, I. 27. – P. 43–48. Doi:[10.3182/20120919-3-IT-2046.00008](https://doi.org/10.3182/20120919-3-IT-2046.00008).
5. Azimi, A. Moore–Penrose inverse of incidence matrix of graphs with complete and cyclic blocks / A. Azimi, R.B. Bapat, E. Estaji // Discrete Mathematics. – 2019. – V. 342, I. 1. – P. 10–17. ISSN 0012-365X. Doi: [10.1016/j.disc.2018.09.020](https://doi.org/10.1016/j.disc.2018.09.020).
6. Babadi, M. K. Effect of hull form coefficients on the vessel sea-keeping performance [Text] / M. K. Babadi, H. Ghassemi; Department of Ocean Engineering, AmirKabir University of Technology // Journal of Marine Science and Technology. – 2013. – 11 p. Doi:[10.6119/JMST-013-0117-2](https://doi.org/10.6119/JMST-013-0117-2).
7. Baldi, F. Optimal load allocation of complex ship power plants [Text] / F. Baldi, F. Ahlgren, F. Melino, C. Gabriellii, K. Andersson // Energy Conversion and Management. – 2016. – V. 124. – P. 344–356. Doi:[10.1016/j.enconman.2016.07.009](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.009).

8. Bandara, G.A.C.T. Modeling and Control Approach for a Complex-Shaped Underwater Vehicle // American Journal of Mechanical Engineering // G.A.C.T. Bandara, D.A.A.C. Ratnaweera, D.H.S. Maithripala. – 2019. – V. 7(4). – P. 158-171. Doi: <http://dx.doi.org/10.12691/ajme-7-4-2>.
9. Bekker, J. R. A Packaged System Approach to *DP* Vessel Conversion [Text] / J. R. Bekker, S. X. Dou // Dynamic positioning conference: Workboats. – 2002 (September 17 – 18). – 22 p. Режим доступу: \www/ URL: http://dynamic-positioning.com/proceedings/dp2002/workboats_packaged_system.pdf. – 13.05.2016 г. – Загол. з екрану.
10. Brezina, A. J. Measurement of Static and Dynamic Performance Characteristics of Electric Propulsion Systems [Text] / A. J. Brezina, S. K. Thomas; American Institute of Aeronautics and Astronautics // 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. – Grapevine (Dallas/Ft. Worth Region), Texas, 2013 (07 – 10 January). Doi: [10.2514/6.2013-500](https://doi.org/10.2514/6.2013-500).
11. Bucknall, R. W. G. On the Conceptual Design and Performance of a Matrix Converter for Marine Electric Propulsion [Text] / R. W. G. Bucknall, K. M. Ciaramella // IEEE Transactions on Power Electronics, 2010. – V. 25, I. 6. – P. 1497–1508. Doi: [10.1109/TPEL.2009.2037961](https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2037961).
12. Budashko, V. Decision support system's concept for design of combined propulsion complexes [Text] / V. Budashko, V. Nikolskyi, O. Onishchenko, S. Khniunin / Eastern–European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – V. 3. – № 8(81). – P. 10 – 21. Doi: [10.15587/1729-4061.2016.72543](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72543).
13. Budashko, V. V. Design of the three-level multicriterial strategy of hybrid marine power plant control for a combined propulsion complex [Text] / V. V. Budashko / Electrical engineering & electromechanics. – 2017. – №2. – P. 62 – 72. Doi: [10.20998/2074-272X.2017.2.10](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.2.10).
14. Budashko, V. V. Conceptualization of research of power hybrid electric power complexes [Text] / O. V. Glazeva, V. V. Budashko, S. F. Samonov //

- Technology audit and production reserves. – 2016. – V. 5. – 1(31). – 63–73. Doi: [10.15587/2312-8372.2016.81407](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.81407).
15. Budashko, V. Formalization of design for physical model of the azimuth thruster with two degrees of freedom by computational fluid dynamics methods [Text] / V., Budashko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – V. 3. – № 7(87). – P. 40–49. Doi: [10.15587/1729-4061.2017.101298](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101298).
 16. Budashko, V. V. Increasing control's efficiency for the ship's two-mass electric drive [Text] / V. V. Budashko / Electrical engineering & electromechanics. – 2016. – №4. – P. 34 – 42. Doi: [10.20998/2074-272X.2016.4.05](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.4.05).
 17. Budashko, V. V. Prospektive globale wissenschaftliche Trends: Modern technologies and concepts of researching for ship power plants of combined propulsion complexes: Monograph [Text] / V.V. Budashko // ScientificWorld-NetAkhatAV Lußstr 13, Karlsruhe, Germany in conjunction with Institute «SE&E», 2021. – Book 7. – Part 7. – 152 p. ISBN 978-3-949059-43-8 Doi: [10.30890/2709-2313.2021-07-07](https://doi.org/10.30890/2709-2313.2021-07-07).
 18. Budashko, V. V. Ship's power plants of combined propulsion complexes: concepts, technologies, researching: Monograph / Budashko V. V.. – Odessa: NU “OMA”, 2020. – 136 p. ISBN 978-617-7857-01-2.
 19. Budashko, V., Sandler, A., & Khniunin, S. (2023). Improving the method of linear-quadratic control over a physical model of vessel with azimuthal thrusters. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(2 (121)), 49–71. Doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273934>.
 20. Budashko, V. Theoretical-applied aspects of the composition of regression models for combined propulsion complexes based on data of experimental research [Text] / V., Budashko, V., Golikov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – V. 4. – № 3(88). – P. 11 – 20. Doi: [10.15587/1729-4061.2017.107244](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.107244).
 21. Budashko, V. Synthesis of the Management Strategy of the Ship Power Plant for the Combined Propulsion Complex [Text] / V. Budashko, V. Shevchenko

- // 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), Kyiv, 16-18 Oct. 2018, Ukraine: IEEE. P. 106-108. Doi: [10.1109/MSNMC.2018.8576266](https://doi.org/10.1109/MSNMC.2018.8576266). Режим доступу: \WWW/ URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8576266>. – 5.1.2019 р. – Загол. з екрану.
22. Budashko, V.V. Integration of expert systems for the design of marine power plants of combined propulsion complexes [Text] / V.V. Budashko // SEA-CONF 2019 The 5th International Scientific Conference, May 17th - 18th, 2019. – Constanta: “MIRCEA CEL BATRAN” NAVAL ACADEMY. – P. 20-21. Режим доступу: \WWW/ URL: <https://www.anmb.ro/ro/conferinte/sea-conf/arhiva/program%20sea-conf%202019.pdf>. – 5.9.2019 р. – Загол. з екрану.
 23. Budashko, V. Multicriteria strategy of power managing system for ships power plants for combined propulsion complexes [Text] / Budashko V. // IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE). – 2019. – V. 14, I. 5. – P. 14-28. e-ISSN: 2278-1676, p-ISSN: 2320-3331. Doi: [10.9790/1676-1405011428](https://doi.org/10.9790/1676-1405011428).
 24. Budashko, V. V. Increasing the efficiency of hybrid propulsion complexes for multipurpose vessels by different criteria of the energy management strategies [Text] / V. V. Budashko // Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal). – 2019. – V. 10 (50). – P. 53-62. Режим доступу: \WWW/ URL: https://eesa-journal.com/wp-content/uploads/EESA_1050_oct_2019_part_4.pdf. – 5.11.2019 р. – Загол. з екрану.
 25. Budashko, V. Improvement of the operation for electromechanical system under non-permanent loading [Text] / V. Budashko, I. Hvozdeva, O. Onishchenko, V. Shevchenko, R. Kudelkin // 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Slavske, 25-29 Feb. 2020, Ukraine: IEEE. – P. 35-39. Doi: [10.1109/TCSET49122.2020.235588](https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235588).

26. Budashko, V. Thrusters physical model formalization with regard to situational and identification factors of motion modes [Text] / V. Budashko // 2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE), Istanbul, 12-13 June 2020, Turkey: IEEE. Pp. 1-6. Doi: [10.1109/ICECCE49384.2020.9179301](https://doi.org/10.1109/ICECCE49384.2020.9179301).
27. Budashko, V. Power plant, propulsion complex and control system of autonomous dual-purpose underwater vehicle [Text] / V.V. Budashko // 15th International Naval Engineering Conference and Exhibition (INEC/iSCSS 2020), 5-9 October 2020, Virtual online conference. Pp. 1-9. Available at: <https://events.rdmobile.com/Lists/Details/1071014>.
28. Budashko, V. Main problems of creating energy-efficient positioning systems for multipurpose sea vessels [Text] / V. Budashko, T. Obniavko, O. Onishchenko, Y. Dovidenko, D. Ungarov // 2020 IEEE 6th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), 20-23 Oct. 2020, KYIV, Ukraine: IEEE. Pp. 106-109. Doi: [10.1109/MSNMC50359.2020.9255514](https://doi.org/10.1109/MSNMC50359.2020.9255514).
29. Budashko, V. The synthesis of control system to synchronize ship generator assemblies [Text] / V. Budashko, V. Shevchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – V. 1. – № 2(109). – P. 45-63. ISSN 1729-3774. Doi: [10.15587/1729-4061.2021.225517](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225517).
30. Budashko, V. Solving a task of coordinated control over a ship automated electric power system under a changing load [Text] / V. Budashko, V. Shevchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – V. 2. – № 2(110). – P. 54-70. ISSN 1729-3774. Doi: [10.15587/1729-4061.2021.229033](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229033).
31. Budashko, V. Diagnosis of the Technical Condition of High-Tech Complexes by Probabilistic Methods [Text] / V. Budashko, I. Hvozdeva, V. Shevchenko, V. Myrhorod, A. Sandler, O. Glazeva // 2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and [До змісту](#)

- Computer Engineering (TCSET), Slavske, 22-26 Feb. 2022, Ukraine: IEEE TCSET 2022. – P. 7-14. Doi: [10.1109/TCSET49122.2020.235588](https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235588).
32. Budashko, V. Optimization of the control system for an electric power system operating on a constant power hyperbole [Text] / V. Budashko, A. Sandler, V. Shevchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – V. 1. – № 8(115). – P. 6-17. ISSN 1729-3774. Doi: [10.15587/1729-4061.2022.252172](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.252172).
 33. Budashko, V. Diagnosis of the Technical Condition of High-tech Complexes by Probabilistic Methods [Text] / V. Budashko, A. Sandler, V. Shevchenko // International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation (TransNav). – 2022. – V. 16. – № 1. – P. 105-111. ISSN 2083-6473, ISSN 2083-6481 (electronic version). Doi: [10.12716/1001.16.01.11](https://doi.org/10.12716/1001.16.01.11).
 34. Budashko, V., Sandler, A., & Khniunin, S. (2023). Improving the method of linear-quadratic control over a physical model of vessel with azimuthal thrusters. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(2 (121), 49–71. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273934>.
 35. Carrera, A. Cognitive system for autonomous underwater intervention [Text] / A. Carrera, N. Palomeras, N. Hurtós, P. Kormushev, M. Carreras // Pattern Recognition Letters. – 2015. – V. 67(1). – P. 91–99. Doi:[10.1016/j.patrec.2015.06.010](https://doi.org/10.1016/j.patrec.2015.06.010).
 36. Caron, F. GPS/IMU data fusion using multisensor Kalman filtering: introduction of contextual aspects [Text] / F. Caron, E. Duflos, D. Pomorski, P. Vanheeghe // Information Fusion. – 2006. – V. 7, I. 2. – P. 221-230. ISSN 1566-2535. Doi: [10.1016/j.inffus.2004.07.002](https://doi.org/10.1016/j.inffus.2004.07.002).
 37. Ccolque-Churquipa, A. Implementation of a Measurement System for the Attitude, Heading and Position of a USV Using IMUs and GPS [Text] / A. Ccolque-Churquipa, J. C. Cutipa-Luque and D. Y. Aco-Cardenas // 2018 IEEE ANDESCON. – 2018. – P. 1-6, Doi: [10.1109/ANDESCON.2018.8564668](https://doi.org/10.1109/ANDESCON.2018.8564668).
 38. Corradini, M. L. A nonlinear fault-tolerant thruster allocation architecture for underwater remotely operated vehicles [Text] / M. L. Corradini, A. Cristofaro

// IFAC–PapersOnLine. – 2016. – V. 49, I. 23. – P. 285–290.
Doi:[10.1016/j.ifacol.2016.10.356](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.356).

39. Chen, T.-Y. An interval-valued intuitionistic fuzzy LINMAP method with inclusion comparison possibilities and hybrid averaging operations for multiple criteria group decision making [Text] / T.-Y. Chen // Knowledge-Based Systems. – 2013. – V. 45. – P. 134–146. Doi:[10.1016/j.knosys.2013.02.012](https://doi.org/10.1016/j.knosys.2013.02.012).
40. Chrif, L. Aircraft Control System Using LQG and LQR Controller with Optimal Estimation-Kalman Filter Design [Text] / L. Chrif, Z. M. Kadda // Procedia Engineering. – 2014. – V. 80. – P. 245-257. ISSN 1877-7058. Doi: [10.1016/j.proeng.2014.09.084](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.084).
41. Cozijn, H. Analysis of the velocities in the wake of an azimuthing thruster, using PIV measurements and CFD calculations [Text] / H. Cozijn, R. Hallmann, A. Koop // Dynamic positioning conference: thrusters session. – October 12–13, 2010. – Houston: Maritime Research Institute Netherlands (MARIN). – 25 p. Режим доступу: \www/ URL: <http://www.refresco.org/wp-content/uploads/2015/05/2010-MTS-DP-Cozijn-Hallmann-Koop.pdf>. – 24.12.2023 р. – Загол. з екрану.
42. Dedes, E. K. Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping [Text] / E. K. Dedes, D. A. Hudson, S. R. Turnock // Energy Policy. – 2012. – V. 40. – P. 204–218. Doi:[10.1016/j.enpol.2011.09.046](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.046).
43. Elkhatem, A. S. Robust LQR and LQR-PI control strategies based on adaptive weighting matrix selection for a UAV position and attitude tracking control [Text] / A. S. Elkhatem, S. N. Engin // Alexandria Engineering Journal. – 2022. – V. 61, I. 8. – P. 6275-6292. ISSN 1110-0168. Doi: [0.1016/j.aej.2021.11.057](https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.11.057).
44. Fernandes, Daniel de A. Trajectory Tracking Motion Control System for Observation Class ROVs [Text] / D. de A. Fernandes, A. J. Sorensen, D. C. Donha // IFAC Proceedings Volumes. – 2013. – V. 46, I. 33. – P. 251-256.

ISSN 1474-6670, ISBN 9783902823526. Doi:
<https://doi.org/10.3182/20130918-4-JP-3022.00025>.

45. Fossen, T. I. Identification of dynamically positioned ships [Text] / T. I. Fossen, S. I. Sagatun, A. J. Sørensen // Control Engineering Practice: 1999. – March. – P. 369–376. Doi:[10.1016/0967-0661\(96\)00014-7](https://doi.org/10.1016/0967-0661(96)00014-7), Marine Systems Simulator Режим доступу: \www/ URL: <http://www.marinecontrol.org/>. – 24.02.2015 р. – Загол. з екрану.
46. Fossen, T. (2021) Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. 2nd edn. Wiley. Available at: <https://www.perlego.com/book/2761053/handbook-of-marine-craft-hydrodynamics-and-motion-control-pdf> (Accessed: 12 January 2024).
47. Furmanik, M. Low-Speed Sensorless Control for Six-Phase PMSM Based on Magnetic Anisotropy / M. Furmanik, D. Konvičný, P. Rafajdus // Transportation Research Procedia. – 2023. – V. 74. – P. 892-899. ISSN 2352-1465. Doi: [10.1016/j.trpro.2023.11.222](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.222).
48. Gandhi, P. Performance Analysis of Half Car Suspension Model with 4 DOF using PID, LQR, FUZZY and ANFIS Controllers [Text] / P. Gandhi, S. Adarsh, K. I. Ramachandran // Procedia Computer Science. – 2017. – V. 115. – P. 2-13. ISSN 1877-0509. Doi: [10.1016/j.procs.2017.09.070](https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.09.070).
49. Geranmehr, B. Nonlinear suboptimal control of fully coupled non-affine six-DOF autonomous underwater vehicle using the state-dependent Riccati equation [Text] / Ocean Engineering // B. Geranmehr, S. R. Nekoo. – 2015. – V. 96. – P. 248-257. ISSN 0029-8018. Doi: [10.1016/j.oceaneng.2014.12.032](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.12.032).
50. Ghassemi, H. Computational hydrodynamic analysis of the propeller-rudder and the AZIPOD systems [Text] / H. Ghassemi, P. Ghadimi // Ocean Engineering. – 2008. – V. 35, I. 1. – P. 117–130. Doi:[10.1016/j.oceaneng.2007.07.008](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2007.07.008).
51. Gibson, J. D. Performance effects of optimal LQG eigenvalue placement in ship control [Text] / J. D. Gibson // IECON'03. 29th Annual Conference of the

- IEEE Industrial Electronics Society (IEEE Cat. No.03CH37468). – 2003. – V. 1. – P. 268-278. Doi: [10.1109/IECON.2003.1279991](https://doi.org/10.1109/IECON.2003.1279991).
52. Glad, T., & Ljung, L. (2000). Control Theory (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315274737>.
 53. Goor, van P. Constructive Equivariant Observer Design for Inertial Navigation / P. van Goor, T. Hamel, R. Mahony // IFAC-PapersOnLine. – 2023. – V. 56. – I. 2. – P. 2494-2499. ISSN 2405-8963. Doi: [10.1016/j.ifacol.2023.10.1229](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1229).
 54. Gros, S., Zanon, M., Quirynen, R., Bemporad, A., Diehl, M. (2016). From linear to nonlinear MPC: bridging the gap via the real-time iteration. International Journal of Control. 93. 1-19. Doi: <http://dx.doi.org/10.1080/00207179.2016.1222553>.
 55. Guo, G. Covariance matrix and transfer function of dynamic generalized linear models [Text] / G. Guo, W. You, L. Lin, G. Qian // Journal of Computational and Applied Mathematics. – 2016. – V. 296. – P. 613–624. Doi: [10.1016/j.cam.2015.10.015](https://doi.org/10.1016/j.cam.2015.10.015).
 56. Hemalatha, N. Sensorless speed and position control of permanent magnet BLDC motor using particle swarm optimization and ANFIS [Text] / N. Hemalatha, S. Venkatesan, R. Kannan, S. Kannan, A. Bhuvanesh, A.S. Kamaraja // Measurement: Sensors. – 2024. – V. 31. – 100960. ISSN 2665-9174. Doi: [10.1016/j.measen.2023.100960](https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100960).
 57. Home Kongsberg Maritime: Dynamic positioning – *DP* system Single system K-Pos *DP*-11/12 Режим доступу: \www/ URL: <https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0240.nsf/AllWeb/E477FA13B4BCC535C1256A570031678D?OpenDocument> – 24.02.2023 р. – Загол. з екрану.
 58. Houska, B. ACADO Toolkit – An Open Source Framework for Automatic Control and Dynamic Optimization [Text] / B. Houska, H. Ferreau, Diehl, M. // Optimal Control Applications and Methods. – 2011. – V. 32(3). – P. 298–312. Doi: <https://doi.org/10.1002/oca.939>.

59. Hvozdeva, I. Problems of Improving the Diagnostic Systems of Marine Diesel Generator Sets [Text] / I. Hvozdeva, V. Myrhorod, V. Budashko, V. Shevchenko // 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Slavske, 25-29 Feb. 2020, Ukraine: IEEE. – P. 350-354. Doi: [10.1109/TCSET49122.2020.235453](https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235453).
60. Jian, L. Numerical investigation into effects on momentum thrust by nozzle's geometric parameters in water jet propulsion system of autonomous underwater vehicles [Text] / L. Jian, L. Xiwen, Z. Zuti, L. Xiaohui, Z. Yuquan // Ocean Engineering. – 2016. – V. 123. – P. 327–345. Doi: [10.1016/j.oceaneng.2016.07.041](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.07.041).
61. Johansen, T. A. Control allocation – A survey. [Text] / T. A. Johansen, T. I. Fossen // Automatica. – 2013. – V. 49, I. 5. – P. 1087-1103. ISSN 0005-1098. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.01.035>.
62. Lang, X. A semi-empirical model for ship speed loss prediction at head sea and its validation by full-scale measurements / X. Lang, W. Mao // Ocean Engineering. – 2020. – V. 209. – 107494. ISSN 0029-8018. Doi: [10.1016/j.oceaneng.2020.107494](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107494).
63. Liang, C.C. The optimum control of thruster system for dynamically positioned vessels [Text] / C.C. Liang, W.H. Cheng // Ocean Engineering. – 2004. – V. 31, I. 1. – P. 97-110. ISSN 0029-8018. Doi: [10.1016/S0029-8018\(03\)00016-7](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(03)00016-7).
64. Linder, J. Graybox Modelling of Ships Using Indirect Input Measurements // J. – 2014. Doi: [10.3384/lic.diva-111095](https://doi.org/10.3384/lic.diva-111095).
65. Ljungberg, F. Estimation of Nonlinear Greybox Models for Marine Applications [Text] / F. Ljungberg. Doi: [10.3384/lic.diva-165828](https://doi.org/10.3384/lic.diva-165828).
66. Maheri, A. Multi-objective design optimization of standalone hybrid wind-PV-diesel systems under uncertainties [Text] / A. Maheri // Renewable Energy. – 2014. – V. 66. – P. 650–661. Doi: [10.1016/j.renene.2014.01.009](https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.009).
67. Maidana, R. G. Risk-based path planning for preventing collisions and groundings of maritime autonomous surface ships [Text] / R. G. Maidana, S.

- D. Kristensen, I. B. Utne, A. J. Sørensen // Ocean Engineering. – 2023. – V. 290. – 116417. ISSN 0029-8018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116417>.
68. MDL Home Page: Fanbeam® Laser *DP* reference system [Електронний ресурс]. URL: <http://www.mdl-laser.com/en/rugged-laser-equipment-for-extreme-environments-14735>. (дата звернення: 13.10.2023).
 69. Myrhorod, V. Multi-parameter Diagnostic Model of the Technical Conditions Changes of Ship Diesel Generator Sets [Text] / V. Myrhorod, I. Hvozdeva, V. Budashko // 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, 21-25 Sept. 2020, Ukraine: IEEE. Pp. 1-5. Doi: [10.1109/PAEP49887.2020.9240905](https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240905).
 70. Myrhorod, V. Approximation-markov models of changes in the technical condition parameters of power and energy installations in long-term operation [Text] / Myrhorod, V., Gvozdeva, I., Budashko, V. // Aerospace technic and technology. – 2022. – V. 4 (I.2). – P. 73-79. Doi: [10.32620/aktt.2022.4sup2.11](https://doi.org/10.32620/aktt.2022.4sup2.11).
 71. Naeem, W. LQG/LTR Control of an Autonomous Underwater Vehicle Using a Hybrid Guidance Law [Text] / W. Naeem, R. Sutton, S.M. Ahmad // IFAC Proceedings Volumes. – 2003. – V. 36, I. 4. – P. 31-36. ISSN 1474-6670. Doi: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)36653-3](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)36653-3).
 72. Nikolskyi, V. Parametrization and identification of energy flows in the ship propulsion complex [Text] / V. Nikolskyi, V. Budashko, S. Khniunin, M. Nikolskyi // 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Slavske, 20-24 Feb. 2018, Ukraine: IEEE. – P. 288-294. Doi: [10.1109/TCSET.2018.8336205](https://doi.org/10.1109/TCSET.2018.8336205). Режим доступу: \WWW/ URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8336205>. – 5.9.2018 р. – Загол. з екрану.
 73. Oosterveld, M. W. C. Further computer-analyzed Data of the Wageningen B-screw Series [Text] / M. W. C. Oosterveld, P. van Oossanen // [До змісту](#)

Int. Shipbuilding Progress. – 2011. – V. 22. – P. 269–317. Режим доступу:
 \www/ URL:

<http://www.sname.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=1f4cf6d6-4fdc-4238-8470-716717920f07>. – 13.11.2016 р. – Загол. з екрану.

74. Quirynen, R. Autogenerating microsecond solvers for nonlinear MPC: A tutorial using ACADO integrators [Text] / R. Quirynen, M. Vukov, M. Zanon, and M. Diehl // Optimal Control Applications and Methods. – 2015. – V. 36(5). – P. 685–704. Doi: [10.1002/oca.2152](https://doi.org/10.1002/oca.2152).
75. Sandler, A. Improving tools for diagnosing technical condition of ship electric power installations [Text] / A. Sandler, V. Budashko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – V. 5. – № 5(119). – P. 25-33. ISSN 1729-3774. Doi: [10.15587/1729-4061.2022.266267](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266267).
76. Sandler, A., Budashko, V., Khniunin, S., Bogach, V. (2023). Improving the mathematical model of a fiber-optic inclinometer for vibration diagnostics of elements in the propulsion system with sliding bearings. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies: Applied physics, 5 (5(125)), 24-31. Doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289773>.
77. Sáez, D. Fuzzy Linear Quadratic Regulator Applied to the Real Time Control of an Inverted Pendulum [Text] / D. Sáez, A. Cipriano // IFAC Proceedings. – 1988. – V. 31, I. 4. – P. 155-160. ISSN 1474-6670. Doi: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)42150-1](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)42150-1).
78. Sørдален, O. J. Optimal thrust allocation for marine vessels [Text] / O.J. Sørдален // Control Engineering Practice. – 1997. – V. 5, I. 9. – P. 1223–1231. Doi: [10.1016/S0967-0661\(97\)84361-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(97)84361-4).
79. Skjetne, R. Adaptive maneuvering, with experiments, for a model ship in a marine control laboratory [Text] / R. Skjetne, T. I. Fossen, P. V. Kokotović // Automatica. – 2005. – V. 41, I. 2. – P. 289-298. ISSN 0005-1098. Doi: [10.1016/j.automatica.2004.10.006](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2004.10.006).

80. Sørensen, A. J. High Performance Thrust Allocation Scheme in Positioning of Ships Based on Power and Torque Control [Text] / A. J. Sørensen, A. K. Ådnanes // Marine Technology Society, Dynamic Positioning Conference: Session 9 Control Systems. – Houston, October 21-22, 1997. – P. 1–17. Режим доступу: \www/ URL: https://www.researchgate.net/publication/255649795_High_Performance_Thrust_Allocation_Scheme_in_Positioning_of_Ships_Based_on_Power_and_Torque_Control. – 13.05.2016 г. – Загол. з екрану.
81. Sukkarieh, S. A high integrity IMU/GPS navigation loop for autonomous land vehicle applications [Text] / S. Sukkarieh, E. M. Nebot and H. F. Durrant-Whyte // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 1999. – V. 15, I. 3. – P. 572-578. Doi: doi.org/10.1109/70.768189.
82. Sun, L. Low speed sensorless control method of brushless DC motor based on pulse high frequency voltage injection [Text] / L. Sun // Alexandria Engineering Journal. – 2022. – V. 61, I. 8. – P. 6457-6463. ISSN 1110-0168. Doi: [10.1016/j.aej.2021.12.005](https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.12.005).
83. Uyar, E. [Text] Dynamic Modelling, Investigation of Manoeuvring Capability and Navigation Control of a Cargo Ship by using Matlab Simulation // E. Uyar, A. T. Alpkaya, L. Mutlu // IFAC-PapersOnLine. – 2016. – V. 49, I. 3. – P. 104-110. ISSN 2405-8963. Doi: [10.1016/j.ifacol.2016.07.018](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.018).
84. Veksler, A. Transient power control in dynamic positioning – governor feedforward and dynamic thrust allocation [Text] / A. Veksler, T. A. Johansen, R. Skjetne // IFAC Proceedings Volumes. – 2012. – V. 45, I. 27. – P. 158-163. Doi: [10.3182/20120919-3-IT-2046.00027](https://doi.org/10.3182/20120919-3-IT-2046.00027).
85. Veksler, Aleksander & Johansen, Tor & Borrelli, Francesco & Realfsen, Bjornar. (2016). Dynamic Positioning With Model Predictive Control. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 24. 1-14. Doi: [10.1109/TCST.2015.2497280](https://doi.org/10.1109/TCST.2015.2497280).

86. Vesali, A. Study on Hydrodynamic Pressure in Grinding Contact Zone Considering Grinding Parameters and Grinding Wheel Specifications [Text] / A. Vesali, T. Tawakoli // *Procedia CIRP*. – 2014. – V. 14. – P. 13–18. Doi:[10.1016/j.procir.2014.03.053](https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.053).
87. Wang, Z. A gain scheduled robust linear quadratic regulator for vehicle direct yaw moment Control [Text] / *Mechatronics* // Z. Wang, U. Montanaro, S. Fallah, A. Sorniotti, B. Lenzo. – 2018. – V. 51. – P. 31-45. ISSN 0957-4158. Doi: [10.1016/j.mechatronics.2018.01.013](https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.01.013).
88. Wua, T.-S. Anti-sway tracking control of tower cranes with delayed uncertainty using a robust adaptive fuzzy control [Text] / T.-S. Wua, M. Karkouba, W.-S. Yub, C.-T. Chena, M.-G. Herc, K.-W. Wua // *Fuzzy Sets and Systems*. – V. 290. – P. 118–137. Doi:[10.1016/j.fss.2015.01.010](https://doi.org/10.1016/j.fss.2015.01.010).
89. Yari, E. Hydrodynamic analysis of the surface-piercing propeller in unsteady open water condition using boundary element method [Text] / E. Yari, H. Ghassemi // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. – 2016. – V. 8, I. 1. – P. 22–37. Doi:[10.1016/j.ijnaoe.2015.09.002](https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2015.09.002).
90. Xiao, H. Quantifying and reducing model-form uncertainties in Reynolds-averaged Navier–Stokes simulations: A data-driven, physics-informed Bayesian approach [Text] / H. Xiao, J.-L. Wu, J.-X. Wang, R. Sun, C.J. Roy // *Journal of Computational Physics*. – 2016. – V. 324. – P. 115–136. Doi:[10.1016/j.jcp.2016.07.038](https://doi.org/10.1016/j.jcp.2016.07.038).
91. Zanchetta, M. Trailer control through vehicle yaw moment control: Theoretical analysis and experimental assessment [Text] / M. Zanchetta, D. Tavernini, A. Sorniotti, P. Gruber, B. Lenzo, A. Ferrara, K. Sannen, J. D. Smet, W. D. Nijs // *Mechatronics*. – 2019. – V. 64. – 102282. ISSN 0957-4158. Doi: [10.1016/j.mechatronics.2019.102282](https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2019.102282).
92. Zerbo, S. G. Linear pencils and quadratic programming problems with a quadratic constraint / S. G. Zerbo, A. Maestriperi, F. M. Pería // *Linear Algebra*

- and its Applications. – 2023. – V. 665. – P. 12-35. ISSN 0024-3795. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.laa.2023.01.029>.
93. Zhong, Y. Diving dynamics identification and motion prediction for marine crafts using field data [Text] / Journal of Ocean Engineering and Science // Y. Zhong, C. Yu, Y. Bai, Z. Zeng, L. Lian. – 2023. ISSN 2468-0133. Doi: [10.1016/j.joes.2023.12.001](https://doi.org/10.1016/j.joes.2023.12.001).
 94. Будашко, В. В. Имплементарный подход при моделировании энергетических процессов динамически позиционирующего судна [Текст] / В. В. Будашко // Електротехніка і Електромеханіка. 2015. №6. – С. 20–25. ISSN 2074-272X. Doi: [10.20998/2074-272X.2015.6.02/50764](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.6.02/50764).
 95. Будашко, В. В. Исследование процессов передачи мощности в комбинированном пропульсивном комплексе при разновекторных нагрузках [Текст] / В. В. Будашко, И. М. Тарасов // Актуальні питання суднової електротехніки і радіотехніки // Матеріали науково-методичної конференції, 11.12.2013 – 12.12.2013. – Одеса: ОНМА, 2014, С. 49–52.
 96. Будашко, В. В. Математическое моделирование всережимных регуляторов оборотов подруливающих устройств судовых энергетических установок комбинированных пропульсивных комплексов [Электронный ресурс] / В. В. Будашко, Е. А. Юшков // Электронное моделирование (Electronic Modeling). – 2015. – V. 37. – №2 (2015). Р. 101–114. – Режим доступа: \www/ URL: <http://www.emodel.org.ua/index.php/ru/44-archive/2015-год/37-2/594-37-2-8.html> . – 13.05.2016 г. – Загл. с экрана.
 97. Будашко, В. В. Моделирование систем управления мощностью и крутящим моментом подруливающих устройств при позиционировании судов [Текст] / В. В. Будашко, Д. А. Гончаренко // Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта (ISDMCI'2014): Материалы международной научной конференции. – Херсон: ХНТУ, 2014. С. 59–61. ISBN 978-966-8912-90-0.

98. Будашко, В. В. Моделирование элементов судовой энергетической установки для исследования режимов работы пропульсивного комплекса [Текст] / В. В. Будашко, І. М. Тарасов // Сучасні проблеми морського транспорту та безпека мореплавства // Матеріали ІІІ Всеукраїнської студентської наукової конференції, м. Херсон, 21 листопада 2013 року). – Херсон: Видавництво ХДМА, 2013, С. 277 – 279.
99. Будашко, В. В. Моделювання електродинамічних процесів в комбінованому пропульсивному комплексі при утриманні позиції [Текст] / В. В. Будашко, Є. О. Юшков // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT–2012) // Збірка матеріалів четвертої Міжнародної науково-практичної конференції у двох томах, т.2. Херсон: ХДМА, 2012, С.10–12.
100. Будашко В. В. Оптимизация управления энергетической установкой типа CRP AZIPOD® [Текст] / В. В. Будашко // Автоматизация судовых технических средств. – 2008. - Вып. 14. – С. 8–12. – Режим доступа: \WWW/ URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/asts_2008_14_4. – 13.05.2023 г. – Загл. с экрана.
101. Будашко, В. В. Физическое моделирование многофункционального пропульсивного комплекса [Текст] / В. В. Будашко, О. А. Онищенко, Е. А. Юшков // Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса). Технічні науки. – 2014. – №. 2. – С. 88–92. Режим доступа: \WWW/ URL: http://zbirnyk.vaodessa.org.ua/images/zbirnyk_2/13.PDF. – 13.05.2016 г. – Загл. с экрана.