

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

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

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПISКА
ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА
на тему:

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ КОМПЕНСАЦІЇ КОЛИВАНЬ
НАВАНТАЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ**

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)

Борса Єгор Вадимович

(підпис, прізвище та ініціали)

Допущений до захисту 10.12.2025
(дата малого захисту)

завідувач кафедри ЕІтаЕ

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

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

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

Рецензент Григорівна Гвоздева
(підпис, прізвище та ініціали)

м. Одеса – 2025 рік

Онлайн сервіс створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

ПРОТОКОЛ

створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 13:25:55 12.12.2025

Назва файлу з підписом: Thesis_Borsa.pdf.p7s

Розмір файлу з підписом: 3.2 МБ

Перевірені файли:

Назва файлу без підпису: Thesis_Borsa.pdf

Розмір файлу без підпису: 3.2 МБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: Борса Єгор Вадимович

П.І.Б.: Борса Єгор Вадимович

Країна: Україна

РНОКПП: 3759307694

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 13:25:44 12.12.2025

Сертифікат виданий: "Дія". Кваліфікований надавач електронних довірчих послуг

Серійний номер: 382367105294AF970400000072E2400068096C04

Тип носія особистого ключа: ЗНКИ криптомодуль ІІТ Гряда-301

Алгоритм підпису: ДСТУ 4145

Тип підпису: Кваліфікований

Тип контейнера: Підпис та дані в одному файлі (CAdES enveloped)

Формат підпису: З повними даними ЦСК для перевірки (CAdES-X Long)

Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2025.08.25 13:00

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1.	Формулювання принципів дослідження, методів управління та основних задач	01.09.25-10.09.25	
2.	Кореляційні процедури характеристик досліджувального судна у відповідності до часткових режимів	11.09.25-20.09.25	
3.	Керування кроком і навантаженням в часткових режимах	21.09.25-30.09.25	
4.	Принципи управління рульовою машиною з інтеграцією підрілюючого пристрою	1.10.25-11.10.25	
5.	Інтеграція управління підрілюючими пристроями із системами вищого рівня	12.10.25-20.10.25	
6.	Аналіз характеристик розподільчих мереж та генеруючих агрегатів	21.10.25-31.10.25	
7.	Аналіз пропульсивних характеристик судна у відповідності до часткових режимів	1.11.25-05.11.25	
8.	Аналіз пререквізитів прогнозованого управління як метода підвищення енергоефективності часткових режимів	06.11.25-09.11.25	
9.	Динамічні властивості судна із азимутальними підрілюючими пристроями, як об'єктів управління	10.11.25-15.11.25	
10.	Лінеаризація моделі маневрування судна	16.11.25-21.11.25	
11.	Лінеаризація моделей сил та моментів азимутального підрілюючого пристрою	22.11.25-27.11.25	
12.	Симуляції роботи підрілюючого пристрою в часткових режимах	28.11.25-01.12.25	
13.	Лінеаризація моделі маневрування судна	02.12.25-10.12.25	

Курсант-дипломник _____
(підпис)

Борса Є. В.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Будашко В. В.
(прізвище та ініціали)

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

Навчально-науковий інститут автоматики та електромеханіки

Кафедра електричної інженерії та електроніки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою ЕІтаЕ

М. Й. Муха

« ____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на атестаційну дипломну роботу

Борси Єгора Вадимовича

Тема випускної атестаційної роботи

"Удосконалення методу компенсації коливань навантаження електричних пропульсивних комплексів"

затверджена наказом ректора академії від 10 грудня 2025 р. № 1503

1. Термін здачі курсантом закінченої роботи до 10.12.2025 р.
2. Вихідні дані до роботи: характеристика пропульсивного комплексу
 - головний двигун (ГД): MAN B&W 5S50ME 5850 kW
 - гвинти: ГРК
 - головні дизель-генератори (ДГ): 1×830 кВт та 2×617кВт;
 - електричні двигуни: 5
 - тунельний підрулюючий пристрій (ПП): 900 кВт
 - аварійний ДГ
3. Дослідницька частина кваліфікаційної роботи за освітньо-професійною програмою Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики спеціальності 271 «Морський та внутрішній водний транспорт» другого (магістерського) рівня вищої освіти:
 - 3.1. Формулювання принципів дослідження, методів управління та основних задач
 - 3.2. Кореляційні процедури характеристик досліджувального судна у відповідності до часткових режимів
 - 3.3. Керування кроком і навантаженням в часткових режимах
 - 3.4. Принципи управління рульовою машиною з інтеграцією підрулюючого пристрою
 - 3.5. Інтеграція управління підрулюючими пристроями із системами вищого рівня
 - 3.6. Аналіз характеристик розподільчих мереж та генеруючих агрегатів
Аналіз системи автоматизації, моніторингу і діагностики
 - 3.7. Аналіз пропульсивних характеристик судна у відповідності до часткових режимів

- 3.8. Аналіз пререквізитів прогнозованого управління як метода підвищення енергоефективності часткових режимів
- 3.9. Динамічні властивості судна із азимутальними підрулюючими пристроями, як об'єктів управління
- 3.10. Лінеаризація моделі маневрування судна
- 3.11. Лінеаризація моделей сил та моментів азимутального підрулюючого пристрою
- 3.12. Симуляції роботи підрулюючого пристрою в часткових режимах
- 3.13. Порівняльний аналіз роботи електростанції під час роботи підрулюючого пристрою в часткових режимах

Реферат

Дипломна робота складається із пояснювальної записки на 75 сторінках і списку літератури зі 73 джерел.

Сучасні суднові енергетичні установки мають забезпечувати високу ефективність і надійність під час роботи в різноманітних умовах експлуатації. Застосування комбінованих пропульсивних комплексів на сучасних судах дає змогу досягати кращої маневреності, економічності та раціонального використання потужності двигунів. У цій роботі розглядаються процеси передавання потужності в електроенергетичній системі судна з комбінованим пропульсивним комплексом, що функціонує в різних режимах. Основна мета роботи полягає у вивченні принципів роботи пропульсивного комплексу та аналізі енергетичних процесів за різних експлуатаційних умов. Метою роботи є дослідження енергетичних процесів у комбінованих пропульсивних комплексах суден. Для досягнення мети необхідно вирішити основні завдання: ознайомитися з теоретичними основами передавання потужності, визначити основні методи розрахунку потужності для конкретного судна, обладнаного комбінованим пропульсивним комплексом та оцінка ефективності енергетичних процесів у різних режимах роботи.

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 (MPC) 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 MPC, 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 75 pages and a list of references from 73 sources.

Modern ship power plants must provide high efficiency and reliability during operation in various operating conditions. The use of combined propulsion complexes on modern ships allows for better maneuverability, economy and rational use of engine power. This work considers the power transmission processes in the electrical power system of a ship with a combined propulsion complex operating in different modes. The main objective of the work is to study the principles of operation of the propulsion complex and analyze energy processes under different operating conditions. The aim of the work is to study energy processes in combined propulsion complexes of ships. To achieve the goal, it is necessary to solve the main tasks: to familiarize yourself with the theoretical foundations of power transmission, to determine the main methods for calculating power for a specific ship equipped with a combined propulsion complex and to assess the efficiency of energy processes in different operating modes.

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.....	5
Abstract.....	7
Зміст	9
Перелік умовних скорочень	11
Список рисунків	11
Список таблиць	16
Вступ	17
Розділ 1. ОСНОВНІ ПРОБЛЕМИ КОМПЕНСАЦІЇ КОЛИВАНЬ НАВАНТАЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ.....	18
1.1. Формулювання принципів дослідження, методів управління та основних задач.....	18
1.2. Кореляційні процедури характеристик досліджувального судна у відповідності до часткових режимів	19
1.2.1. Характеристика головної енергетичної установки та принципів керування рульовими пристроями	20
1.2.2. Аналіз роботи пропульсивного комплексу з гвинтом зі змінним кроком.....	22
1.3. Керування кроком і навантаженням в часткових режимах	24
1.4. Принципи управління рульовою машиною з інтеграцією підрілюючого пристрою	25
1.5. Інтеграція управління підрулюючими пристроями із системами вищого рівня	26
1.6. Аналіз характеристик розподільчих мереж та генеруючих агрегатів	28
1.7. Аналіз системи автоматизації, моніторингу і діагностики.....	32
1.8. Аналіз пропульсивних характеристик судна у відповідності до часткових режимів	34
Розділ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ УПРАВЛІННЯ ПРОПУЛЬСИВНИМ КОМПЛЕКСОМ СУДНА У ВІДПОВІДНОСТІ ДО ЧАСТКОВИХ РЕЖИМІВ	41
2.1 Аналіз пререквізитів прогнозованого управління як метода підвищення енергоефективності часткових режимів	41
2.2 Динамічні властивості судна із азимутальними підрулюючими пристроями, як об'єктів управління.....	46
2.3 Лінеаризація моделі маневрування судна	47
2.4 Лінеаризація моделей сил та моментів азимутального підрулюючого пристрою	49

Розділ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ УПРАВЛІННЯ ПІДРУЛЮЮЧИМИ ПРИСТРОЯМИ В ЧАСТКОВИХ РЕЖИМАХ.....	54
3.1. Симуляції роботи підрулюючого пристрою в часткових режимах	54
3.2. Порівняльний аналіз роботи електростанції під час роботи підрулюючого пристрою в часткових режимах	59
Висновки	66
Список використаних джерел	68

Перелік умовних скорочень

Скорочення, терміни, позначення	Пояснення
<u>ACADO</u>	<i>Automatic Control and Dynamic Optimization</i>
<u>DOF</u>	<i>Degrees of freedom</i>
<u>GNC</u>	<i>Guidance, navigation and control</i>
<u>GitHub</u>	<i>AI-powered developer platform</i>
<u>MCS</u>	<i>Motion Control System</i>
<u>MPC</u>	<i>Model Predictive Control</i>
СУР	Система управління рухом
5S50ME	Тип головного двотактного дизеля <i>MAN B&W</i>
AC-3	Категорія використання AC-3 (пуск і робота асинхронних двигунів змінного струму)
AC-4	Категорія використання AC-4 (часті пуски/реверси двигунів змінного струму)
ACADO	<i>Automatic Control and Dynamic Optimization</i> – бібліотека оптимального керування
AVR	<i>Automatic Voltage Regulator</i> – автоматичний регулятор напруги генератора
CAN	<i>Controller Area Network</i> – промислова шинна мережа CAN
CCU	Cylinder Control Unit – блок керування окремим циліндром ГД
CMMS	<i>Computerized Maintenance Management System</i> – комп'ютеризована система ТО і ремонту
CODATA	<i>Committee on Data for Science and Technology</i> – комітет CODATA (еталонні константи)
CPP	<i>Controllable Pitch Propeller</i> – гребний гвинт зі змінним кроком
CSV	<i>Comma-Separated Values</i> – текстовий формат табличних даних
DC	Direct Current – постійний струм
DCS	<i>Data Collection System</i> – система збирання експлуатаційних даних (<i>IMO DCS</i>)
DG	<i>Diesel Generator</i> - дизель-генератор
DG5V-7	Гідравлічний розподільувач серії DG5V-7 (маркування виробника)
DOL	<i>Direct On Line</i> – прямий пуск електродвигуна
DOF	<i>Degrees of freedom</i>
DP	<i>Dynamic Positioning</i> – система динамічного позиціонування
DPU	<i>Directional Propulsion Unit</i> – азимутальна пропульсивна установка / підрулювач
ECDIS	<i>Electronic Chart Display and Information System</i> – система електронних карт
EEOI	<i>Energy Efficiency Operational Indicator</i> – експлуатаційний індикатор енергоефективності
EICU	<i>Engine Interface and Control Unit</i> – інтерфейсний та керуючий блок ГД
ELFI	<i>Electronic Fuel Injection actuator</i> – електронний (електрогідравлічний) актуатор упорскування палива

Скорочення, терміни, позначення	Пояснення
<i>ELVA</i>	<i>Electronic Exhaust Valve Actuator</i> – електронний актуатор випускного клапана
<i>EMG</i>	<i>Emergency</i> – аварійний режим (<i>EMG-mode</i>)
<i>EMS</i>	<i>Energy Management System</i> – система енергоменеджменту
<i>EOI</i>	<i>End Of Injection</i> – кінець уприскування палива
<i>ERP</i>	<i>Enterprise Resource Planning</i> – корпоративна система планування ресурсів
<i>ESU</i>	<i>Engine Safety Unit</i> – блок безпеки головного двигуна
<i>FOLLOW-UP</i>	Режим керування рулем типу <i>follow-up</i> (по заданому куту)
<i>GNC</i>	<i>Guidance, Navigation and Control</i> – підсистема керування рухом, навігації та стабілізації
<i>GPS</i>	<i>Global Positioning System</i> – супутникова навігаційна система
<i>GitHub</i>	<i>AI-powered developer platform</i>
<i>HDG</i>	<i>Heading</i> – режим утримання курсу
<i>HLAN-16</i>	Гідравлічний сервоциліндр / рульова машина типу <i>HLAN-16</i> (маркування виробника)
<i>HLAN-20</i>	Гідравлічний сервоциліндр / рульова машина типу <i>HLAN-20</i>
<i>HMI</i>	<i>Human-Machine Interface</i> – людино-машинний інтерфейс
<i>HVAC</i>	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i> – система опалення, вентиляції й кондиціонування
<i>IMEP</i>	<i>Indicated Mean Effective Pressure</i> – індикаторний середній ефективний тиск
<i>IMO</i>	<i>International Maritime Organization</i> – Міжнародна морська організація
<i>IP44</i>	<i>Ingress Protection 44</i> – ступінь захисту IP44
<i>ISO</i>	<i>International Organization for Standardization</i> – Міжнародна організація зі стандартизації
<i>ITTC</i>	<i>International Towing Tank Conference</i> – Міжнародна конференція буксирувальних басейнів
<i>J1939</i>	<i>SAE J1939</i> – протокол <i>CAN</i> для двигунів і транспортних засобів
<i>KT-88B3</i>	Тип тунельного підрулюючого пристрою / агрегата <i>KT-88B3</i> (позначення виробника)
<i>KWJ</i>	Серія носових підрулювачів <i>KWJ</i> (типорозмір підрулюючого пристрою)
<i>LOCAL</i>	Локальний режим керування обладнанням
<i>LOS</i>	<i>Line Of Sight</i> – керування по лінії видимості
<i>LS1</i>	<i>Load Shedding 1</i> – перший ступінь автоматичного відключення навантаження
<i>LS2</i>	<i>Load Shedding 2</i> – другий ступінь відключення навантаження
<i>LS3</i>	<i>Load Shedding 3</i> – третій ступінь відключення навантаження
<i>LTU11</i>	Тип телеграфу від Kongsberg – <i>Level Telegraph Unit</i>
<i>MAN</i>	<i>MAN B&W</i> – виробник суднових дизельних двигунів
<i>MCS</i>	<i>Motion Control System</i> – система керування рухом судна
<i>ME</i>	<i>Main Engine</i> – головний двигун серії ME

Скорочення, терміни, позначення	Пояснення
<i>ME-B</i>	Модифікація головних двигунів <i>MAN B&W</i> серії <i>ME-B</i> з електронним керуванням упорскування палива
<i>MOP</i>	<i>Main Operator Panel</i> – основна операторська панель Головного Двигуна
<i>MPC</i>	<i>Model Predictive Control</i> – модельно-прогнозне керування
<i>MRV</i>	<i>Monitoring, Reporting and Verification</i> – система моніторингу, звітності та верифікації (ЄС <i>MRV</i>)
<i>MX</i>	Тип гідравлічної рульової машини / модуля <i>MX</i> (маркування виробника)
<i>NAV</i>	<i>Navigation</i> – навігаційний режим автопілота
<i>NAVIGAT</i>	Торгова назва гірокомпасів серії <i>NAVIGAT</i> (наприклад, <i>NAVIGAT X MK2</i>)
<i>NAVIPILOT4000</i>	Торгова назва суднового автопілота <i>NAVIPILOT 4000</i>
<i>NFU</i>	<i>Non-Follow-Up</i> – режим «безслідного» керування рулем
<i>NMEA</i>	<i>National Marine Electronics Association</i> – морський послідовний протокол <i>NMEA</i>
<i>NTP</i>	<i>Network Time Protocol</i> – протокол синхронізації часу
<i>OPC</i>	<i>Open Platform Communications</i> – промисловий протокол <i>OPC</i>
<i>ORDER</i>	Режим керування рулем за командами автопілота (<i>ORDER-mode</i>)
<i>PF</i>	<i>Power Factor</i> – коефіцієнт потужності
<i>PFC</i>	<i>Power Factor Correction</i> – компенсація реактивної потужності
<i>PID</i>	<i>Proportional-Integral-Derivative</i> – ПІД-регулятор
<i>PITCH</i>	Режим керування кроком гвинта (<i>Pitch-mode</i>)
<i>PMI</i>	<i>Pressure Mean Indication</i> – електронне індикаторування тиску в циліндрах
<i>PMS</i>	<i>Power Management System</i> – система керування судною електростанцією
<i>PT100</i>	Платиновий термометр опору типу <i>Pt100</i>
<i>RAI</i>	<i>Rudder Angle Indicator</i> – індикатор кута руля
<i>ROS</i>	<i>Remote Operator Station</i> – віддалена операторська станція
<i>RPM</i>	<i>Revolutions Per Minute</i> – оберти за хвилину
<i>RPMD</i>	<i>RPM Demand</i> – задана частота обертання двигуна
<i>RPME</i>	<i>RPM Engine</i> – фактична частота обертання двигуна
<i>RS-422</i>	Послідовний інтерфейс стандарту <i>EIA RS-422</i>
<i>RTU</i>	<i>Remote Terminal Unit</i> – віддалений термінальний модуль
<i>RV700-2</i>	Гідравлічний насос/розподілювач типу <i>RV700-2</i> (маркування виробника)
<i>S2-30</i>	Апарат/електродвигун режиму роботи <i>S2</i> , типорозмір 30 (<i>S2-30</i>)
<i>S50ME-B</i>	Тип головного двигуна <i>MAN B&W S50ME-B</i>
<i>SFOC</i>	<i>Specific Fuel Oil Consumption</i> – питомі витрати палива
<i>SOE</i>	<i>Sequence Of Events</i> – журнал послідовності подій
<i>SOI</i>	<i>Start Of Injection</i> – початок упорскування палива
<i>SQP1-8</i>	Електронний модуль / клемний блок типу <i>SQP1-8</i> (маркування виробника)

Скорочення, терміни, позначення	Пояснення
<i>TA</i>	<i>Thruster Allocation</i> – алгоритм розподілу тяги підрулюючих пристроїв
<i>TCP</i>	<i>Transmission Control Protocol</i> – транспортний протокол <i>TCP</i>
<i>THD</i>	<i>Total Harmonic Distortion</i> – коефіцієнт гармонічних спотворень
<i>TRACK</i>	<i>Track Control</i> – режим ведення судна по трасі (траєкторії)
<i>UA</i>	<i>Unified Architecture</i> – складова назви протоколу <i>OPC UA</i> (<i>Unified Architecture</i>)
<i>UPS</i>	<i>Uninterruptible Power Supply</i> – джерело безперебійного живлення
<i>VDR</i>	<i>Voyage Data Recorder</i> – реєстратор рейсових даних
<i>IT</i>	Інформаційні технології (<i>IT</i> -інфраструктура суднових систем)
АВР	Автоматичне введення резерву (автоматичне перемикання живлення на резервне джерело)
АПП	Азимутальний підрулюючий пристрій
ВЧП	Високочастотний / частотний перетворювач живлення електродвигуна
ГД	Головний двигун
ГЕУ	Головна енергетична установка судна
ГРК	Гребний рушійний комплекс
ГРЩ	Головний розподільчий щит
ДГ	Дизель-генератор
ЕЕС	Електроенергетична система судна
ЕСДГ	Аварійна суднова дизель-генераторна установка / аварійна електростанція
КЗ	Коротке замикання
КП	Коефіцієнт потужності
КПД	Коефіцієнт корисної дії
КПК	Комбінований пропульсивний комплекс
НПП	Носовий підрулюючий пристрій
ОПП	Освітньо-професійна програма
ПП	Підрулюючий пристрій
РП	Розподільчий пункт
СУР	Система управління рухом
ЦПУ	Центральний пост управління

Список рисунків

Рис. 1.1 Залежність коефіцієнту тяги до швидкості обертання гвинта	37
Рис. 1.2 Залежність тяги від швидкості руху судна	38
Рис. 1.3 Залежність струму від частоти обертів гребних гвинтів	39
Рис. 1.4 Залежність тяги від обертів гвинта	40
Рис.2.1 Ієрархічна структура суднової автоматизованої системи управління рухом.....	44
Рис. 2.2 Стандартні позначення опису руху судна у відповідності до (2.1) та (2.2).....	47
Рис. 2.3 Положення та кут повороту двигуна i	50
Рис. 3.1 Перехідна характеристика лінеаризації нульового кута	55
Рис. 3.2 Вхідні сигнали лінеаризації нульового кута: a – швидкість обертання; b – кут α	56
Рис. 3.3 Лінеаризація при нульовому куті: a – швидкості руху; b – швидкості дрейфу.....	58
Рис. 3.4 Потужність генераторів у режимі чергування.....	60
Рис. 3.5 Потужність генераторів під час оперування.....	61
Рис. 3.6 Струми генераторів під час непередбачуваного пуску НПП.....	62
Рис. 3.7 Коефіцієнт потужності у режимі чергування	64
Рис. 3.8 Коефіцієнт потужності під час управління підрулюючими пристроями	65

Список таблиць

Таблиця 1.1	Характеристики досліджувального судна	19
Таблиця 1.2	Характеристики генеруючих агрегатів	28
Таблиця 1.3	Характеристики елементів розподільчих мереж.....	31

Вступ

Об'єктом дослідження є процеси передачі потужності в електроенергетичних системах суден з підрулюючими пристроями під час коливання навантаження в часткових експлуатаційних режимах.

Предметом дослідження є підвищення продуктивності із використанням нелінійного прогнозованого керування підрулюючими пристроями судна із зниженням обмеження 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 безпосередньо на судні та на фізичній моделі багатфункціонального пропульсивного комплексу зі змінною структурою, 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.

Розділ 1. ОСНОВНІ ПРОБЛЕМИ КОМПЕНСАЦІЇ КОЛИВАНЬ НАВАНТАЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ

1.1. Формулювання принципів дослідження, методів управління та основних задач

Ціль досліджень є проведення вимірювань коливань навантаження під час пуску та оперування електричною пропульсивною установкою із носовим підрулюючим пристроєм із фіксацією перехідних та усталених процесів у судновій електроенергетичній системі, оцінкою якості електроенергії та динаміки роботи.

Метою є поглиблене дослідження природи та параметрів коливань напруги, частоти, струмів і $\cos \phi$, спричинених роботою носового підрулюючого пристрою (НПП), та розробити й перевірити практичні методи їх компенсації в електроенергетичній системі судна.

Навчально-практичний контекст на борту mv “Jamno”: під час стажування проводилося ознайомлення зі складом і принципами роботи головної енергетичної установки (ГЕУ), інтегрованою системою моніторингу та керування (*K-Chief 600*), системою керування головним двигуном (*Auto-Chief 600*), а також допоміжними електротехнічними системами судна (генераторні установки, щити розподілу, захист, синхронізація, *PMS*) із вимірюванням параметрів ГЕУ в експлуатаційних режимах електричної пропульсивної установки із НПП.

Основні завдання для досягнення мети дослідження:

- ознайомлення зі складом, режимами роботи та структурою ГЕУ та допоміжних систем; дослідження архітектури електроенергетичної системи судна на практиці (генератори, ГРЩ/РП, захисти, синхронізація, *PMS*);

[До змісту](#)

- вивчення системи моніторингу й керування електричною пропульсивною установкою із НПП та інтегрованими інтерфейсами з електроенергетичною системою;
- формулювання програми вимірювань: визначення точки контролю (ГРЩ, секції шин, вводи, лінії живлення НПП), перелік параметрів ($U, f, I, P, Q, S, \cos \varphi$);
- проведення серії експериментів із пуском/зупинкою та зміною тяги НПП в типових суднових режимах (швартові операції, маневрування), фіксація провалів напруги, коефіцієнту потужності та реакції регуляторів (AVR , регулятор палива/частоти) та PMS ;
- обробка результатів: побудова часових діаграм, спектрів, статистичних кривих; визначення амплітуди коливань, тривалості відновлення параметрів, зміни $\cos \varphi$ і навантаження генераторів;
- удосконалення методів компенсації коливань навантаження під час управління електропропульсивним комплексом із НПП.

1.2. Кореляційні процедури характеристик досліджувального судна у відповідності до часткових режимів

Основні характеристики судна наведено у [Таблиця 1.1](#)

Таблиця 1.1
Характеристики досліджувального судна

Тип Судна	Суховантажне судно
Назва	Jamno
Регістр	L.R.S.
Прапор	Багами
Судновласник	KLIO TWO MARITIME LIMITED
Оператор	Poslteam
Верф	Jiangsu Yangzijiang Shipbuilding
Позивний номер	C6CS2
Номер ІМО	9767716
MMSI	311000557
Офіційний номер	7000947
Рік побудови	2018
Валовий тоннаж	22 982 р.т.
Чистий тоннаж	12 741 р.т.

Вантажопідйомність	36 609 т
Довжина	199.99 м
Ширина	24.68 м
Висота борту	15.3 м
Максимальна осадка	11.25 м
Вантажні танки	
Трюм 1	5 485,2 м ³
Трюм 2	8 775,9 м ³
Трюм 3	8 605,3 м ³
Трюм 4	5 971,3 м ³
Трюм 5	8 125,9 м ³
Трюм 6	5 708,4 м ³
Загалом	42 672,0 м ³
Кранове обладнання	3 × 36 т (з грейфером 28 т)
Головний Двигун	
Тип	MAN B&W 5S50ME
Потужність	5850 кВт
Гребний Гвинт	3 регульованим кроком (CPP)
Швидкість	13,5 вузлів
Кількість Циліндрів	5
Система Контролю	Auto-Chief 600
Носовий Підрулювач	
Потужність	900 кВт
Головна електрична установка	
Загальна Потужність	2064 кВт
Генератори	1×830 кВт та 2×617кВт
Аварійний Генератор	166 кВт
Система Автоматизації	
Виробник	Kongsberg Maritime
Модель	K-Chief 600
Тип Судна	Суховантажне судно

1.2.1. Характеристика головної енергетичної установки та принципів керування рульовими пристроями

Головний двигун типу *MAN B&W* серії *ME-B* з електронним керуванням упорскуванням палива та фазуванням випуску (через *EICU* та *CCU*). Двигун пов'язаний з валопроводом і гвинтом зі змінним кроком (*CPP*). Заборонений діапазон обертів 45–56 об/хв проходиться якнайшвидше за спеціальною програмою. У разі перебоїв згоряння в одному циліндрі діють тимчасові обмеження навантаження. Системи двигуна: мащення з фільтрацією та

[До змісту](#)

контролем перепаду тиску, контури охолодження високої та низької температури, пуск пневматичний, аварійні відсічення. Моніторинг і контроль налаштувань, зокрема коефіцієнтів/лімітів тисків (P_{max} , P_{comp} , P_{scav} тощо) та параметрів тактування (кути SOI/EOI), виконуються через операторську панель *MOP* із використанням даних *PMI*. На *MOP* у реальному часі відображаються оберти, навантаження, індекс палива (*Fuel Index*), кути упорскування/випуску, стани електронних актуаторів (*ELFI/ELVA*), тренди температур і тисків, карти лімітів та активні дерейтинги; у межах прав доступу можливі дозволені виробником корекції (тонкі зсуви фаз, індивідуальні паливні трими по циліндрах, параметри рамп навантаження й програм проходження *barred speed range*). Система *PMI* надає поциліндрові значення індикаторного середнього тиску (*IMEP*) і дисбаланс ΔPMI , що використовуються *CCU* для автоматичного балансування подачі палива і захистів по P_{max} . Якщо спостерігається тенденція до перевищення P_{max} або дисбаланс за ΔPMI , *CCU/MOP* обмежують паливний індекс та/або коригують кут SOI ; за потреби *AutoChief* одержує команду на тимчасове зниження кроку *CPP* для утримання параметрів у допустимих межах.

Система дистанційного керування *AutoChief 600* забезпечує судновий телеграф (*LTU11*), керування обертами та кроком гвинта, а також комплекс захистів і програм навантаження. Реалізовано плавне навантаження/розвантаження, швидке проходження заборонених діапазонів, автоматичне зниження кроку при спрацюванні захистів, обмеження прискорення та уповільнення, резервне керування кроком і надійний розподіл командного місця між містком, ЦПУ та локальним постом.

Центральна *HMI*-панель (*MOP, Main/Operator Panel*) у ЦПУ, інтегрована з *EICU/CCU*. Забезпечує повний огляд параметрів згоряння та допоміжних систем, журнали тривоги і трендів, сервісні тести актуаторів і внесення дозволених корекцій. На екранах доступні: *rpm* і навантаження, *Fuel Index* по циліндрах, SOI/EOI , стани *ELFI/ELVA*, $P_{max}/P_{comp}/P_{scav}$, температури

(випуск, охолодження, мастило), витрата та режими циліндрового мащення, карти лімітів і активні дерейтинги. Залежно від ролей/паролів дозволяється коригування індивідуальних паливних тримів, малих зсувів фаз упорскування/випуску, параметрів рамп навантаження й логіки проходження *barred speed range*; усі зміни протоколюються.

Електронна система оцінювання *IMEP (PMI, Pressure Mean Indicated)* для кожного циліндра з прив'язкою до кута колінвала, команд упорскування та тисків наддуву/продувки. Ключові задачі: балансування внеску крутного моменту між циліндрами (мінімізація ΔPMI), підтримка економічності (*SFOC*) через оптимізацію фази згоряння, контроль/обмеження P_{max} , раннє виявлення пропусків згоряння, втрат компресії або негерметичності клапанів, а також ведення трендів для планування ТО (форсунки, клапани, кільця, продувка). Типові ознаки відхилень: нестійкий/низький *PMI* одного циліндра, зростання ΔPMI , підвищення P_{max} за незмінного навантаження (надто ранній *SOI*/закоксована форсунка). Рекомендація: спершу підтверджувати механічний стан, потім доводити параметри керування.

1.2.2. Аналіз роботи пропульсивного комплексу з гвинтом зі змінним кроком

Встановлено гвинт зі змінним кроком виробництва *Kongsberg Maritime* та *Rolls-Royce*. Гідростанція з двома електропомпами (робоча та чергова), функція керування за навантаженням для подачі лише необхідної витрати й тиску, контур підтримання статичного тиску, охолоджувач, фільтри та датчики. Локальна панель має манометри тиску в лініях «на задній хід» і «на передній хід», індикацію статичного тиску, термометр, колектор аварійних клапанів та перемикач дистанційного або місцевого керування. Передбачено процедури калібрування нульового кроку та аварійне керування.

Інтеграція з *Auto-Chief 600* відбувається за допомогою центрального комплексу дистанційного керування головною установкою (*ME*) та гвинтом змінного кроку (*CPP*), що приймає телеграфну команду, формує уставки кроку *CPP* і/або обертів *ME*, контролює перехідні процеси й коригує навантаження за зворотними зв'язками.

Телеграфні рукоятки й панелі розташовані: місток – основний телеграф; крила містка (*port/stbd*) – дубльовані телеграфи; ЦПУ – телеграф/панель керування та індикації; локальний пункт оперування (локал-контроль біля двигуна) – *MAN RPM handle*/місцевий важіль; панель біля *CPP*/валопроводу – локальне керування гвинтом і індикація.

Траса сигналів і вузли *K-Chief/ME-Control*.

Телеграф → *EICU/ESU*. Положення рукояток зчитується модулями *K-Chief* (*DPU*/інтерфейсні плати) подається у напрямку до *EICU* (*Engine Interface/Control Unit*) та формує уставки *RPM/PITCH* або через *ESU DPU 1920* (*Engine Safety Unit*) коли потрібен контроль обмежень/захистів до відправлення команди.

EICU/ESU → *CCU*. Далі команда розповсюджується окремо на кожен *CCU* (*Cylinder Control Unit*) електронно-керованого двигуна *MAN B&W S50ME-B*, що забезпечує індивідуальне керування паливоподачею/таймінгами по циліндрах.

Зворотні зв'язки. До *AutoChief* надходять *RPM* детектори/інкодера валу (шафа *RPMD/RPME*, модулі *DPU 1921/1922*) – фактичні оберти; позиція *CPP* (потенціометр/трансд'юсер); тиски, температури, стани сповільнення/відключення з *ESU*.

Аналогові канали. Уставки та зворотні зв'язки обмінюються по 4-20 мА (*RPM-order*, *Pitch-order*, обмеження моменту), а також по внутрішній шині *K-Chief* (*RS-422/NMEA* для запису у *VDR*).

1.3. Керування кроком і навантаженням в часткових режимах

За положенням телеграфу *AutoChief* обчислює пару уставок: *Pitch* і/або *RPM* з урахуванням карт навантаження *ME*, обмежень *ESU*, швидкості зміни кроку та допустимого крутного моменту. При переходах *Speed–Pitch Coordinator* виконує синхронізацію, щоб уникати перевантаження двигуна (*Torque/Load Control*), даун-регістрацію по температурі вихлопу, тиску наддуву тощо. Для швартових/маневрів доступні «*Harbour/Bridge Wing*» профілі з обмеженням кроку/обертів і швидшою реакцією.

Моніторинг та відображення – *ROS1/ROS2 (Remote Operator Stations)* через *K-Chief 600* показують детальну телеметрію *ME/CP*, тренди, тривоги. *MOP1/MOP2 (Main Operator Panels)* – оперативна індикація у ЦПУ/на містку. *PMI (Propulsion Monitoring Interface)* – зведені параметри пропульсивного комплексу, години напрацювання, лічильники реверсів тощо. Дані дублюються на тренд-принтер (*over-head panel*) і передаються до *VDR* по *RS-422/NMEA*.

Захисти та міжблокування. *ESU* здійснює *slow-down/shut-down* за критичними параметрами, обмежує уставки *AutoChief* та формує тривоги. Міжблокування реверсу: реверс дозволяється лише при нульовому кроку *CPP* і безпечних обертах/тиску. *Emergency-stop* на крилах/містку/локально відключає паливоподачу та блокує команди у системі.

Живлення та резервування. Ланцюги керування живляться від *24V DC UPS* (шафа батарей/*UPS* на містку/у ЦПУ) з контролем запобіжників і наявності живлення. При втраті зв'язку *AutoChief* переходить у *fail-safe*: відпуск кроку до нейтралі, стабілізація обертів/зупинка згідно з політикою *ESU*; доступне *LOCAL* керування.

1.4. Принципи управління рульовою машиною з інтеграцією підрілюючого пристрою

Електрогідравлічна рульова машина *Rolls-Royce RV700-2* з двома насосно-моторними агрегатами (два незалежні електроприводи насосів) та повним електричним комплектом керування/захисту. У складі: пускачі двигунів: *DOL* (прямий пуск) і «зірка-трикутник» (знижений пусковий струм) – залежно від сценарію роботи/перебігу маневрів. Захист і нагляд: автоматичні вимикачі, теплові реле/стречки перевантаження, контроль фаз, промислова сигналізація від перегріву обмоток, обігрівачі 240 В для антикондесату. Зворотні зв'язки: два незалежні блоки фідбеку (датчики кута руля з кінцевими вимикачами) для дублювання каналу положення й аварійного обмеження ходу.

Індикація/повідомлення: система індикації кута руля (*RAI*) на містку та в ЦПУ (центральному посту управління), панелі керування/тривоги, повторні лампи станів насосів/тиску/режимів.

Інтерфейси: видача/прийом керуючих і діагностичних сигналів на місток, ЦПУ, *VDR* по *RS-422 (NMEA)*; прийом команд від автопілота (*FOLLOW-UP/ORDER*).

Гідравліка (узагальнено): два незалежні насосні контури з розподільчою арматурою і байпасом, лінії тиску/зливу з фільтрами, охолодження масла (водяний/повітряний теплообмінник – залежно від комплектації), рівнеміри/сигналізатори рівня й температури, зворотні клапани та запобіжні клапани обмеження тиску.

Режими керування: *FU (follow-up)*: пропорційне керування за заданим кутом; *NFU (non-follow-up)*: тактове/джойстикове керування з фіксацією напрямку; *Local/EMG*: локальне керування з шафи рульової з обходом містка на випадок відмови верхнього рівня.

1.5. Інтеграція управління підрулюючими пристроями із системами вищого рівня

Ланцюг сигналів: джерело курсу → автопілот → модуль керування рульової → силові пускачі → насосні агрегати → гідроциліндри руля → датчики кута (фідбек) → індикація/аварійні.

VDR (RS-422/NMEA): передача курсу, відданого кута, фактичного кута, статусів режимів/алармів (за наявних каналів на судні).

Резервування: два незалежні мотор-насосні агрегати дозволяють зберегти керованість при відмові одного каналу; окремі живильні лінії/запобіжники; дубльований фідбек. Підчас маневрів допускається робота двома насосами для збільшення швидкості перекладки руля; у звичайному переході здебільшого працює один насос (енергоефективність і ресурс).

Рульова машина інтегрована з автопілотом *NAVPILOT4000* та отримує опорний курс від гірокомпаса *NAVIGAT MX*. Автопілот працює в режимах утримання курсу (*AUTO/HDG*), повороту із заданою кутовою швидкістю чи радіусом, а також у навігаційних режимах *NAV/TRACK* із використанням навігаційних даних; система є самоналаштовною (адаптивне керування) і має інтерфейси *RS-422/NMEA* для підключення до датчиків/навігації та *VDR*.

Автопілот *NAVPILOT4000 (Sperry Marine)*. Режими: утримання курсу, контроль повороту за *rate* або *radius*, *NAV/TRACK* з джерел *GPS/ECDIS*; наявна межа перекладання руля (*rudder limit*).

Адаптивність: повністю самоналаштовне, адаптивне керування для різних станів завантаження та погоди.

Інтерфейси: пряме підключення *RS-422* до зовнішніх джерел курсу/навігації; два резервні аналогові виходи (пропорційний наказ/похибка руля) для сумісності з рульовою гідравлікою.

Компоновка і характеристики тунельного підрулюючого пристрою *Kawasaki-KWJ KT-88B3* типу *CPP* з моторною рамою: діаметр гвинта 1650 мм

[До змісту](#)

(чотири лопаті), розрахункова тяга близько 127 кН, швидкість гвинта 416 об/хв, вхідна швидкість 1160 об/хв, вхідна потужність 900 кВт. Напрямок обертання вхідного валу – проти годинникової стрілки, позиція лопатей – портова.

Головний електродвигун *Marelli Motori*, 3~ 440 В, 60 Гц, вертикальний, *IP44*, режим *S2-30* хв; автотрансформаторний пуск (Y-Δ) із обмеженням пускового струму не більше 2250 А; встановлено шість датчиків *PT100* (по два на фазу) з порогамі «*Alarm/Stop*» та обігрів статорів 220 В.

Гідропривід зміни кроку складається з насоса лопатевого типу *SQP1-8* із подачею 31 л/хв при тиску 4,5 МПа; приводний двигун 5,5 кВт, 440 В, 60 Гц; електромагнітні клапани *DG5V-7* (24 В DC), прес-вимикачі 0,40/0,34 МПа для тривоги/інтерлоків; гравітаційний бак 50 л з аварійним рівнем 20 л; фільтр 80 мкм. Умови пуску: нормальний рівень у баку, наявність тиску керування, нейтральний кут лопатей ($0^\circ \pm 3^\circ$).

Електроживлення та інтерфейси. Стартер підрулюючого пристрою закритого виконання *IP44*, з власним колом керування маслонасосом, виводом тривоги у ЦПУ та узгодженням із *PMS* через сигнали «*Power request/Power available*» для коректного підхоплення навантаження генераторами. Підрулюючий пристрій розташований у *Bow Thruster Room*. На його щиті розподілу встановлено два вакуумні вимикачі-роз'єднувачі *HIAN-20* та *HIAN-16*: *HIAN-20* розрахований на номінальний струм до ≈ 2000 А, *HIAN-16* – до ≈ 1600 А; робоча напруга класу низької/підвищеної напруги 440-690 В, 50/60 Гц; категорія застосування для двигунів *AC-3/AC-4*; комутаційний ресурс не менше десятків тисяч операцій; термічна стійкість (1 с) типово 30-50 кА, ударна – до 65-100 кА; електропривід 110/220 В DC з місцевим і дистанційним керуванням, індикацією положення та допоміжними контактами; вбудовані розчеплювачі мінімальної напруги/миттєвого КЗ, механічні й електричні блокування з колами пуску насоса *CPP* і *PMS*; ступінь захисту шаф *IP44*.

1.6. Аналіз характеристик розподільчих мереж та генеруючих агрегатів

Таблиця 1.2
Характеристики генеруючих агрегатів

СПЕЦИФІКАЦІЯ ГЕНЕРАТОРА				
Використання	Дизельгенератор	Кількість	1	
Тип Корпусу	IP23	Клас	LR	
Система охолодження	Повітря-повітря	Середня температура	45°C	
Система збудження	Самозбудження	Клас ізоляції	F	
Метод зчеплення	Пряме	Клас температури	F	
Специфікація		Підшипник		
Тип	HFC6 508-14K	Тип	Втулковий	
Вихідна потужність	1038 кВА	Розташування	Привідний кінець	Не привідний кінець
Напруга	450 В	Розміри	-	PH125×L150
Струм	1331.8 А	Кількість масла	-	4.1 л
Частота	60 Гц	Система змащення	-	Самозмащення
Полюси	10	Марка мастила	ISO VG 32	
Швидкість	720 об/хв	Система виявлення		
Коефіцієнт Потужності	0.8	Температура обмоток	PT100 OHM × 2EA/фаза	
GD^2/J	267.2 кг.м ² / 66.8 кг.м ²	Фільтр	Від постачальника	
Вага Ротора	1913 кг	Температура підшипників	Стрижневий термометр та PT100	
Загальна Вага	4.4 т			
Характеристика				
Перевантаження по струму	150% / 2 хв			
Похибка напруги	± 2%			
Перевищення по Швидкості	120 % / 2 хв			
Налаштування напруги	± 5%			
Спосіб монтажу	B16			
Ефективність: 93.9% при КП=0.8 Ефективність: 95.9% при КП=1.0				
Реактивність та постійні часу				
X_d : 252% (не збуджений)	T_d : 0.0857 с			
X_d' : 20.87% (збуджений)	T_d' : 0.0026 с			
X_d'' : 12.2% (збуджений)	T_d : 0.0027 с			

[До змісту](#)

RA: 1.3%				
Струм К.З.	6092 А			
СПЕЦИФІКАЦІЯ ГЕНЕРАТОРА				
Використання	Дизельгенератор	Кількість	2	
Тип Корпусу	IP23	Клас	LR	
Система охолодження	Повітря-повітря	Середня температура	45°C	
Система збудження	Самозбудження	Клас ізоляції	F	
Метод зчеплення	Пряме	Клас температури	F	
Специфікація		Підшипник		
Тип	HFC6 504-14K	Тип	Втулковий	
Вихідна потужність	771 кВА	Розташування	Привідний кінець	Не привідний кінець
Напруга	450 В	Розміри	-	PH125×L120
Струм	989.2 А	Кількість масла	-	2.3 л
Частота	60 Гц	Система змащення	-	Самозмащення
Полюси	10	Марка мастила	ISO VG 32	
Швидкість	720 об/хв	Система виявлення		
Коефіцієнт Потужності	0.8	Температура обмоток	PT100 OHM × 2EA/фаза	
GD²/J	206.8 кг.м² / 51.7 кг.м²	Фільтр	Від постачальника	
Вага Ротора	1548 кг	Температура підшипників	Стрижневий термометр та PT100	
Загальна Вага	3.82 т			
Характеристика				
Перевантаження по Струму	150% / 2 хв			
Похибка напруги	± 2%			
Перевищення по Швидкості	120 % / 2 хв			
Налаштування напруги	± 5%			
Спосіб монтажу	B16			
Ефективність: 93.9% при КП=0.8				
Ефективність: 95.9% при КП=1.0				
Реактивність та постійні часу				
X _d : 338% (не збуджений)	T _d : 0.1253с			
X' _d : 23.2% (збуджений)	T' _d : 0.0036 с			
X'' _d : 14.2% (збуджений)	T _a : 0.0327 с			
RA: 1.22%				
Струм К.З.	4950 А			

Головні шини змінного струму напругою ~ 440 В, 60 Гц секціоновані на окремі поля з шиноз'єднувачем (*bus-tie*) та міжзамиканнями для безпечного поділу/об'єднання секцій. На секціях встановлено пристрої синхронізації: синхроскоп, перевірку синхронізму, контроль послідовності фаз, різниці напруги та частоти, функції *dead-bus* і *live-bus* вмикання. Передбачена панель берегового живлення з блокуванням від паралельної роботи з бортовими ДГ без синхронізації.

Працює система керування електростанцією (PMS), що автоматично запускає/зупиняє дизель-генератори залежно від навантаження та заданої обертової резервної потужності (*spinning reserve*), із підвищеними вимогами на час маневрів (швартування, робота *bow thruster*); виконує розподіл активної потужності (*kW-sharing*) у режимі ізохронного/дріб-керування та розподіл реактивної потужності (*kVar-sharing*) через реактивний дріб AVR (*V/Hz*-контур, збудження), підтримуючи заданий коефіцієнт потужності шин; прогнозує великі крокові навантаження (насоси, лебідки, компресори, ВЧП/частотні приводи, *bow thruster*) і попередньо вводить у паралель додатковий ДГ; реалізує ступеневе відключення другорядних споживачів (*load-shedding*) за пріоритетами *LS1/LS2/LS3* (наприклад: кондиціонування/чилери, камбуз, частина вентиляції, допоміжні насоси), з автоматичним відновленням після нормалізації частоти/напруги; виконує антиблекаутні дії: швидке підхоплення частоти, блокування нових великих пусків, команду на запуск резервного ДГ, а у випадку відмови – передає сигнал на аварійну електростанцію (ЕСДГ) з автоматичним введенням АВР на аварійний ГРЩ для живлення навігації, аварійного освітлення, керма, пожежних/льодових насосів тощо.

На головному розподільчому щиті (ГРЩ) встановлено прилади контролю ізоляції (IT-мережа 440 В): безперервний нагляд за опором ізоляції по секціях, тривоги першої земної несправності та інструменти локалізації витоку (ізоляційні монітори/локатори кіл). Система вимірює якість

[До змісту](#)

електроенергії (*THD*, перекоси фаз, флікер) і веде тренди у *K-Chief/PMS*, що дозволяє вчасно виявляти проблеми.

Таблиця 1.3
Характеристики елементів розподільчих мереж

	Система	Потужність, КП, струм	Кабель / рамка	Номінальний струм	Тип вимикача	Уставки
ДГ1	АС450В 3Ф 60Гц	830 кВт, 0.8 КП, 1331.8 А	7×3с 95 мм ² / 1600 А	1336 А	АН-16D3-16	<i>Long: 1.1 In, 30 s; Short: 2.5 In, 400 ms; Inst: 8 In</i>
ДГ2	АС450В 3Ф 60Гц	617 кВт, 0.8 Кп, 989.2 А	5×3с 95 мм ² / 1250 А	994 А	АН-13D3-13	<i>Long: 1.1 In, 30 s; Short: 2.5 In, 400 ms; Inst: 8 In</i>
ДГ3	АС450В 3Ф 60Гц	617 кВт, 0.8 Кп, 989.2 А	5×3с 95 мм ² / 1250 А	994 А	АН-13D3-13	<i>Long: 1.1 In, 30 s; Short: 2.5 In, 400 ms; Inst: 8 In</i>
СВ	АС450В 3Ф 60Гц	-	-	2500 А	ОТ2500Е12Р	-
НП	АС450В 3Ф 60Гц	-	7×3с 95 мм ² / 1600 А	1480 А	АН-16D3-16	<i>Long: OFF; Short: 2.5 In, 100 ms; Inst: 8 In</i>

Схеми вимірювання та індикації включають багатофункціональні аналізатори (*U*, *I*, кВт, кВАр, КП, Гц), окремі лічильники по фідерах, індикацію стану вимикачів/шиноз'єднувачів, сигналізацію міжблокувань і журнал подій/трендів у *K-Chief*. Передбачено логіку міжзамикань для запобігання помилковому паралелюванню секцій, неправильній послідовності фаз і зворотним потокам потужності (*reverse power*).

Живлення допоміжних мереж організовано через трансформатори 440/220-230 В для службових і освітлювальних систем, окремі *UPS* 230 В/24 В *DC* для автоматики/навігації, а також блоки постійного струму (акумуляторні

шафи) для пуску ДГ, аварійного освітлення та контролерів. На період робіт/маневрів передбачені режими підвищеної готовності *PMS* (жорсткіший *PF*-контроль, більший *spinning reserve*, заборона великих пусків без підтвердження оператора).

Секціонована 440 В/60 Гц мережа із синхронізацією, автоматизованим розподілом *kW/kVar*, прогнозним запуском ДГ, ступеневим *load-shedding* та глибокою селективністю захистів забезпечує сталість частоти й напруги під час маневрів, енергоефективність у рейсі та високу живучість при відмовах або коротких замиканнях.

1.7. Аналіз системи автоматизації, моніторингу і діагностики

Центральна інтегрована система автоматизації та сигналізації судна забезпечує збір і уніфікацію даних від пропульсивного комплексу (*ME/CP*, *AutoChief*), електростанції (*PMS*, ДГ, ГРЩ), підрулюючих пристроїв, систем умовного (станового) моніторингу, а також допоміжних контурів (мащення, охолодження, паливо, баласт, *HVAC*, котли тощо). Дані аналізуються в реальному часі, формуються архіви, тренди та тривоги; стандартно архів зберігається протягом 7 діб на бортовому сервері з можливістю експорту на берег для довготривалого зберігання й аналізу.

Децентралізована структура з польовими контролерами/віддаленими *I/O* (*AI/DI/AO/DO*), *HMI*-станціями у ЦПУ та на містку, і дубльованою мережевою інфраструктурою (основна/резервна шина даних). Підтримуються промислові інтерфейси та протоколи (*Modbus TCP/RTU*, *Profibus/Profinet*, *CAN/J1939* для ДГ, *OPC UA* для обміну з *PMS/EMS/VDR*), а також прямі аналогові/дискретні входи для критичних датчиків. Передбачено часову синхронізацію (*NTP/GPS*) для коректного штампування подій.

Єдині мнемосхеми для *EEC*, ГЕУ, підрулюючих пристроїв, паливоподавання, систем охолодження й мащення, баласту тощо. Оператори бачать живі значення, статуси засувки/насосів/вимикачів, тренди та історію тривоги. Підтримується швидке масштабування трендів (швидкі буфери до 100-200 мс для діагностики, стандартні знімки 1-5 с), накладання кількох каналів, курсори, експорт у *CSV/Excel* для інженерного аналізу.

Реалізовано філософію тривоги із групуванням за системами та пріоритетами (*Alarm A/B/C*), *SOE*-журнал (*Sequence of Events*) з мілісекундною роздільністю для ключових сигналів, функції *shelving/inhibit* (тимчасове приглушення/блокування з документуванням причин), затримки відсічення та підтвердження оператором (*acknowledge*). Ведеться журнал змін (*audit trail*) усіх операторських дій і налаштувань.

Інтеграція з керуючими системами. З *PMS*/ГРЩ: моніторинг кВт/кВАр, частоти/напруги, стану вимикачів, шиноз'єднувачів, автоматизоване відображення схем синхронізації та *load-shedding* подій. З умовним моніторингом: знос підшипників, водонасичення оливи, вібрації, температури – з порогамі попередження/аварії та порадами дій. З валовим тензо/оптичним торк-метром: крутний момент, оберти, потужність, КПД тракту, питомі витрати. Звітність і відповідність вимогам. Система підтримує підготовку формалізованих звітів для класифікаційного товариства та судновласника (журнали тривоги/подій, запусків/зупинок механізмів, параметри електростанції, профілі навантаження, технічні випробування). Доступні шаблони добових/рейсових звітів (у т.ч. дані для екологічної звітності – витрата палива, *EEOI/IMO DCS/MRV* при наявності відповідних модулів). Експорт здійснюється у *PDF/CSV*, а також у формати, погоджені з компанійними *ERP/CMMS*.

Надійність та безпека. Рольова модель доступу (оператор/інженер/супервізор), паролі, політики зміни параметрів лише в межах дозволів виробника та внутрішніх процедур. Резервування серверів/*HMI*, гаряче переключення на резервну мережу, діагностика відмов

вузлів і ліній зв'язку. Підтримуються кіберзахисні практики (білий список вузлів, журнали доступу, сегментація мережі).

1.8. Аналіз пропульсивних характеристик судна у відповідності до часткових режимів

На основі відомих методик [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10], використовуючи інформацію з відкритих джерел для однотипного судна *Bourbon Oa–Bourbon Orca* [11, 12, 13, 14, 15]:

- діаметр гвинта $D = 3.6$ м;
- тяга на кнехті (на бочці) $BP = 183$ тс;
- максимальна швидкість $V_s = 17$ вузлів $= 8.745548$ м/с;
- кількість головних гвинтів $N_{\text{гвинт}} = 2$;
- $\rho = 1025$ кг/м³ – середнє значення для солоности 35‰ і температури ≈ 15 °С (умови стандартної морської води за ISO 80000 та ITTC [15])

- $g = 9.80665$ м/с² – прийнятий стандарт (World Geodetic System, ISO 80000-3, CODATA) [19-22].

Переведення тяги НПП в Ньютони [16, 17, 17, 18]:

$$T_{\text{загальний}} = 183 \text{ тс} \cdot 1000 \frac{\text{кг}}{\text{т}} \cdot g = 1794616.95 \text{ Н}$$

Тяга на один гвинт:

$$T_1 = \frac{T_{\text{загальний}}}{2} = \frac{1794616.95}{2} = 897308.475 \text{ Н}$$

Коефіцієнт тяги K_{T0} при $J = 0$:

$$T = \rho n^2 D^4 K_T \Rightarrow K_{T0} = \frac{T_1}{\rho n^2 D^4}$$

$$\text{Де } n = \frac{\text{об}}{\text{с}}, n = \frac{rpm}{60}$$

[До змісту](#)

$$K_{T0}(rpm) = \frac{T_1}{\rho \left(\frac{rpm}{60}\right)^2 D^4} = \frac{T_1 \cdot 60^2}{\rho D^4} \cdot \frac{1}{rpm}$$

Обчислення константи:

$$\frac{T_1 \cdot 60^2}{\rho D^4} = \frac{897308.475 \cdot 3600}{1025 \cdot 167.9616} = 18763.350961$$

Отже:

$$K_{T0}(rpm) = \frac{18763.350961}{rpm}$$

Обраховуємо для різних rpm :

$$K_{T0}(150) = \frac{18763.350961}{150} = 0.83393$$

$$K_{T0}(160) = \frac{18763.350961}{160} = 0.73294$$

$$K_{T0}(170) = \frac{18763.350961}{170} = 0.64925$$

$$K_{T0}(180) = \frac{18763.350961}{180} = 0.57912$$

$$K_{T0}(190) = \frac{18763.350961}{190} = 0.51976$$

Виконуючи розрахунки за відомими методиками [23, 24, 25, 26, 29, 30, 31], отримуємо результати, які представлені на рис. 1, 2, 3 та 4, відповідно: залежність коефіцієнту тяги до швидкості обертання гвинта НПП, залежність тяги від швидкості руху судна, залежність струму від частоти обертів гребних гвинтів, залежність тяги від обертів гвинта.

Підчас проведення експериментальних досліджень на борту судна *mv «Jatno»* зафіксовано, що під час маневрів, насамперед швартувань у портах, активно використовується носовий підрулюючий пристрій (НПП). Типовий часовий профіль такий: сумарний інтервал роботи НПП підчас маневрів сягає до 2 годин, з яких приблизно від 5-10 хв. до 30 хв. припадає власне на оперування (створення тяги, реверси, утримання курсу біля причалу). Решту

часу підрулюючий пристрій перебуває у режимі чергування: електродвигун обертається без навантаження (лопаті *СРР* у нейтралі), гідросистема підтримує готовність.

У фазі активного оперування фіксується повторюваний цикл короткочасних імпульсів тяги з частими змінами напрямку (*port/starboard*) та амплітуди кроку.

Типовий сценарій: серії команд з тривалістю 1-2 хв. та паузами такого самого інтервалу.

На рис. 1-4 представлені пропульсивні характеристики судна, отримані під час попередніх експериментальних досліджень часткових режимів роботи судна, які необхідно було виконати для обґрунтування та опису методології застосування методів управління пропульсивними комплексами для морських суден з підрулюючими пристроями, які використовуються як основні в системах управління рухом.

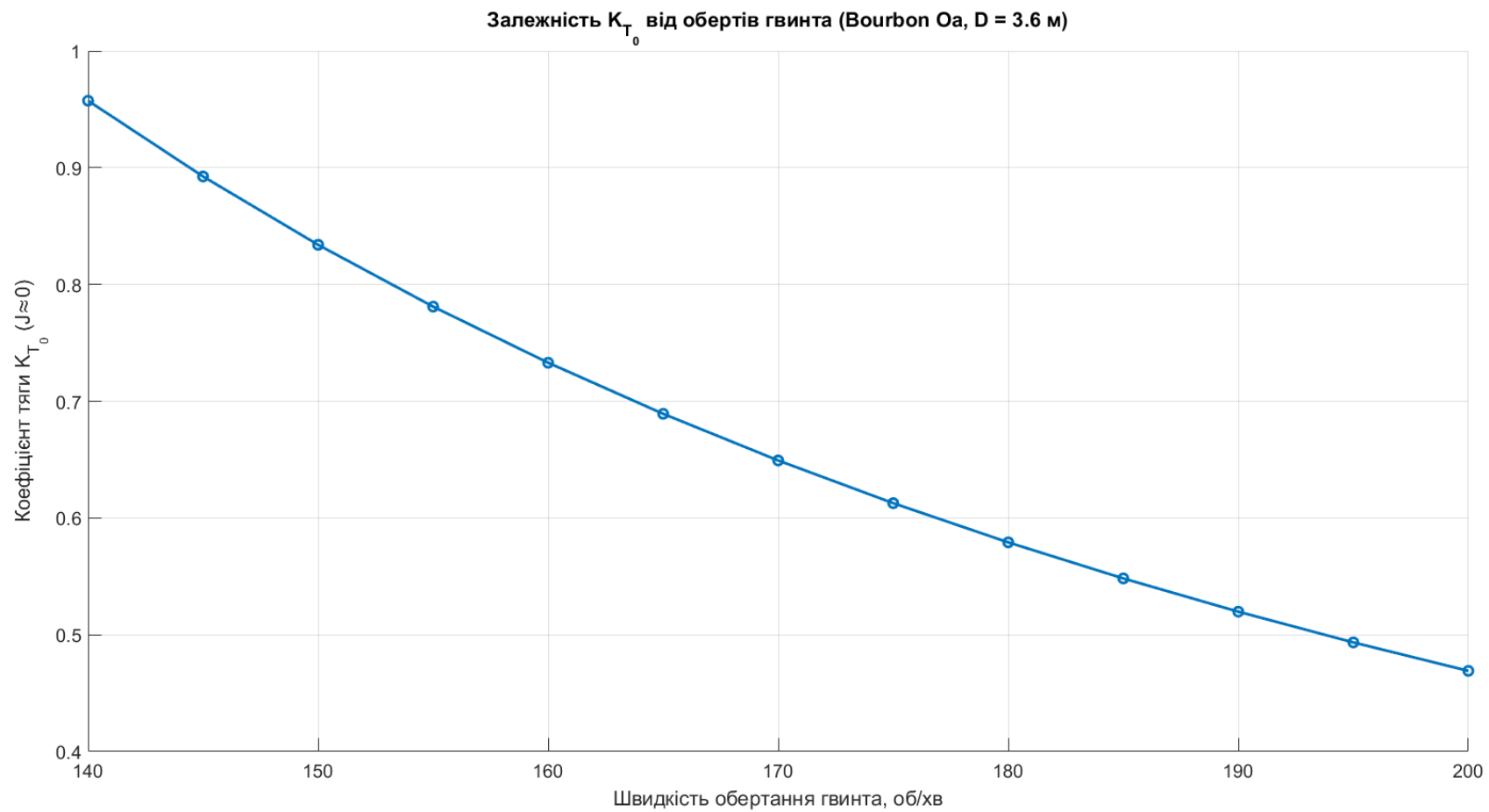


Рис. 1.1 Залежність коефіцієнту тяги до швидкості обертання гвинта

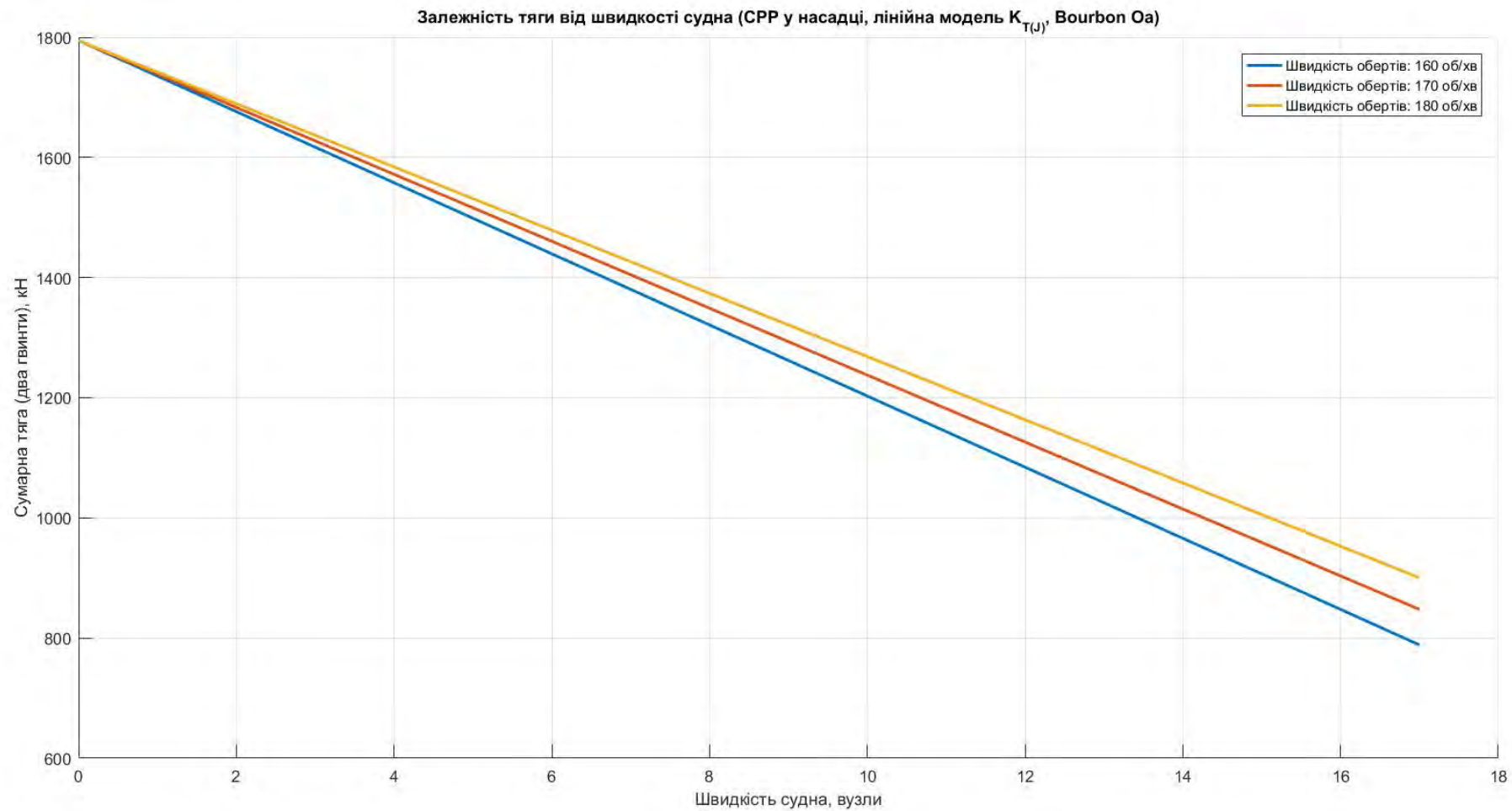


Рис. 1.2 Залежність тяги від швидкості руху судна

[До змісту](#)

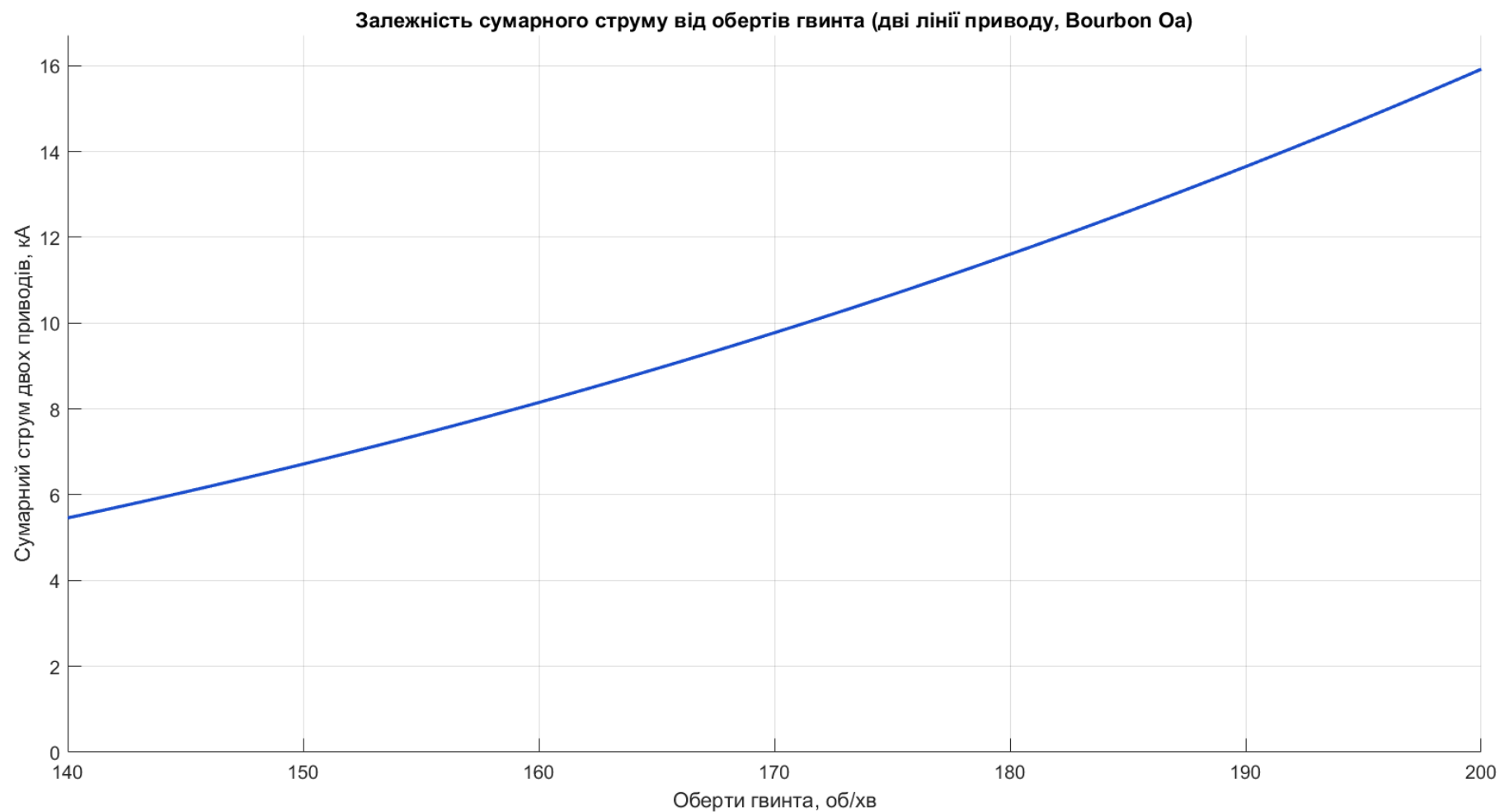


Рис. 1.3 Залежність струму від частоти обертів гребних гвинтів

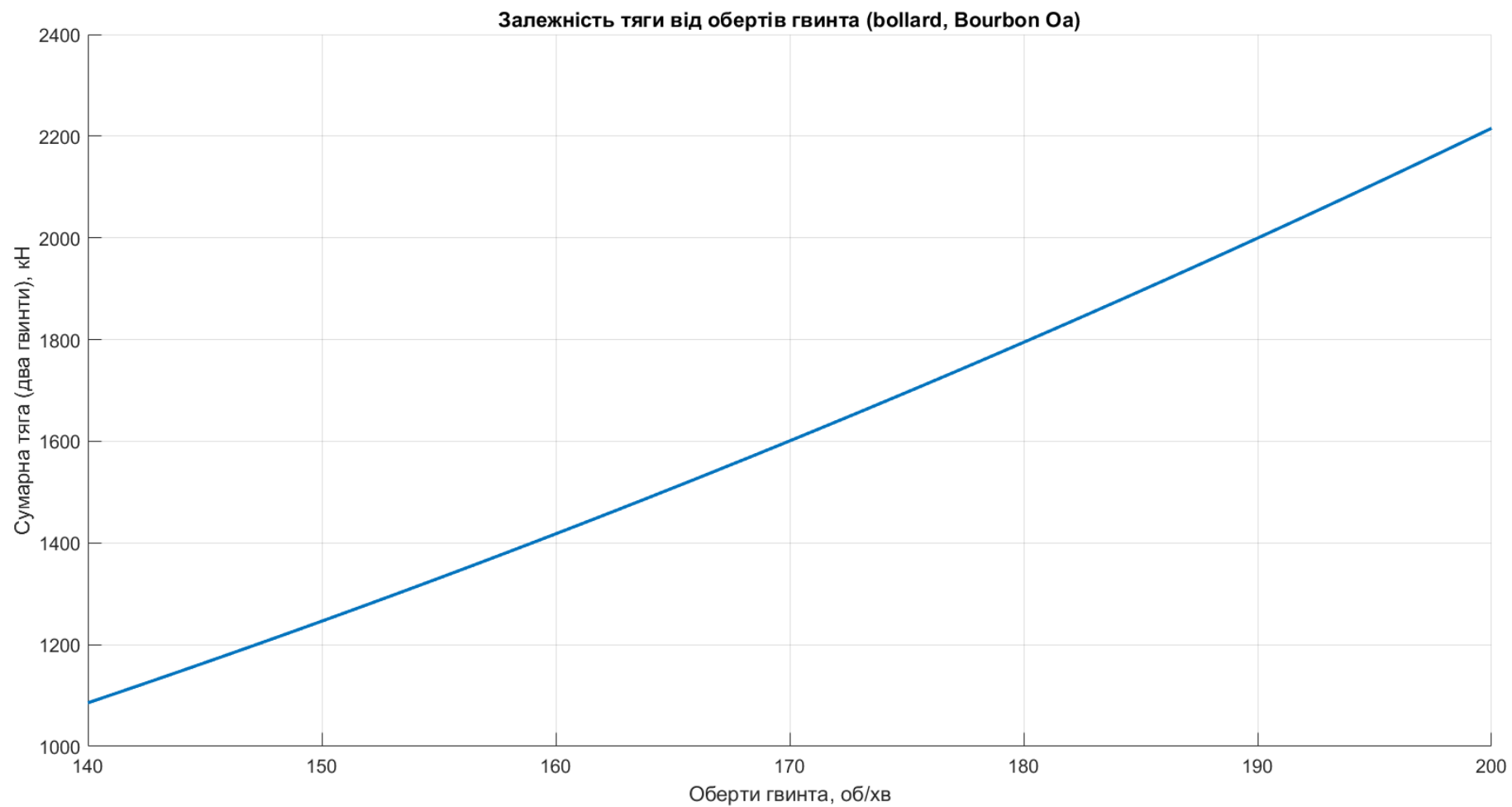


Рис. 1.4 Залежність тяги від обертів гвинта

[До змісту](#)

Розділ 2. ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДУ УПРАВЛІННЯ ПРОПУЛЬСИВНИМ КОМПЛЕКСОМ СУДНА У ВІДПОВІДНОСТІ ДО ЧАСТКОВИХ РЕЖИМІВ

2.1 Аналіз пререквізитів прогнозованого управління як метода підвищення енергоефективності часткових режимів

У розділі обґрунтовується та описується методологія застосування нелінійного прогнозованого управління (англ. [*Model Predictive Control*](#) – MPC) КПК морських суден з підрулючими пристроями, які використовуються як основа в системах управління рухом. У [30, 48] наводяться результати останніх досліджень у галузі гідродинаміки, навігації та систем управління морськими суднами. 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 [51].

Найновіші інструменти для аналізу та проектування передових систем навігації (англ. [*Guidance, navigation and control*](#) – GNC) наведено у [38] 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 демонструють методи застосувати моделювання та керування дизайном щодо

власних проєктів;

- 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*) [1, 30], які використовуються для утримання судна або бурової установки в нерухомому стані в горизонтальній площині або рухатися з низькою постійною швидкістю, використовуючи лише наявні підрулюючі 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 [48].

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* [49, 69]. 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 [34], 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 рух. Цей метод відомий як роз'єднане управління [30, 30, 31, 32, 33, 33, 34]. 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.2.1](#) показано огляд загальної системної ієрархії для автоматизованих суден.

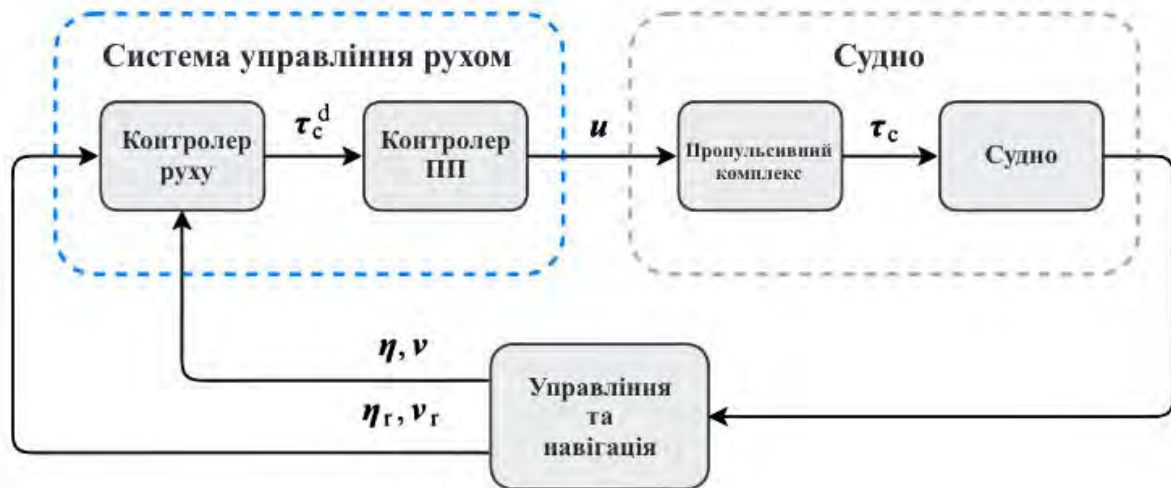


Рис.2.1 Ієрархічна структура суднової автоматизованої системи управління рухом

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

[До змісту](#)

вирішальне значення для точного керування рухом. Це завдання стає все більш 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 прогнозного 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 [44, 45] з проблемою оптимізації, вирішеною у [54]. Для онлайн-розв'язувача був згенерований код [63],

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

2.2 Динамічні властивості судна із азимутальними підрулюючими пристроями, як об'єктів управління

Для визначення положення, орієнтації та швидкості руху судна потрібні відповідні системи координат. Це рухома та нерухома системи координат, які визначені у рівняннях (2.1) та (2.2). Найбільш поширене уявлення для нерухомої системи координат базується на корпусній симетрії навколо X_bZ_b -площини, приблизної симетрії навколо Y_bZ_b -площини та проєкції на Z_b -вісь відносно поверхні води, як показано на [Рис. 2.2](#). Інерційна (нерухома) система координат використовується для опису положення та орієнтації судна в глобальних координатах та кутах Ейлера, як $[x \ y \ z]^T$ та $[\phi \ \theta \ \psi]^T$, відповідно. Рухома система координат 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. Рух судна можна описати шістьма ступенями свободи, які поділяються на дві категорії: поступальний рух у трьох напрямках: поздовжнє переміщення (сплеск), поперечне переміщення (дрейф) і вертикальне переміщення (підйом), а також обертальний рух навколо трьох осей: бортова хитавиця (крен), кільова хитавиця (тангаж) та нишпорення. Це стандартні позначення, які використовується при моделюванні морських суден [\[40, 42, 44, 44, 45, 45, 47\]](#).

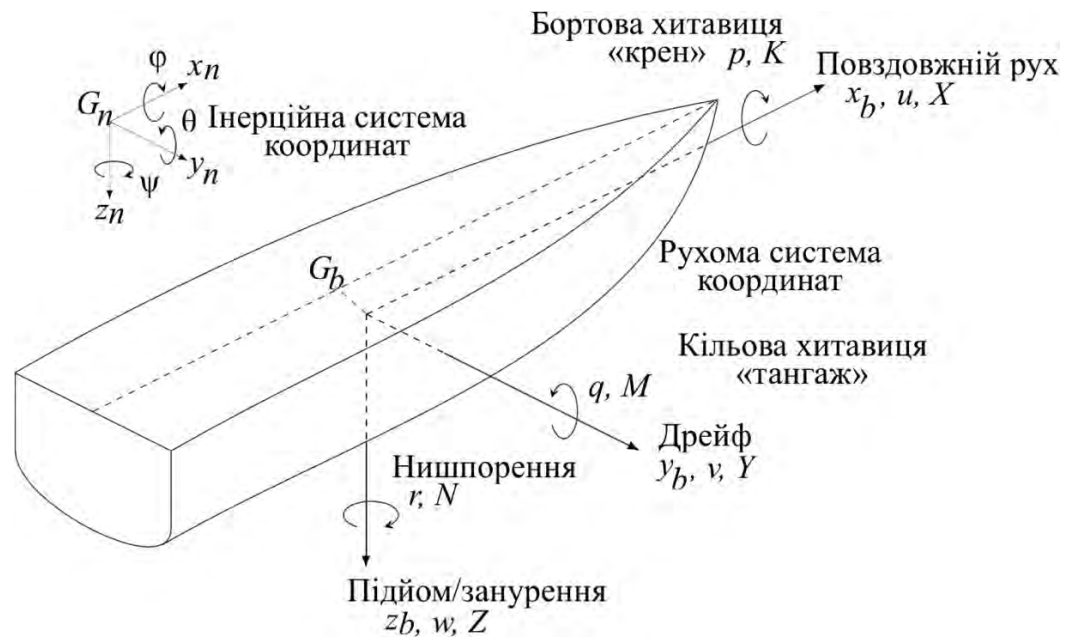


Рис. 2.2 Стандартні позначення опису руху судна у відповідності до (2.1) та (2.2)

2.3 Лінеаризація моделі маневрування судна

Звичайне спрощення моделі полягає в тому, щоб знехтувати вертикальними рухами та поздовжньою хитавицею. Для отримання простої моделі кут крену також передбачається малим. Маючи це на увазі, вектор орієнтації положення і вектор лінійно-кутової швидкості можна визначити як:

$$\eta \triangleq [x \ y \ \varphi]^T, \quad (2.1)$$

$$v \triangleq [u \ v \ r]^T. \quad (2.2)$$

Ці узагальнені положення та швидкості мають геометричну залежність, яку можна описати як:

$$\dot{\eta} = J(\eta)v, \quad (2.3)$$

а рівняння руху судна в нерухомій системі координат мають вигляд:

$$M_{RB} \dot{v} + C_{RB}(v)v + D(v)v = \tau_{act}, \quad (2.4)$$

де: M_{RB} – матриця інерції твердого тіла, $C_{RB}(v)v$ – представляє доцентрові та коріолісові члени, $D(v)$ – матриця демпфування, τ_{act} – вектор із узагальненими зовнішніми силами.

Спочатку для цієї простої моделі члени Коріоліса та матриця демпфування будуть апроксимовані лінійною функцією. Ця система рівнянь руху заснована на, а різні описи сил засновані на [n], де вивчаються моделі з чотирма ступенями свободи (де *roll* – це додатковий ступінь свободи), а не з трьох, як у нашому випадку. Що стосується трьох ступенів свободи, рівняння представляються у такому вигляді [56, 57, 58, 59]:

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & -y_G \\ 0 & m & mx_G \\ -my_G & mx_G & I_Z \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0 & -mr & -mx_G^r \\ mr & 0 & -my_G^r \\ mx_G^r & my_G^r & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

$$D(v) = \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & 0 \\ 0 & 0 & N_r \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

де повна маса судна приймається рівною m знаходиться $r_g = r_G = [x_G, y_G]$, а також I_z – момент інерції щодо осі z , виражений в b -системі. X_u , Y_v і N_r – масштабні коефіцієнти демпфування.

2.4 Лінеаризація моделей сил та моментів азимутального підрулюючого пристрою

На класичному морському судні приводні сили походять від керма, нерухомих гребних гвинтів і підрулюючих пристроїв (ПП). Однак, оскільки тип судна, що розглядається, приводиться в рух АПП, реакція від прикладення сил буде іншою. АПП є двигуном, який може обертатися на 360 градусів навколо своєї вертикальної осі. Це дозволяє прикладати зусилля в x - та y -напрямах в залежності від положення АПП та прикладеного до судна крутного моменту. Наступні модельні розрахунки, в яких використовуються вхідні дані зі швидкості обертання, і азимутальний кут, в основному отримані з модельних розрахунків, використаних Люнгбергом. Однак, дані підходи, було удосконалено Ліангом та Андреаса, які більше уваги приділяють азимутальним силам як вхідним даним, а не швидкості обертання [1, 30].

Припустимо, що силу N_a АПП прикладено до корпусу судна. Нехай підрулюючий пристрій i буде АПП, який обертається з частотою обертання гвинта n_i , та кутом прикладеної результуючої сили α_i . Тоді сили в x_b -напрямку від азимутального двигуна i можна позначити як (

Рис. 2.3):

$$F_{x,i} = g_x(n_i, \alpha_i, u_{a,i}), \quad (2.9)$$

де $u_{a,i}$ - швидкість води, що проходить через АПП в негативному напрямку x_b . Це необхідно, тому що при більш високих швидкостях, і коли $u_{a,i}$ і $n_i \cos(\alpha_i)$ дорівнюють тому самому знаку, будуть втрати ефективності. Припущення в моделі – це лінійне відношення між g_x і n_i як:

$$g_x(n_i, \alpha_i, u_{a,i}) = \mu_i n_i \cos(\alpha_i) - k'_i n_i u_{a,i} \cos(\alpha_i), \quad (2.10)$$

де μ_i та κ_i – позитивні константи, що визначаються натурним експериментом, а $u_{a,i}$ можна описати як:

$$u_{a,i} = (1 - \omega_i) u_r. \quad (2.11)$$

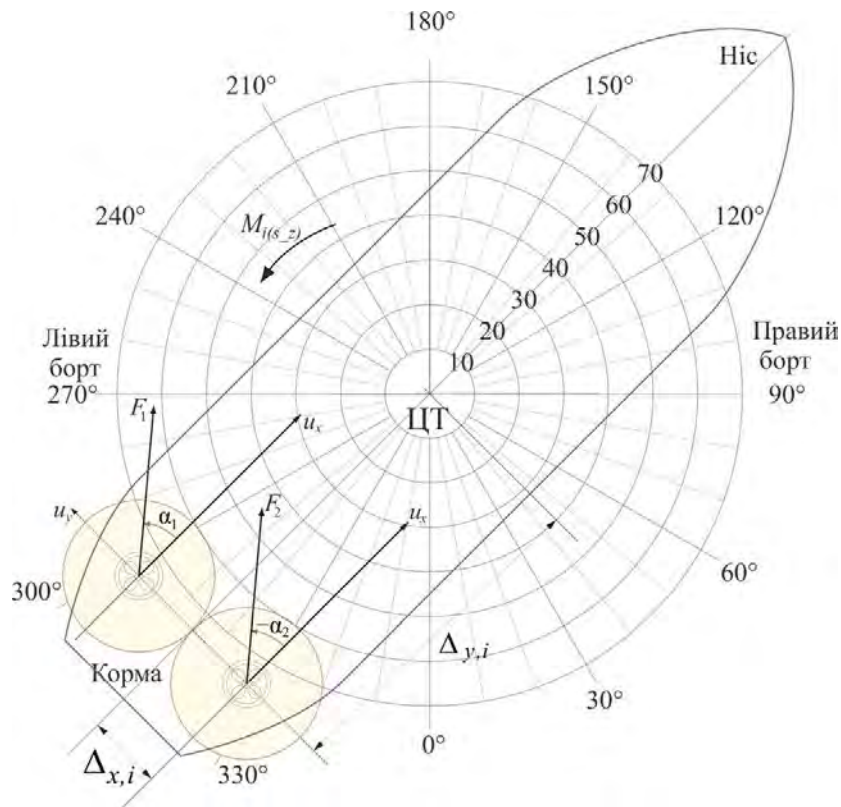


Рис. 2.3 Положення та кут повороту двигуна i

Тут, ω_i – коефіцієнт попутного потоку, що визначає відношення швидкості води, що протікає через гребний гвинт, до швидкості судна u_r – відносна швидкість між судном та навколишньою водою. Поєднуючи коефіцієнт попутного потоку ми можемо спростити другий член (2.10), використовуючи:

$$k_i = (1 - \omega_i) k'_i, \quad (2.12)$$

і підставляючи це в (2.10), отримаємо:

$$g_x(n_i, \alpha_i, u_r) = \mu_i n_i \cos(\alpha_i) - k_i n_i u_r \cos(\alpha_i). \quad (2.13)$$

Таким чином, ми маємо узагальнену модель сил від АПП. Однак, справжня функція $g_x(\cdot)$ є більш складною через динаміку води, але приблизна функція буде адекватною для цілей цього дослідження [1, 30].

Аналогічно сила в Y_b -напрямку:

$$\begin{aligned} F_{y,i} &= g_y(n_i, \alpha_i, v_r) = \mu_i n_i \sin(\alpha_i) - k'_i n_i v_{a,i} \sin(\alpha_i) = \\ &= \mu_i n_i \sin(\alpha_i) - k_i n_i u_r \sin(\alpha_i), \end{aligned} \quad (2.14)$$

можна знайти при тих же припущеннях, що і для x -напряму. Азімутальний двигун i також створюватиме крутний момент відносно судна в залежності від того, де він встановлений щодо центру обертання судна. Крутний момент можна описати як:

$$M_i = \Delta_{x,i} F_{y,i} - \Delta_{y,i} F_{x,i}. \quad (2.15)$$

Узагальнений вектор обертаючого моменту:

$$\tau_{act} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{Na} \mu_i n_i \cos(\alpha_i) - k_i n_i u_r \cos(\alpha_i) \\ \sum_{i=1}^{Na} \mu_i n_i \sin(\alpha_i) - k_i n_i u_r \sin(\alpha_i) \\ \sum_{i=1}^{Na} n_i \left[\mu_i (\Delta_{x,i} \sin(\alpha_i) - \Delta_{y,i} \cos(\alpha_i)) - k_i (\Delta_{x,i} v_r \sin(\alpha_i) - \Delta_{y,i} u_r \cos(\alpha_i)) \right] \end{bmatrix}, \quad (2.16)$$

містить сили та моменти від усіх азимутальних двигунів, складених разом. Щоб зробити модель ще простіше, знехтуємо втратами на високій швидкості в напрямку u_b , оскільки швидкості в цьому напрямку значно нижчі, ніж у напрямку x_b .

Також для простоти передбачається, що кожен двигун однаково ефективний і тому:

$$\mu_i = \mu_j \triangleq \mu \quad \forall i, j = 1, \dots, N_a, \quad (2.17)$$

$$k_i = k_j \triangleq -k \quad \forall i, j = 1, \dots, N_a. \quad (2.18)$$

Що дає:

$$\tau_{act} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{Na} \mu n_i \cos(\alpha_i) + k n_i u_r \cos(\alpha_i) \\ \sum_{i=1}^{Na} \mu n_i \sin(\alpha_i) \\ \sum_{i=1}^{Na} \mu n_i (\Delta_{x,i} \sin(\alpha_i) - \Delta_{y,i} \cos(\alpha_i) (1 - k u_r)) \end{bmatrix}. \quad (2.19)$$

Так як τ_{act} залежить від u_r , яка, своєю чергою, залежить від швидкості збільшення опору руху, модель стає нелінійною. Для простоти ми нехтуватимемо цими членами і позначення узагальненого вектору крутного моменту можна спростити до:

[До змісту](#)

$$\tau_{act} = \begin{bmatrix} \mu \tilde{\tau}_x \\ \mu \tilde{\tau}_y \\ \mu \tilde{\tau}_\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu \sum_{i=1}^{Na} n_i \cos(\alpha_i) \\ \mu \sum_{i=1}^{Na} n_i \sin(\alpha_i) \\ \mu \sum_{i=1}^{Na} n_i (\Delta_{x,i} \sin(\alpha_i) - \Delta_{y,i} \cos(\alpha_i)) \end{bmatrix}. \quad (2.20)$$

Розділ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ УПРАВЛІННЯ ПІДРУЛЮЮЧИМИ ПРИСТРОЯМИ В ЧАСТКОВИХ РЕЖИМАХ

3.1. Симуляції роботи підруючого пристрою в часткових режимах

У цьому моделюванні контролер використовує матриці, отримані при лінеаризації навколо робочої точки з поступальним рухом вхідних сигналів, які призначені для роботи з кутом розташування гвинта близького до нуля. Для контролера використовуються два різних налаштування, які виконуються для двох задач: по-перше, для стану коли вхідні сигнали дорівнюють 1, а опорний коефіцієнт підсилення регулюється для досягнення цільового значення. Інше налаштування усуває помилку стеження для збільшення швидкості обертання, забезпечуючи найближче до еталонного значення швидкості, водночас утримуючи рівень вхідного сигналу для меншого значення швидкості хитавиці. У зв'язку з цим знаходження межі встановлення потребує більше часу, що дає відомості про здатність системи шляхом порівняння рівномірно і більш агресивно налаштованої системи. Матриці еталонних коефіцієнтів та коефіцієнтів передачі, де p та s позначають пікові і згладжуючі індекси відповідно будуть виглядати [1, 30]:

$$Q_{1,p} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, Q_{1,s} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.001 & 0 \\ 0 & 0 & 200 \end{bmatrix},$$

$$Q_{2,p} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, Q_{2,s} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

$$L_{r,p} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -22.14 \end{bmatrix}, L_{r,s} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -14.06 \end{bmatrix}.$$

На Рис. 3.1 показано основні результати роботи двох різних регуляторів. Регулятор налаштування максимального значення забезпечує перерегулювання в 7 разів вище еталонного значення, але стабілізується після 10 с.

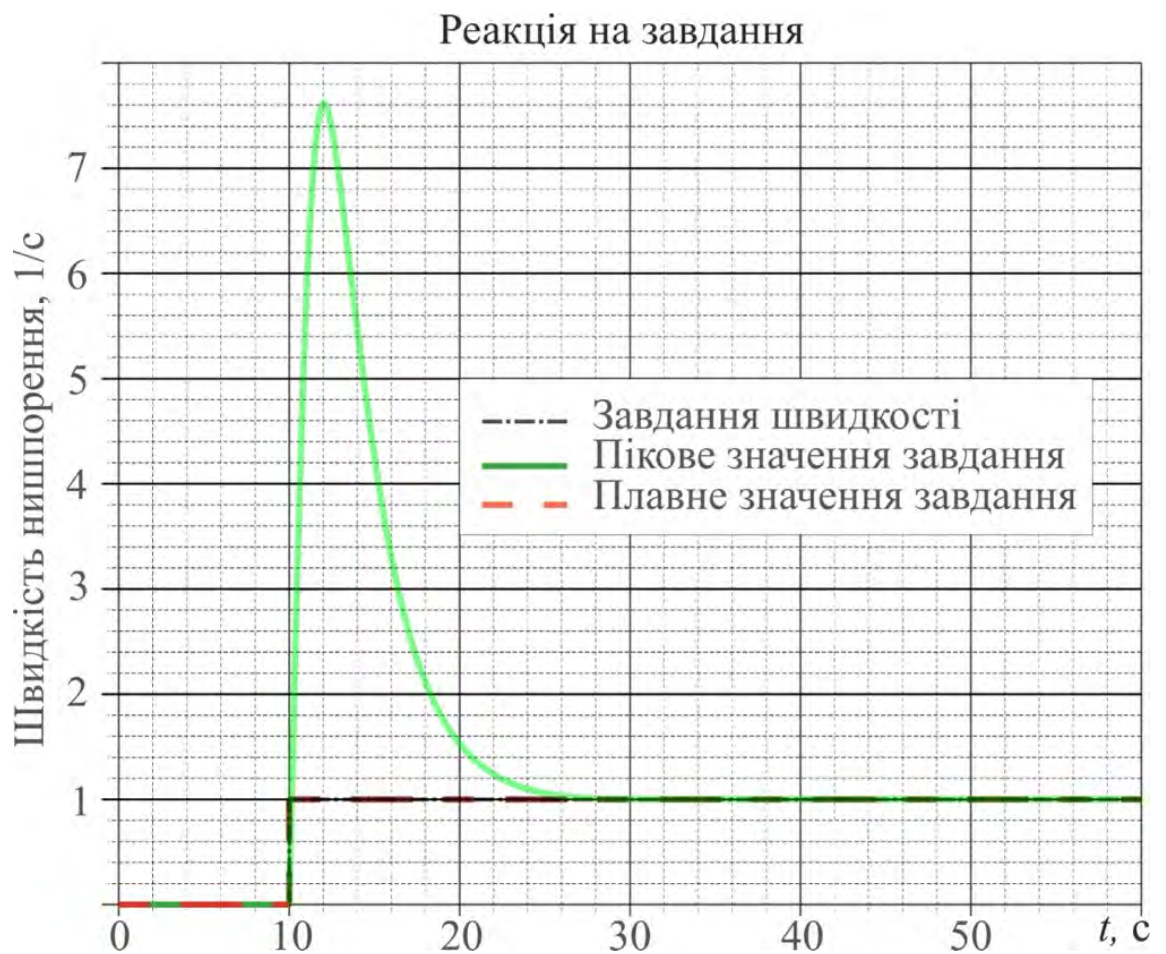


Рис. 3.1 Перехідна характеристика лінеаризації нульового кута

Згідно Рис. 3.2, б кінцеве значення α дорівнює $\alpha_p = \alpha_s = 0.065$ рад.

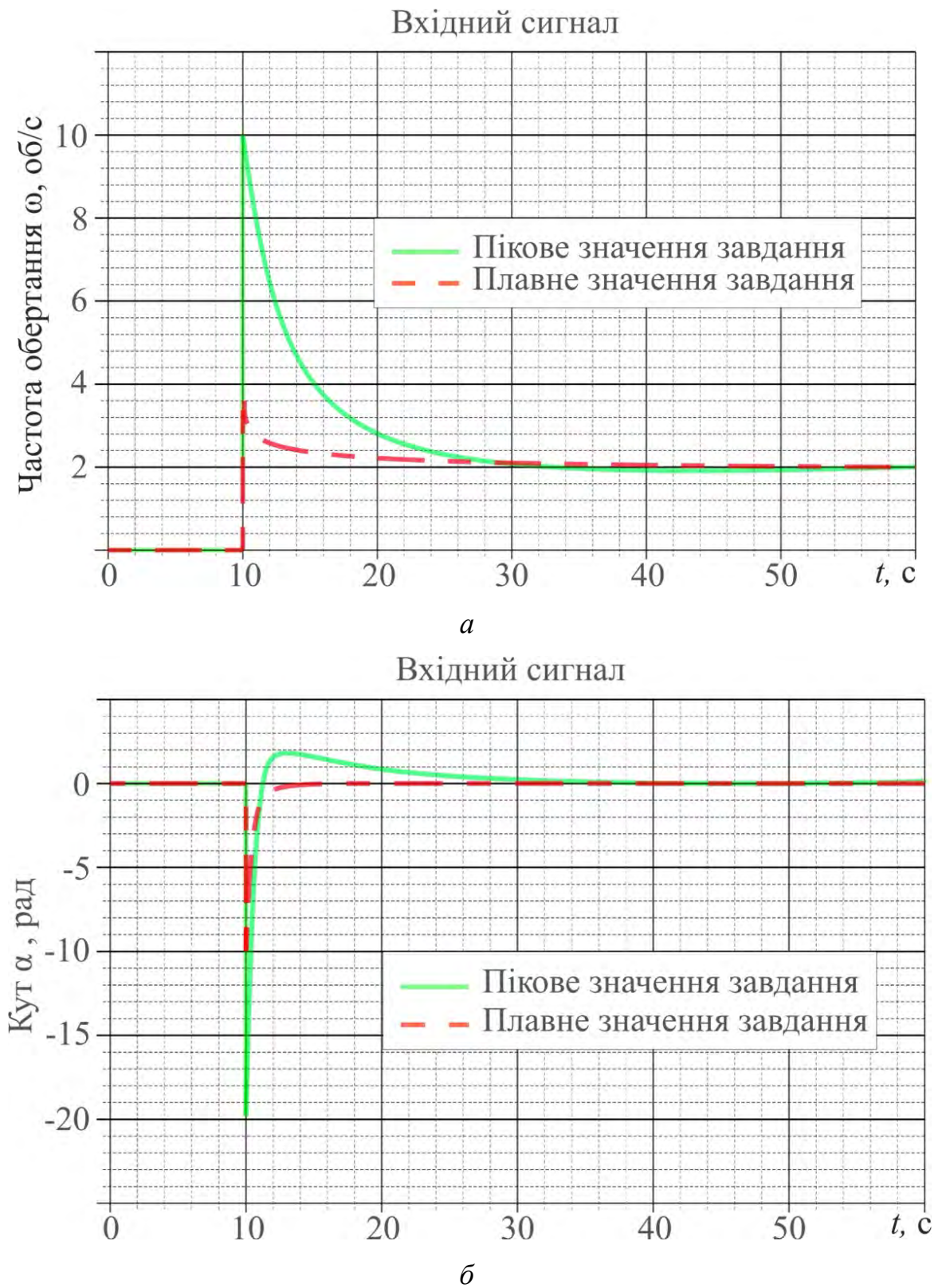


Рис. 3.2 Вхідні сигнали лінеаризації нульового кута: a – швидкість обертання; b – кут α

Найімовірніше, це результат зміни кута розташування АПП, як показано на Рис. 3.2 (а, б), на якому α досягає дуже високого негативного значення, близького до -20 рад, що далеко від реалістичного сценарію для реального АПП.

Цей факт дає підстави переоцінювання необхідності більш різкої зміни швидкості нишпорення над повільною для протидії стану коли перерегулювання досягає такого високого значення. Однак, зменшення α є доцільним з фізичної точки зору, тому що невеликий негативний кут забезпечить позитивний крутний момент навколо осі z і позитивну швидкість нишпорення. Хоча це може бути спірним моментом, якщо такий маленький кут може мати такий вплив, якщо нульовий кут дає аналогічні результати для цього режиму контролера. Іншим цікавим аспектом є те, наскільки розділені швидкість обертання та кидки швидкості, оскільки регулятор показує однакову поведінку для обох симуляцій, що для реального АПП може суттєво вплинути на результати [19, 29, 30].

У регуляторі з плавним налаштуванням вихідне значення ніби «слідuje» за еталонним, але має дві відмінності від іншого регулятора: таке саме зменшення і відновлювання α до кінцевого стабілізованого значення менш ніж за секунду, що не можливо для реального АПП завдяки його динамічним властивостям. На

Рис. 3.3 швидкість коливання встановлюється значно повільніше, що може вказувати на те, що існує деяка незв'язана поведінка, оскільки вхідним сигналом для системи є той самий проміжок часу 20 секунд, але швидкість коливання у цей час відрізняється. Деяка нереалістична поведінка АПП може бути пов'язана з лінеаризацією α і його тригонометричною залежністю. Тригонометрична функція, яка є періодичною і тільки розподіляє сили, створювані числом оборотів між x_b і осі y_b , не може перевищувати 1. При застосуванні лінеаризації регулятор «вважає», що вищому значенню α відповідає вище значення результуючої сили, що на практиці не відповідає дійсності.

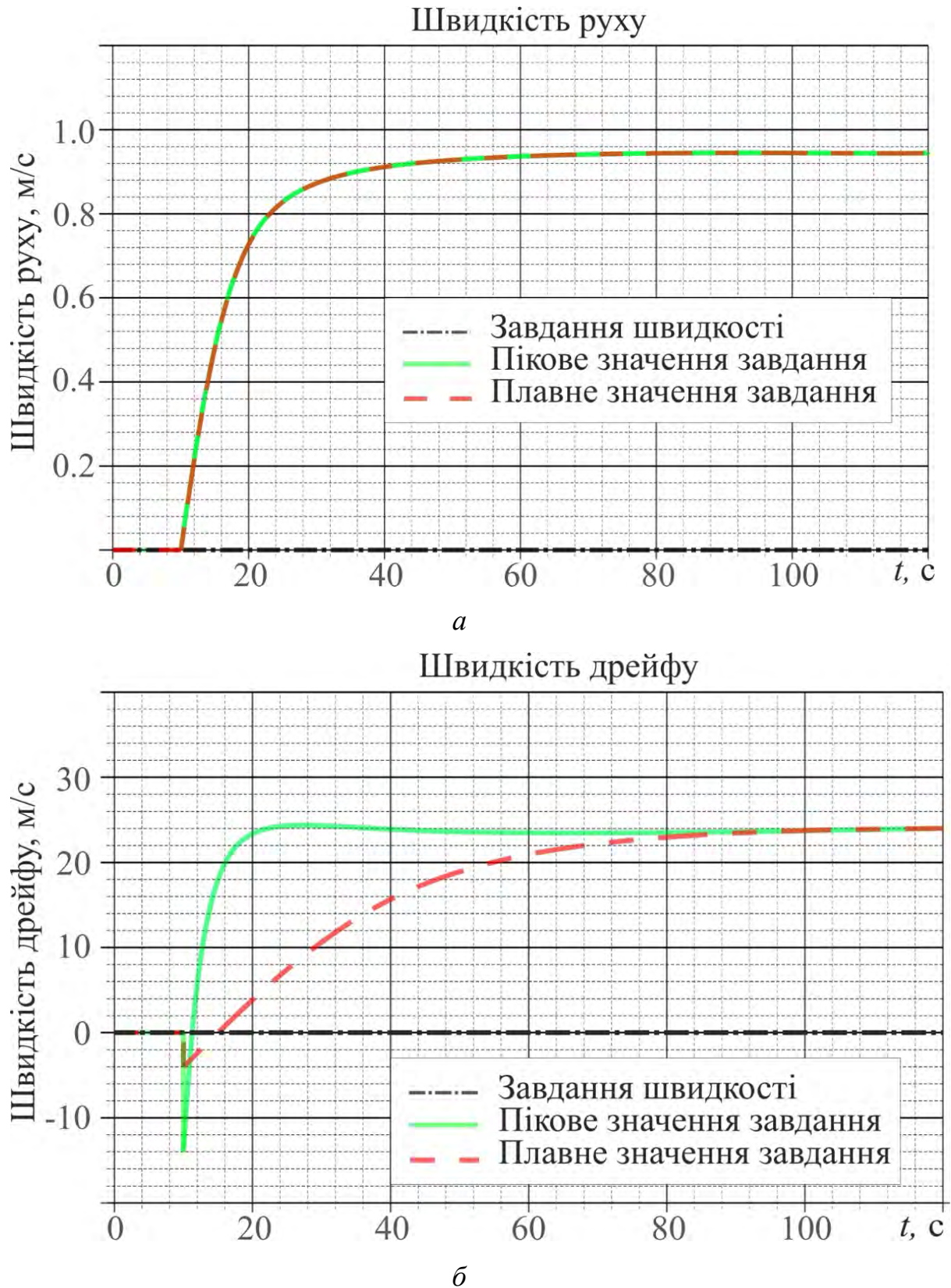


Рис. 3.3 Лінеаризація при нульовому куті: *a* – швидкості руху; *б* – швидкості дрейфу

3.2. Порівняльний аналіз роботи електростанції під час роботи підрулюючого пристрою в часткових режимах

Типовий часовий профіль такий: сумарний інтервал роботи підрулюючого пристрою під час маневрів сягає до 2 годин, з яких приблизно від 5-10 хв до 30 хв припадає власне на управління (створення тяги, реверси, утримання курсу біля причалу). Решту часу підрулюючий пристрій перебуває у режимі чергування: електродвигун обертається без навантаження (лопаті *CPP* у нейтралі), гідросистема підтримує готовність.

У фазі активного оперування фіксується повторюваний цикл короточасних імпульсів тяги з частими змінами напрямку (*port/starboard*) та амплітуди кроку. Типовий сценарій: серії команд з тривалістю 1-2 хв. та паузами такого самого інтервалу. Керування здійснюється з містка або крил містка джойстиком із пропорційним заданням кроку (*pitch*). Оперування підрулюючим пристроєм забороняється при швидкості вищій за 5 вузлів. На практиці НПП знаходився в режимі чергування, але не оперувався, навіть при швидкості у 7 вузлів, таке траплялося під час виходу з порту.

На Рис. 3.4 та [Рис. 3.5](#) показано результати моніторингового контролю генераторних агрегатів роботи електроенергетичної системи в часткових режимах у відповідності до завдання управління підрулюючим пристроєм.

Підчас моніторингу також враховувався людський фактор для обґрунтування переваг та недоліків компенсування зайвої реактивної потужності підключенням суперконденсаторів паралельно живленню НПП.

Так, наприклад, на Рис. 3.6 показано стрибок струму генераторів внаслідок непередбачуваного повторного пуску НПП.

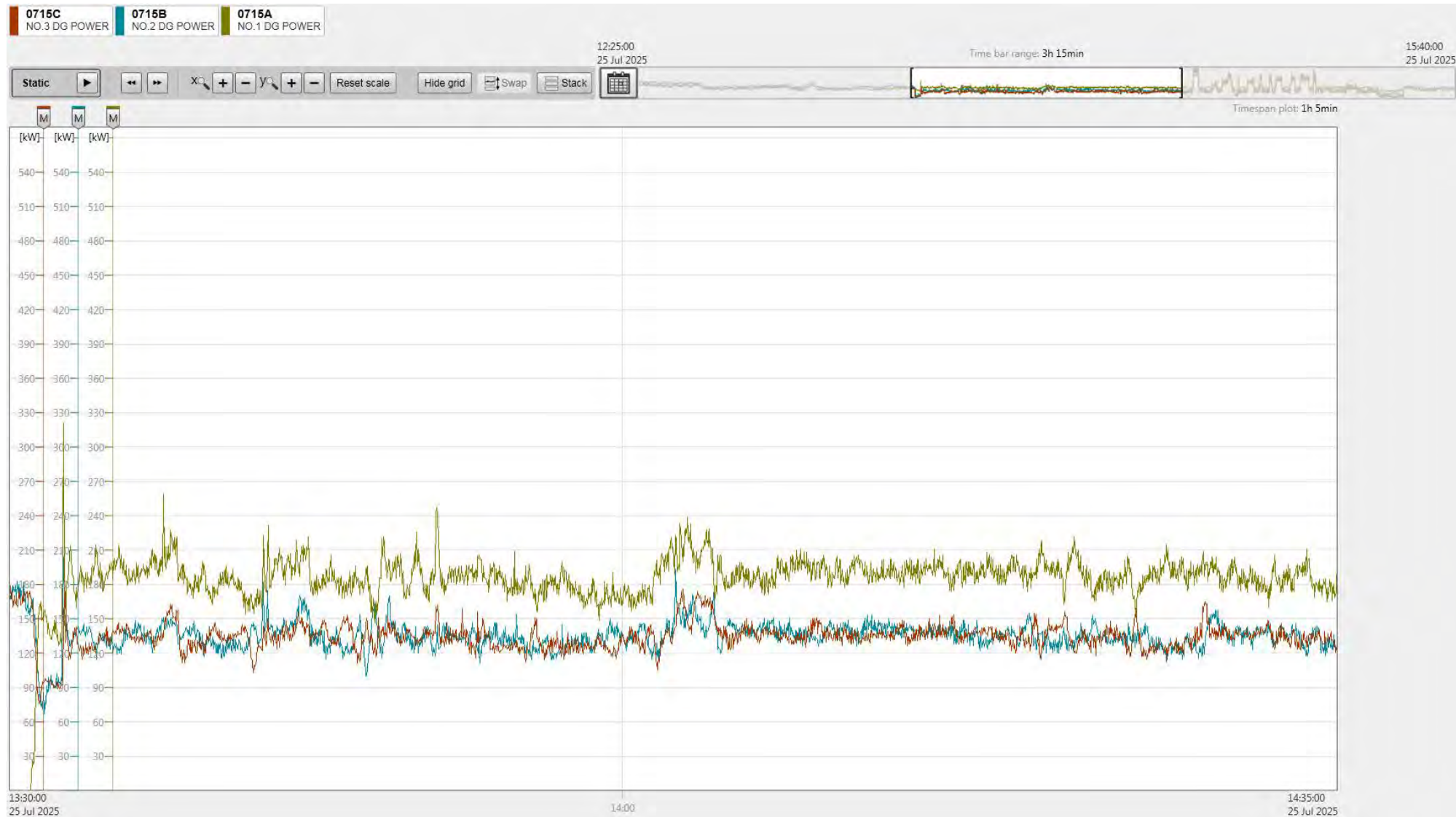


Рис. 3.4 Потужність генераторів у режимі чергування

[До змісту](#)

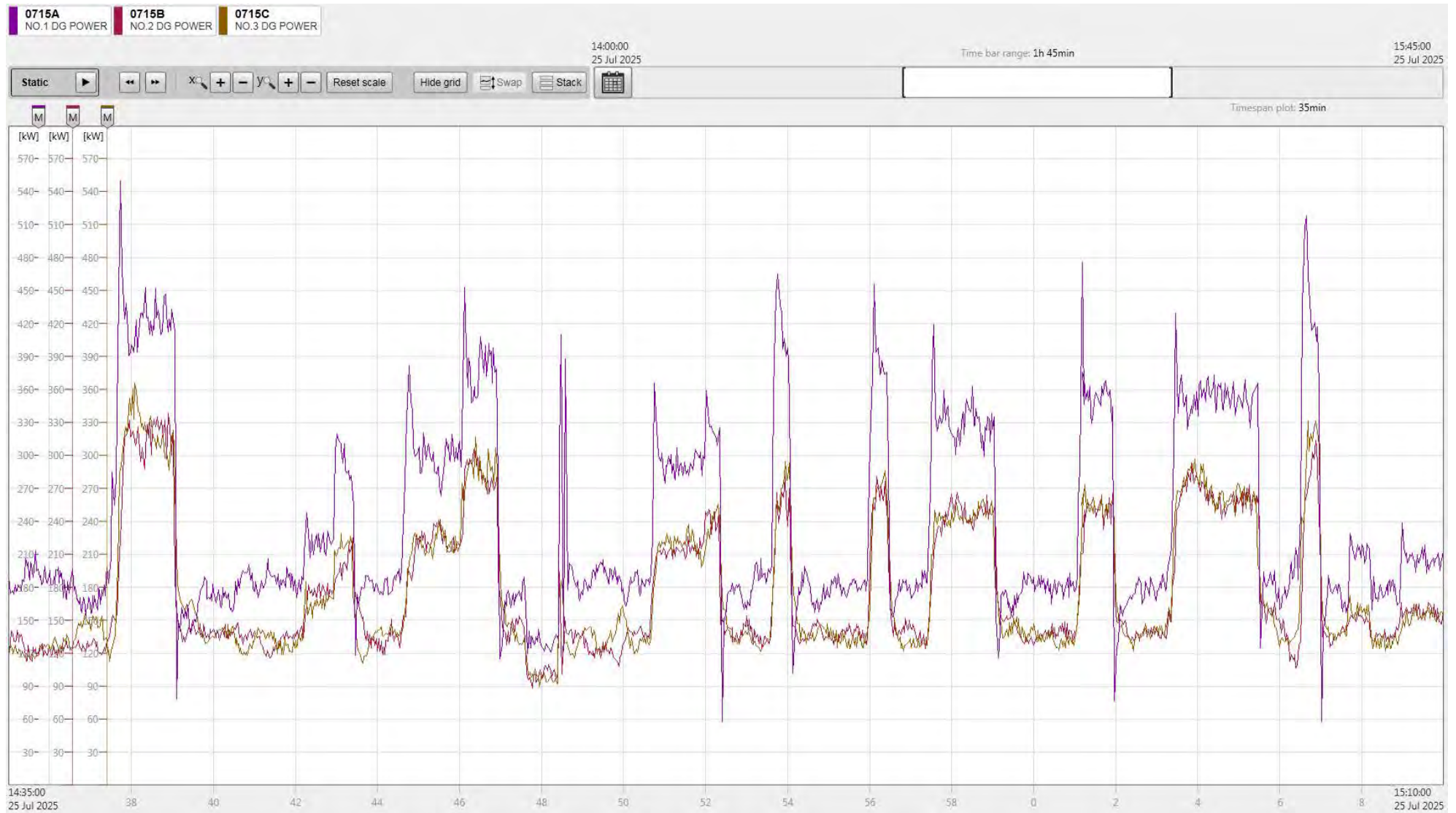


Рис. 3.5 Потужність генераторів під час оперування

[До змісту](#)

Підсумовуючи емпірично можна відзначити, що у режимі чергування загальний коефіцієнт потужності суднової електроенергетичної системи ($\cos \varphi$) помітно падає до $\sim 0,5$, і таке навантаження може тривати до двох годин (сукупно в режимі маневрування). Підчас активної фази управління підрулюючим пристроєм $\cos \varphi$ зростає до $\sim 0,8$, після чого знову повертається до значень чергувального режиму ($\sim 0,5$). Фізично це пояснюється тим, що асинхронний двигун підрулюючого пристрою у холостому ході майже не має навантаження, тобто активна потужність P мала, а реактивна складова Q порівняно велика. Це знижує $\cos \varphi$ на шинах ГРЩ, погіршує резерв за струмом генераторів і може збільшувати втрати та падіння напруги при приєднанні інших споживачів.

На практиці суперконденсаторні системи або активні компенсатори часто встановлюють на судах із двома і більше підрулюючими пристроями, де реактивна компонента в режимі чергування істотніша. Для судна з одним підрулюючим пристроєм економічний ефект від його наявності та потреба у встановленні суперконденсаторів неочевидна, так на доданок все одно залучаються буксири.

Водночас експлуатація на внутрішніх водоймах/Великих Озерах (для яких судно збудоване) може змінити баланс на користь підрулюючого пристрою: часті маневри у Великих Озерах через що зростає необхідність у підвищеній вимоги до автономності роблять комплекс підрулюючого пристрою більш виправданим через вищу оперативність.

На Рис. 3.7 та Рис. 3.8 показано порівняльний аналіз коефіцієнту потужності в залежності від режиму роботи електроенергетичної системи судна.

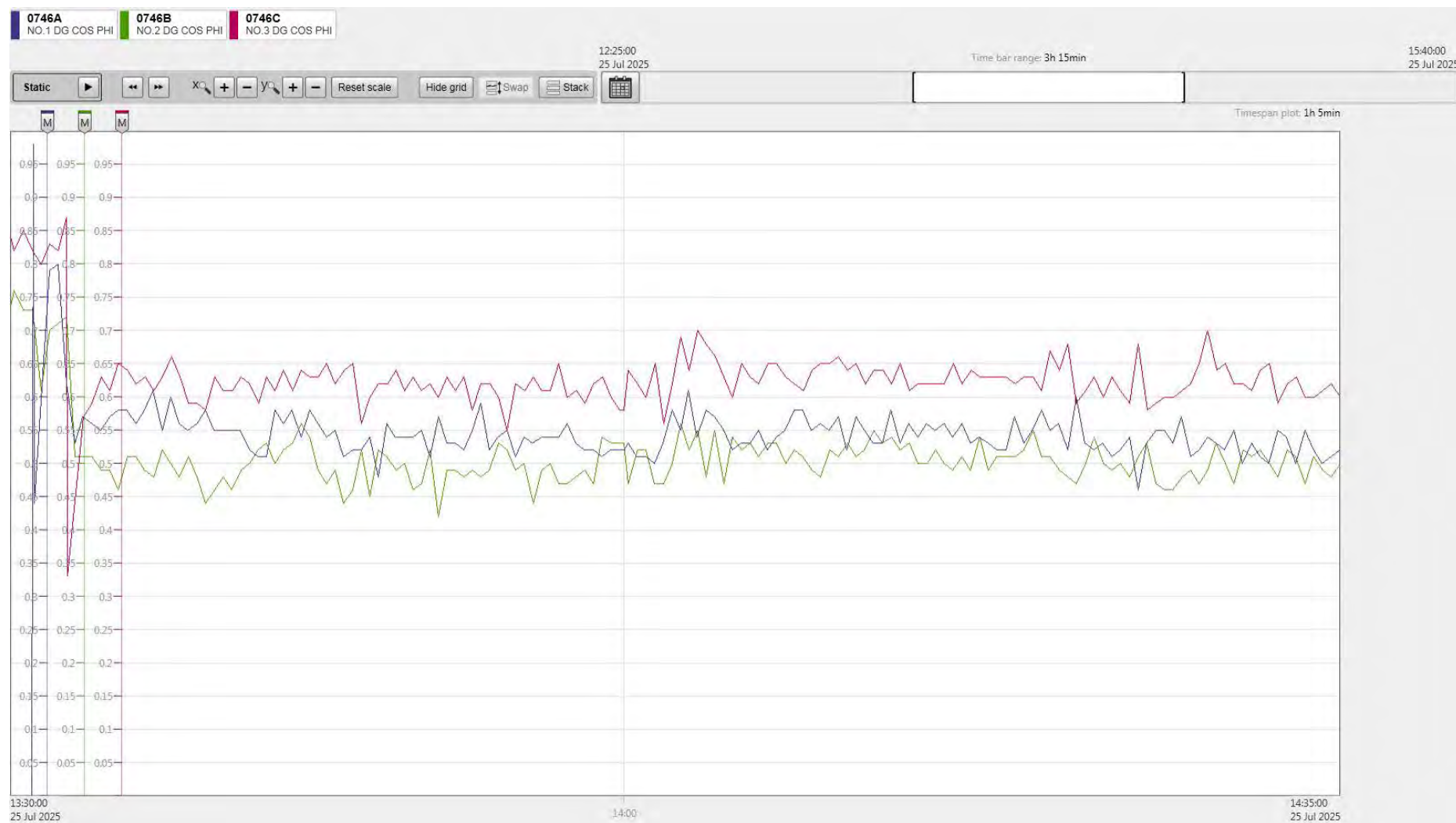


Рис. 3.7 Коефіцієнт потужності у режимі чергування

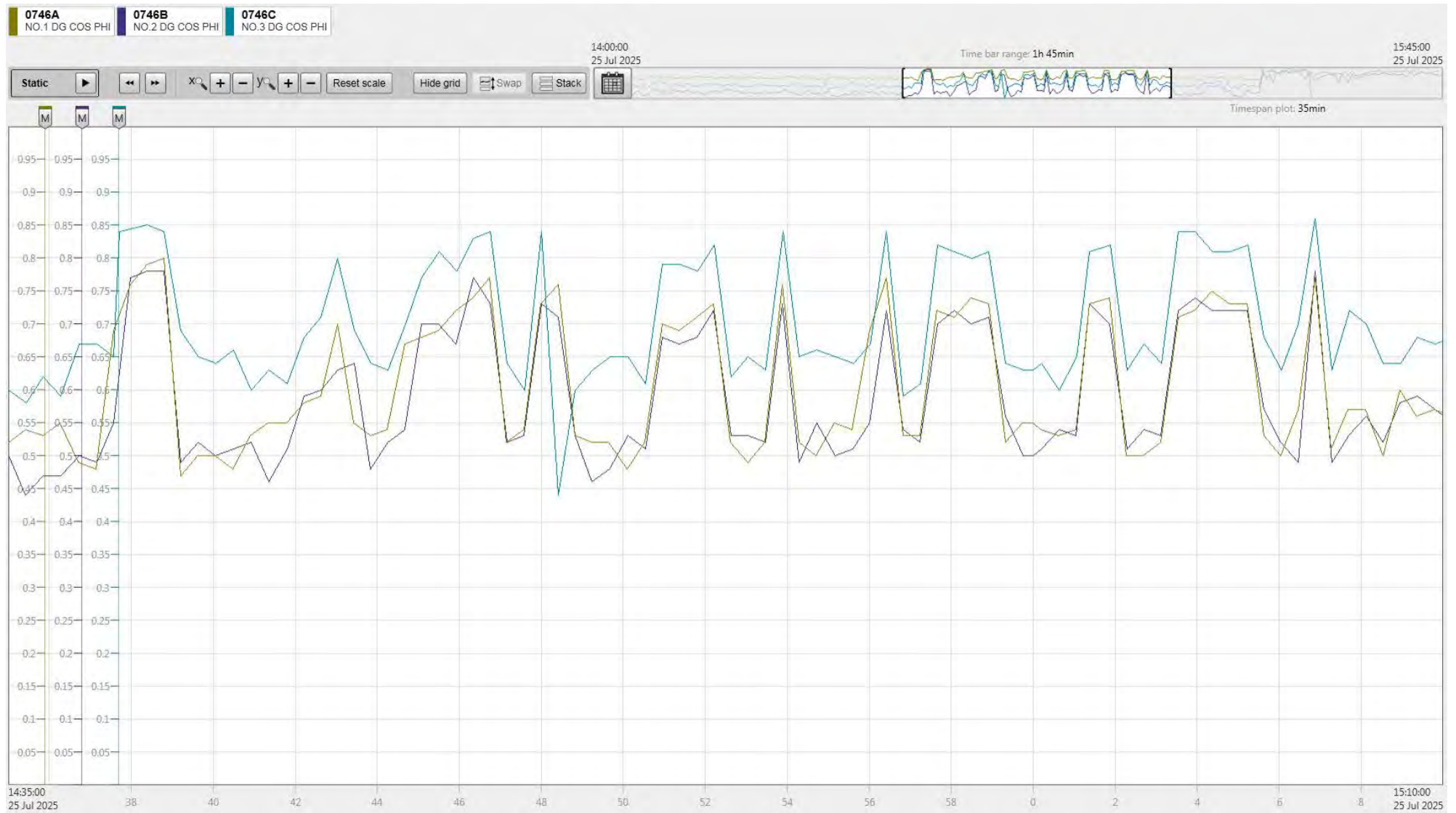


Рис. 3.8 Коефіцієнт потужності підчас управління підрулюючими пристроями

Висновки

Цілісний практичний добуток дослідження роботи головних та допоміжних технічних систем судна в часткових режимах та стало основою для проведення цільових спостережень і вимірювань впливу електричного носового підрулюючого пристрою на роботу електроенергетичної системи (ЕЕС). У процесі системно фіксувалися параметри пропульсивного комплексу з *СРР*, робота систем дистанційного керування, дизель-генераторних установок, а також контурів автоматизації та моніторингу (архіви трендів і тривог).

Вимірювання характеристик головної енергетичної установки (ГЕУ) виконувалися багаторазово підчас реальних швартових і маневрових епізодів. Дані збиралися зі штатних засобів моніторингу (*K-Chief 600*) з контролем трендів U , I , P , Q , S , $\cos \varphi$, f та фіксацією подій. Для кожного епізоду реєструвалися часові мітки, характер навантаження (режим чергування/оперування), тривалість ділянок, «ступені» й провали напруги ΔU та час її відновлення, реакції *AVR* і паливних регуляторів дизель-генераторів, а також розподіл активної й реактивної потужності між працюючими *DG* та навантаженням НПП. Окремо відзначалися режими холостого ходу електродвигуна НПП (лопаті *СРР* у нейтралі).

Проведено повторювані спостереження впливу НПП на ЕЕС; зафіксовано типові профілі $\cos \varphi$ у *standby* ($\sim 0,5$) через значне споживання реактивної потужності електроприводом без механічного навантаження та у фазі активної роботи ($\sim 0,8$) під час створення тяги й реверсів у межах маневрів тривалістю до 2 годин.

Виявлено характерну зміну розподілу P/Q під час переходів чергування $\leftrightarrow$ оперування: у чергуванні домінує реактивна складова НПП, а при роботі під навантаженням зростає активна складова та $\cos \varphi$ наближається до

нормативних значень; реакції *AVR* і регуляторів палива забезпечують стабілізацію U та f без тривалих відхилень.

Оцінено перехідні процеси на головному розподільчому щиті (ГРЩ) при різких змінах кута лопатей *CPP*: зафіксовані короточасні провали напруги в межах допустимих експлуатаційних значень із поверненням до номіналу за типовий час; випадків розсинхронізації *DG* не зафіксовано.

Розроблено робочу методику використання архівів *K-Chief 600* (тренди $U, I, P, Q, S, \cos \varphi, f$, а також журнали тривоги і подій) для подальшої кількісної оцінки впливу НПП на ЕЕС, створення порівнюваних «паспортів» маневрів і визначення повторюваних патернів навантаження.

Отримані результати підтверджують суттєвий вплив режиму *standby* НПП на $\cos \varphi$ і реактивну складову системи, а також прогнозоване вирівнювання параметрів при переході до робочого режиму. Сформована база даних і відпрацьована методика аналізу трендів стануть підґрунтям для подальших з фокусом на:

1. Алгоритмах корекції та узгодження *AVR* і паливних регуляторів *DG* у перехідних режимах;
2. Оптимізації залучення джерел реактивної потужності (*PFC*, вар-підтримка);
3. Рекомендаціях щодо режимів роботи НПП та послідовності операцій із *CPP* для зменшення амплітуди коливань навантаження на ЕЕС і підвищення загальної стійкості системи.

Список використаних джерел

1. 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. – 13.05.2024 г. – Загол. з екрану.
2. 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>. – 24.08.2024 p. – Загол. з екрану.
3. 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).
4. 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).
5. 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).
6. 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>.
7. Bourbon Offshore. Bourbon Orca 181 MT / BP / DP2 [Електронний ресурс]. – 2 с. – URL: <https://www.bourbonoffshore.com/sites/default/files/documents-associes/pdf/bourbon-orca-181-mt-bp-dp2.pdf>.
8. Cummins. KTA19 – Marine Propulsion & Auxiliary Engines. Marine Spec Sheet [Електронний ресурс]. – 2 с. – URL: <https://www.dieselrebuildkits.com/wp-content/uploads/2018/03/kt19-marine-specsheet2.pdf>
9. VEM Sachsenwerk GmbH. Electrical Motors and Machines for Shipbuilding Industry [Електронний ресурс]. – Dresden: VEM Group, 2017. – 40 с. – Режим доступу: <https://maharfanabzar.com/wp->

[content/uploads/2023/06/Electrical-Motors-and-Machines-for-Shipbuilding-Industry.pdf](https://www.ittc.info/media/7989/75-02-01-03.pdf).

10. International Towing Tank Conference (ITTC). Fresh-Water and Seawater Properties (ITTC-78/— / 7.5-02-01-03) [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.ittc.info/media/7989/75-02-01-03.pdf>.
11. Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). 3rd CGPM (1901), Resolution 2: Acceleration of free fall [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.bipm.org/en/committees/cg/cgpm/3-1901/resolution-2>
12. 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).
13. Glad, T., & Ljung, L. (2000). Control Theory (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315274737>.
14. 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).
15. Wärtsilä. Wärtsilä 32 Product Guide [Електронний ресурс]. – URL: <https://brandhub.wartsila.com/m/54000f75ef455f3d/original/Wartsila-32-Product-guide.pdf>
16. Wärtsilä. Wärtsilä 20 Product Guide [Електронний ресурс]. – 2015. – 178 с. – URL: https://www.dieselduck.info/machine/01%20prime%20movers/2015%20W%C3%A4rtsil%C3%A4-20_product_guide.pdf
17. Riviera Maritime Media. Diesel-electric power for novel AHTS vessel [Електронний ресурс] // Riviera Maritime Media. – 02 грудня 2008. – Режим доступу: <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/diesel-electric-power-for-novel-ahts-vessel-51072>.
18. Riviera Maritime Media. Iconic design lives up to expectations [Електронний ресурс] // Riviera Maritime Media. – 19 березня 2006. – Режим доступу: <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/iconic-design-lives-up-to-expectations-50474>
19. 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).
20. 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).
21. 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).
22. 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).
 23. 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>.
 24. 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).
 25. 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).
 26. 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).
 27. 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>.
 28. 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).
 29. 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).
 30. 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).

31. 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).
32. 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).
33. 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.
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. Doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273934>.
35. 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).
36. 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 p. – Загол. з екрану.
37. 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).
38. 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).
39. 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).
40. 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).
41. 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 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).
 42. 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).
 43. 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).
 44. 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>.
 45. 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).
 46. 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).
 47. 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 доступа: \www/ URL: <http://www.marinecontrol.org/>. – 24.02.2015 р. – Загол. з екрану.
 48. 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).
 49. 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).
50. Glad, T., & Ljung, L. (2000). Control Theory (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315274737>.
 51. 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).
 52. 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).
 53. 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).
 54. 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>.
 55. 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).
 56. 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).
 57. 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).
 58. 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).
 59. 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).
 60. 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).
 61. 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).

62. 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.
63. 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).
64. 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).
65. 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>.
66. 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).
67. 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.
68. 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.
69. 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).
70. 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).
71. 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).
 72. Zerbo, S. G. Linear pencils and quadratic programming problems with a quadratic constraint / S. G. Zerbo, A. Maestripieri, 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>.
 73. 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).

Звіт подібності

Метадані

Назва організації

National university "Odessa maritime academy"

Заголовок

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ КОМПЕНСАЦІЇ КОЛИВАНЬ НАВАНТАЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ

Автор

Науковий керівник / Експерт

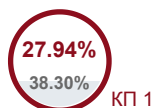
Єгор Борсад.т.н., професор В.В. Будашко

Підрозділ

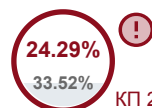
Дипломна робота магістра

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



КП 1



КП 2

25

Довжина фрази для коефіцієнта подібності 2

12464

Кількість слів

96060

Кількість символів

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв		22
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		87

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Колір тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

10 найдовших фраз

Колір тексту

ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	https://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1334225/FULLTEXT01.pdf	262 2.10 %
2	https://easychair.org/publications/preprint/29MK/open	187 1.50 %
3	https://easychair.org/publications/preprint/xl6L/open	175 1.40 %
4	https://easychair.org/publications/preprint/xl6L/open	165 1.32 %
5	https://repository.onma.edu.ua/id/eprint/304/1/%D0%93%D1%83%D1%80%D0%BE%D0%B2_%D0%94%D0%A0%D0%9C_2022.pdf	152 1.22 %

6	результаты_45_101 12/7/2022 Publisher House "Technology Center" (Eastern-European Journal of Enterprise Technologies)	124 0.99 %
7	https://repository.onma.edu.ua/id/eprint/304/1/%D0%93%D1%83%D1%80%D0%BE%D0%B2_%D0%94%D0%A0%D0%9C_2022.pdf	119 0.95 %
8	http://www.onma.edu.ua/wp-content/uploads/2016/09/Thesis_Budashko_END-1.pdf	118 0.95 %
9	https://easychair.org/publications/preprint/xl6L/open	100 0.80 %
10	https://easychair.org/publications/preprint/xl6L/open	86 0.69 %
з домашньої бази даних (1.32 %)		
ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТКОВИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ КОМБІНОВАНОГО ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСУ ОФШОРНОГО СУДНА 6/14/2021 National university "Odessa maritime academy" (Дипломна робота магістра)	105 (8) 0.84 %
2	ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ ЕНЕРГЕТИЧНІЙ УСТАНОВЦІ БАГАТОЦІЛЬОВОГО СУДНА 12/23/2020 National university "Odessa maritime academy" (Дипломна робота магістра)	59 (4) 0.47 %
з програми обміну базами даних (2.75 %)		
ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
3	результаты_45_101 12/7/2022 Publisher House "Technology Center" (Eastern-European Journal of Enterprise Technologies)	334 (8) 2.68 %
4	результаты_44_105 8/20/2024 Publisher House "Technology Center" (Eastern-European Journal of Enterprise Technologies)	9 (1) 0.07 %
з Інтернету (34.23 %)		
ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	ДЖЕРЕЛО URL	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
5	https://easychair.org/publications/preprint/xl6L/open	1285 (26) 10.31 %
6	https://easychair.org/publications/preprint/29MK/open	737 (17) 5.91 %
7	https://repository.onma.edu.ua/id/eprint/304/1/%D0%93%D1%83%D1%80%D0%BE%D0%B2_%D0%94%D0%A0%D0%9C_2022.pdf	554 (13) 4.44 %
8	https://easychair.org/publications/preprint/SvR2/open	430 (11) 3.45 %
9	http://www.onma.edu.ua/wp-content/uploads/2016/09/Thesis_Budashko_END-1.pdf	285 (5) 2.29 %
10	https://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1334225/FULLTEXT01.pdf	281 (2) 2.25 %
11	https://easychair.org/publications/preprint/Vscg/open	215 (6) 1.72 %
12	http://onma.edu.ua/wp-content/uploads/2016/09/Thesis_Budashko_END.pdf	161 (4) 1.29 %
13	https://journals.uran.ua/eejet/article/view/273934	91 (8) 0.73 %
14	https://www.easychair.org/publications/preprint_download/4d39	79 (2) 0.63 %

15	https://www.naun.org/main/NAUN/energyenvironment/2020/a042011-002(2020).pdf	62 (1) 0.50 %
16	https://nuos.edu.ua/wp-content/uploads/2022/04/OPP_ESEZA_2022.pdf	30 (2) 0.24 %
17	http://www.onma.edu.ua/wp-content/uploads/2020/12/aref-24.12.2020.pdf	24 (2) 0.19 %
18	https://www.ittc.info/media/10176/75-02-02-021.pdf	14 (2) 0.11 %
19	https://ejmcm.com/article_6641_ebf24ef11dd0e180f2f46ecc99d0f908.pdf	12 (1) 0.10 %
20	https://dspace.kntu.kr.ua/bitstreams/e9945764-f943-4968-aae0-eaf6a288de38/download	7 (1) 0.06 %

Список прийнятих фрагментів

ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	ЗМІСТ	КІЛЬКІСТЬ ОДНАКОВИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
	https://easychair.org/publications/preprint/29MK... ☒	737 (5.91%)
	https://repository.onma.edu.ua/id/eprint/304/1/%... ☒	554 (4.44%)