

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Черніков Павло Сергійович

УДК 629.12-8:629.12.037

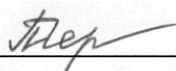
ДИСЕРТАЦІЯ

**ОПТИМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ
ГРЕБНИМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИМИ УСТАНОВКАМИ
ЕЛЕКТРОХОДІВ НА МАНЕВРАХ**

Спеціальність 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 П. С. Черніков

Науковий керівник: Яровенко Володимир Олексійович,
доктор технічних наук, професор

Одеса – 2019

АНОТАЦІЯ

Черніков П.С. Оптимальне управління гребними електроенергетичними установками електроходів на маневрах. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту. – Одеський національний морський університет. – Одеса, 2019.

Дисертація присвячена пошуку оптимальних параметрів сигналів управління гребними електроенергетичними установками (ГЕЕУ), які забезпечують найкращі маневрені якості електроходів з єдиною судновою електроенергетичною системою.

Розроблена математична модель і метод розрахунку перехідних режимів роботи ГЕЕУ в складі суднового пропульсивного комплексу. Знайдені узагальнені безрозмірні параметри комплексу. Виявлені значущі параметри, які суттєво впливають на маневрені характеристики електроходів та на показники якості роботи ГЕЕУ при маневруванні. Запропоновано новий вид сигналів управління ГЕЕУ. Проаналізовано та виявлено вплив на оптимальне управління зміни навантаження суднової мережі, та навпаки. Проведені оптимізаційні розрахунки й знайдені оптимальні параметри сигналів управління ГЕЕУ на маневрах.

Достовірність основних результатів дисертаційної роботи підтверджується відповідністю результатів математичного моделювання з експериментальними даними натурних випробувань.

Розроблені практичні рекомендації по оптимальному управлінню охоплюють широкий клас суден з електрорухом. Вони призначені для використання в процесі експлуатації електроходів.

Ключові слова: гребні електроенергетичні установки; маневрені властивості електроходів; оптимальне управління за показниками судна.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. *Вперше* знайдено для електроходів з єдиною електроенергетичною системою оптимальні параметри сигналів управління ГЕЕУ на маневрах. На відміну від існуючого підходу до управління гребними електроенергетичними установками, в якості критеріїв оптимальності використані показники, які характеризують маневрені характеристики судна, як старшої системи. Рекомендації сприяють підвищенню безпеки виконання маневрених операцій з забезпеченням при цьому допустимих навантажень на електроенергетичну установку й відхилень показників якості електроенергії суднової мережі. Вони охоплюють широкий клас суден з електрорухом.

2. *Вдосконалено* математичну модель і метод розрахунку на її основі перехідних режимів ГЕЕУ як складової частини єдиного суднового пропульсивного комплексу, що дозволяє, на відміну від існуючих моделей, розраховувати поточні значення основних режимних показників комплексу та оцінювати якість виконання маневрів з урахуванням динамічних режимів роботи електроенергетичної установки. Запропонований математичний опис дає можливість враховувати вплив перехідних режимів ГЕУ на параметри електроенергії суднової мережі й враховувати вплив зміни навантаження на параметри сигналів управління.

3. *Вдосконалено* склад комплексу узагальнених показників якості виконання маневрів, і виявлені безрозмірні параметри комплексів, які суттєво впливають на маневрені властивості електроходів, динамічні показники роботи ГЕЕУ та якість електроенергії суднової електромережі. Це висвітлює можливі шляхи підвищення маневрених характеристик електроходів.

4. *Отримали подальший розвиток* методи оптимізації управління судновими електроенергетичними установками на маневрах. Доповнення алгоритмів пошуку оптимальних рішень, які запропоновані в роботі, дозволяють підвищити точність і суттєво скоротити процедури досягнення оптимальних рішень.

Достовірність основних наукових висновків і рекомендацій дисертаційної роботи підтверджується порівнянням результатів математичного моделювання з експериментальними даними натурних випробувань.

Практичне значення. Розроблені практичні рекомендації щодо вибору оптимальних параметрів сигналів управління призначені для використання на судах з єдиними електроенергетичними системами в процесі їх експлуатації. Для кожного судна цього типу можна вибрати (з рекомендованих) найкраще управління, яке сприяє безпеці і надійності виконання маневрених операцій. Оптимальні параметри (з рекомендованих в дисертації) сигналів управління слід закладати в автоматизовану систему управління ГЕЕУ. При необхідності, більш точні результати для кожного конкретного електрохода можна отримати за допомогою запропонованих в роботі математичної моделі й методу оптимізації.

Методи розрахунку та оптимізації управління ГЕЕУ можуть бути використані й при проектуванні гребних електроенергетичних установок. За їх допомогою вже на початкових етапах проектування, в умовах недостатньої інформації, з'являється можливість оцінювати маневрені властивості електроходів.

Результати дисертації впроваджені:

– у Морському Інженерному Бюро в проектах пасажирських суден PV09, PV300VD як рекомендації по оцінці маневрених характеристик судових пропульсивних комплексів, оптимізації їх параметрів, пошукам оптимальних законів управління пропульсивними комплексами в екстремальних ситуаціях (Україна, м. Одеса, акт впровадження за 2018 рік);

– на електроході «Дунай» ТОВ «Компанія «Нові Технології-Україна» як пропозиції по вдосконаленню алгоритму управління гребними електродвигунами (Україна, м. Одеса, акт впровадження за 2018 рік).

Теоретичні результати дисертаційного дослідження використовуються у навчальному процесі Одеського національного морського університету: при проведенні лекційних, лабораторних і практичних занять з дисциплін: «Суднові

автоматизовані електроенергетичні системи» «Автоматизовані гребні електричні установки», «Комбіновані електромеханічні комплекси»; при дипломному проектуванні у магістрів з суднової електромеханіки (акти впровадження за 2018 рік).

ABSTRACT

Chernikov P.S. Optimal control of electric ships` propelling electric plants during manoeuvres. – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.22.20 –Operation and repair of vehicles. – Odessa National Maritime University. – Odesa, 2019.

The dissertation is devoted to the search for optimal parameters of control signals for propelling electric plant, which provide the best manoeuvring quality of electric ship with an indivisible ship electric power system.

A specified mathematical model of transient regimes of electric ship's propulsion complex is developed. It includes heat engines, synchronous generators, electric power converters, propulsion motors, propellers, rudder, ship's hull. The model is universal. It covers the vast majority of modern and promising electric ships with a traditional type of propulsors. It allows calculating the current values of the basic regime indices and assessing the quality indices of maneuvering.

The model is made in relative units. Dimensionless parameters of the complex are obtained. It is these parameters that influence the main maneuvering quality indices. The adequacy of the suggested specified mathematical model and the developed computation method based on it were confirmed. To do this, the results of mathematical modeling for a real electric ship were compared with the data obtained in the course of field experiments conducted by other researchers.

The mathematical description of a generator unit, as an integral part of an indivisible ship's propulsion complex, makes it possible to calculate the dynamic operation modes of electric power sources during electric vessels' maneuvering. There is an opportunity to design the electric ships' propulsion power plant according

to the final result – according to the indices characterizing the vessel and its maneuvering properties. The use of a system of dimensionless units provides a generality to the results obtained. Electric ships with equal values of dimensionless parameters will have correspondingly the same values (in relative units) of maneuvering quality indices.

Numerical calculations of transient regimes of propelling electric plant at maneuvers and the processing of their results allowed us to analyze the influence of changing the values of the electric ships' parameters on selected quality indices. The parameters with significant influence were identified on the basis of the analysis results. The degree of influence of each parameter on the corresponding quality index is represented by polynomial dependencies with contributions to each parameter. The influence of other parameters is unessential and they can be assumed to be invariable in the future.

Significant parameters, among all the parameters influencing the quality indices of electric ships' propelling electric plant, were revealed. This enables us to identify the objective laws of the processes under consideration, and in the future to reduce the amount of computing work. The proposed analytical dependences show the ways to improve the quality of transient processes of propelling electric plant at the earliest stages of design.

The parameters of the complexes that significantly affect the optimality criteria are revealed. Optimization calculations have been carried out and the optimal control signals of the propulsion motors during electric ships' manoeuvres have been found for various combinations of the values of these parameters. Optimization is carried out by the criterion of the minimum braking distance and by the criterion of minimum energy consumption. The results are presented in an analytical form and in a graphical form. The effectiveness of the proposed control signals is illustrated.

The method of searching for the optimal control signals of the propulsion motors is constructed according to the system principle. This allows us to find the control signals of the propulsion motors by the final result – by the indices of electric ships' maneuverability. The proposed recommendations cover a wide class of vessels

with electric motion.

The proposed optimal control for propulsion motors can be used in the operation of propulsion power plants. The best parameters of the control signal can be selected and incorporated into the control system for any particular electric ship of the considered class, depending on the quality of maneuvering. In particular, the optimal control signal for propulsion motors providing electric ship's minimum braking distance or minimum energy consumption for maneuvering can be chosen.

Keywords: propelling electric plants; maneuvering properties of electric ships; optimal control by ships' indices.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Статті в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

- [1] В.А. Яровенко, А.Е. Подлях, и П.С. Черников, "Математическая модель переходных режимов работы гребных электродвигателей", *Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал*, № 1, с. 59-68, 2010.
- [2] В.А. Яровенко, А.Е. Подлях, и П.С. Черников, "Моделирование переходных режимов работы синхронных генераторов судов с электродвижением", *Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал*, №2, с. 49-57, 2011.
- [3] В.А. Яровенко, А.Е. Подлях, и П.С. Черников, "Математическая модель синхронного генератора в составе пропульсивного комплекса электрохода", *Вісник Одеського національного морського університету*, № 33, с. 134-143, 2011.
- [4] Черников П.С., "Исследование переходных режимов генераторных агрегатов пропульсивных комплексов электроходов", *Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал*, №3, с. 40-49, 2011.

- [5] В.А. Яровенко, Е.И. Зарицкая и П.С. Черников, "Оценка маневренных характеристик электроходов на начальных стадиях их проектирования", *Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Електричні машини та електромеханічне перетворювання енергії», №1 (1223), с. 57-63, 2017.*
- [6] В.А. Яровенко и П.С. Черников, "Метод расчета переходных режимов гребных электроэнергетических установок электроходов", *Електротехніка і електромеханіка, №6, с. 32-41, 2017. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.05.*
- [7] П.С. Черников, В.А. Яровенко и Е.И. Зарицкая, "Влияние параметров электроходов на показатели качества работы электроэнергетических установок при маневрировании", *Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Електричні машини та електромеханічне перетворювання енергії», № 5 (1281), с. 46-54, 2018.*
- [8] В.А. Яровенко, П.С. Черников, Р.А. Варбанец, и Е.И. Зарицкая, "Оптимальное управление гребными электродвигателями электроходов при реверсировании", *Електротехніка і електромеханіка, №6, с. 38-46, 2018. doi: 10.20998/2074-272X.2018.6.05.*

Праці апробаційного характеру й роботи, які додатково відображають результати дисертації

- [9] В.А. Яровенко, А.Е. Подлях, и П.С. Черников, "Оптимальное управление гребными электродвигателями судов с электродвижением", на *IX Межд. науч.-техн. конф. Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах*, Севастополь, 2010.
- [10] В.О. Яровенко, і П.С. Черніков, "Оптимальне керування гребними електродвигунами суден з електрорухом", на *64-та наук.-техн. конф. проф.-викл. складу ОНМУ*, Одеса, 2011, с. 109-111.

- [11] В.О. Яровенко і П.С. Черніков, "Математична модель синхронного генератора в складі пропульсивного комплексу електрохода", на *64-та наук.-техн. конф. проф.-викл. складу ОНМУ*, Одеса, 2011, с. 111-113.
- [12] П.С. Черніков, "Дослідження перехідних режимів генераторних агрегатів пропульсивних комплексів електроходів" на *65-та наук.-техн. конф. проф.-викл. складу ОНМУ*, Одеса, 2012, с. 77-78.
- [13] В.А. Яровенко, и П.С. Черников, "Системный подход к поиску законов управления ГЭД судов с электродвижением", на *IV между. науч.-техн. конф. Новейшие технологии в электроэнергетике*, Харьков, 2012, с. 89-90.
- [14] В.А. Яровенко, и П.С. Черников, "Управление гребными электрическими установками электроходов при различных критериях оптимальности", на *XIII между. науч.-техн. конф. Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах*, Севастополь, 2013.
- [15] В.О. Яровенко, і П.С. Черніков, "Математична модель перехідних режимів гребних електричних установок у складі суднових пропульсивних комплексів", на *Міжн. симп. Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки (SIEMA '2017)*, Харків, 2017.
- [16] В.О. Яровенко, і П.С. Черніков, "Оптимальне управління гребною електричною установкою електрохода при маневруванні на прямому курсі", на *Міжн. симп. Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки (SIEMA '2018)*, Харків, 2018.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	12
ВСТУП	13
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	21
1.1 Основні етапи розвитку наукових досліджень	21
1.2 Обґрунтування напрямку дослідження	30
2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ І МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ ГРЕБНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК У СКЛАДІ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ ЕЛЕКТРОХОДІВ	34
2.1 Структурна схема пропульсивного комплексу електрохода.....	34
2.2 Математичний опис перехідних і сталих режимів роботи.....	38
2.2.1 Тепловий двигун і регулятор швидкості його обертання.....	38
2.2.2 Синхронний генератор і система автоматичного регулювання напруги.....	39
2.2.3 Перетворювач електроенергії.....	44
2.2.4 Гребний електродвигун.....	44
2.2.5 Управління електроенергетичною установкою.....	47
2.2.6 Гребні гвинти	48
2.2.7 Корпус електрохода.....	50
2.3 Способи дослідження перехідних і сталих режимів роботи	54
2.4 Експериментальна перевірка результатів теоретичних досліджень ...	56
2.5 Короткі висновки	61
3 ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ ЕЛЕКТРОХОДІВ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ МАНЕВРІВ	62
3.1 Постановка завдання.....	62
3.2 Методи дослідження.....	69
3.3 Результати досліджень	74
3.4 Практичне застосування.....	79
3.5 Короткі висновки	82

	11
4 ОПТИМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ ГРЕБНИМИ ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ ЕЛЕКТРОХОДІВ НА МАНЕВРАХ	83
4.1 Стан питання, що розглядається	83
4.2 Метод рішення задачі	84
4.3 Оптимальне управління при реверсуванні.....	89
4.3.1 Оптимальне управління при реверсуванні. Критерії оптимальності.....	89
4.3.2 Оптимальні параметри сигналів управління.....	90
4.4 Оптимальне управління при криволінійному русі	95
4.4.1 Управління пропульсивним комплексом при криволінійному русі.....	95
4.4.2 Оптимальні сигнали управління при циркуляції.....	97
4.5 Оптимальне управління при екстремому маневруванні	99
4.5.1 Постановка задачі	99
4.5.2 Оптимальне управління при екстремому реверсі ГЕД	101
4.6 Практичне використання отриманих рекомендацій.....	103
4.7 Вплив зміни навантаження суднової мережі на оптимальне управління ГЕД електроходів з ЄЕЕС	106
4.8 Короткі висновки	113
ВИСНОВКИ.....	114
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	118
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача	129
ДОДАТКИ Б – Д Акти використання результатів дисертації.....	133
ДОДАТОК Е Матриця випадкового балансу.....	137
ДОДАТОК Ж Матриця повного факторного експерименту.....	139
ДОДАТОК И Рекомендації по оптимальному управлінню гребними електроенергетичними установками електроходів	140

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ГА – генераторний агрегат;

ГЕД – гребний електричний двигун;

ГЕУ – гребна електрична установка;

ГЕЕУ – гребна електроенергетична установка;

ЄЕЕС – єдина електроенергетична система;

ПФЕ – повний факторний експеримент;

СГ – синхронний генератор;

ТД – тепловий двигун;

ЧП З АІН – частотний перетворювач з автономним інвертором напруги.

ВСТУП

В останні десятиліття у світовому суднобудуванні істотно зріс інтерес до застосування електроруху на судах. Це пов'язано з тими незаперечними перевагами, які мають електроходи в порівнянні із суднами з безпосередньою передачею крутного моменту первинних двигунів на гребні гвинти. До переваг експлуатаційного характеру відносяться: підвищена надійність, простота й широкі можливості дистанційного управління, економічність при роботі на «часткових» режимах, високі маневрені якості.

У теорії й практиці електроруху все більше уваги приділяється електроходам з єдиною електроенергетичною системою (ЄЕЕС). Така установка, забезпечуючи живленням і гребну електричну установку (ГЕУ), і загальносуднові споживачі електроенергії, має істотні переваги перед автономними системами електроруху. Найбільшою мірою ці переваги проявляються на судах, у яких є потужні споживачі, що працюють у режимі, роздільному в часі від системи електроруху. Застосування єдиної електроенергетичної системи дозволяє: скоротити кількість генераторних агрегатів, зменшити масогабаритні характеристики джерел електроенергії, знизити витрати палива й шкідливих викидів у навколишнє середовище, поліпшити компоновку енергетичного обладнання, підвищити надійність суднової електроенергетичної установки.

Разом із тим, той факт, що загальносуднові споживачі електроенергії отримують живлення від загальних (із ГЕУ) шин суднової електростанції, істотно підвищує вимоги до якості електроенергії. Відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO 8528/5, вони визначаються, зокрема: частотними характеристиками, характеристиками напруги.

Одним з основних аргументів на користь застосування електроруху є висока маневреність електроходів. Саме високі маневрені властивості (а це – незаперечна перевага електроруху перед традиційним типом приводу суднових

рушіїв) у першу чергу сприяють безпеці виконання суднами маневрених операцій. Не дивно при цьому, що питанням управління гребними електроенергетичними установками (ГЕЕУ) електроходів на маневрах приділяється особлива увага.

Актуальність теми.

Пошук оптимальних параметрів сигналів управління гребними електроенергетичними установками, які забезпечують найкращі маневрені властивості електроходів є актуальною науково-практичною задачею. У той же час, ГЕЕУ – найбільший за потужністю споживач електроенергії. Перехідні режими її роботи неминуче позначаються на показниках якості електроенергії суднової мережі. Тому, при оцінці якості управління слід розглядати як показники маневрування судна, так і показники якості роботи ГЕЕУ й показники якості суднової електромережі.

У електроходів тривалості перехідних процесів у гребній електроенергетичній установці на маневрах порівнянні з тривалістю перехідних процесів руху самого судна. Тому, при аналізі маневрених режимів гребну електроенергетичну установку слід розглядати в єдності з усіма складовими частинами суднового пропульсивного комплексу, який включає в себе і теплові двигуни, і ГЕУ, і гребні гвинти, і корпус судна.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота відповідає: пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки, та наукових досліджень і науково-технічних розробок в області «Енергетика та енергоефективність. Технології електроенергетики», затверджених Постановою Кабінету Міністрів України № 942 від 7 вересня 2011 р.; галузевій програмі забезпечення безпеки судноплавства на 2014-2018 роки, затвердженою наказом Міністерства інфраструктури України від 26 червня 2013 року № 426; державній програмі «Транспортна стратегія України на період до 2030 року» (розпорядження Кабінету Міністрів України від 30.05.2018 р., № 430-р).

Дисертаційна робота пов'язана з науково-дослідною тематикою кафедри «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики» Одеського національного морського університету відповідно до планів науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки, Департаменту державної політики в галузі річкового та морського транспорту.

Мета і задачі дослідження.

Метою дослідження є пошук оптимального управління гребними електроенергетичними установками суден з ЄЕЕС, яке має забезпечити найкращі маневрені характеристики електроходів.

Досягнення поставленої мети вимагає вирішення комплексу взаємопов'язаних задач:

- розробка математичної моделі й методу розрахунку перехідних режимів роботи гребних електроенергетичних установок суден з ЄЕЕС у складі єдиного суднового пропульсивного комплексу;

- виявлення єдиних узагальнених показників якості виконання маневрів, розробка методу їх розрахунку, і виявлення параметрів пропульсивних комплексів, які суттєво впливають на маневрені властивості електроходів та на показники якості електроенергії суднової електромережі;

- удосконалення процедури формування сигналів управління ГЕЕУ й удосконалення методів оптимізації управління гребними електроенергетичними установками на маневрах, стосовно до об'єкта дослідження та запропонованих критеріїв оптимальності;

- виявлення впливу оптимального управління на показники якості суднової мережі, і виявлення впливу зміни навантаження суднової мережі на оптимальні параметри сигналів управління під час маневрування;

- розробка рекомендацій з оптимального управління гребними електроенергетичними установками для широкого класу електроходів.

Об'єктом дослідження є процеси, які протікають у гребних електроенергетичних установках електроходів при маневруванні.

Предметом дослідження є методи розрахунку й оптимізації управління гребними електроенергетичними установками електроходів на маневрах.

Методи дослідження.

1. В основі побудови узагальненої математичної моделі перехідних режимів роботи пропульсивних комплексів електроходів покладений динамічний аналіз й індуктивно-дедуктивний підхід. Вони дозволили отримати єдиний математичний опис перехідних режимів ГЕЕУ у складі пропульсивних комплексів для широкого класу електроходів.

2. Розрахунки перехідних режимів роботи виконані чисельними розв'язуваннями системи диференціальних та алгебраїчних рівнянь в системі – `q64`; візуалізація (у вигляді графіків) виконана у середовищі `matlab`.

3. Методи активного планування експериментів, регресійного і дисперсійного аналізу, дозволили виявити узагальнені безрозмірні параметри пропульсивних комплексів, які найбільш суттєво впливають на основні показники якості виконання маневрів і проранжувати ці параметри за ступенем значущості.

4. В основі оптимізаційних розрахунків покладені методи пошуку глобальних оптимумів мультимодальних цільових функцій зі складною топографією; локальні мінімуми відшукувалися на базі методів локальних спусків, що не використовують похідних.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. *Вперше* знайдено для електроходів з єдиною електроенергетичною системою оптимальні параметри сигналів управління ГЕЕУ на маневрах. На відміну від існуючого підходу до управління гребними електроенергетичними установками, в якості критеріїв оптимальності використані показники, які характеризують маневрені характеристики судна, як старшої системи. Рекомендації сприяють підвищенню безпеки виконання маневрених операцій з забезпеченням при цьому допустимих навантажень на електроенергетичну установку й відхилень показників якості електроенергії суднової мережі. Вони охоплюють широкий клас суден з електрорухом.

2. *Вдосконалено* математичну модель і метод розрахунку на її основі перехідних режимів ГЕЕУ як складової частини єдиного суднового пропульсивного комплексу, що дозволяє, на відміну від існуючих моделей, розраховувати поточні значення основних режимних показників комплексу та оцінювати якість виконання маневрів з урахуванням динамічних режимів роботи електроенергетичної установки. Запропонований математичний опис дає можливість враховувати вплив перехідних режимів ГЕУ на параметри електроенергії суднової мережі й враховувати вплив зміни навантаження на параметри сигналів управління.

3. *Вдосконалено* склад комплексу узагальнених показників якості виконання маневрів, і виявлені безрозмірні параметри комплексів, які суттєво впливають на маневрені властивості електроходів, динамічні показники роботи ГЕЕУ та якість електроенергії суднової електромережі. Це висвітлює можливі шляхи підвищення маневрених характеристик електроходів.

4. *Отримали подальший розвиток* методи оптимізації управління судновими електроенергетичними установками на маневрах. Доповнення алгоритмів пошуку оптимальних рішень, які запропоновані в роботі, дозволяють підвищити точність і суттєво скоротити процедури досягнення оптимальних рішень.

Достовірність основних наукових висновків і рекомендацій дисертаційної роботи підтверджується порівнянням результатів математичного моделювання з експериментальними даними натурних випробувань.

Практичне значення. Розроблені практичні рекомендації щодо вибору оптимальних параметрів сигналів управління призначені для використання на судах з єдиними електроенергетичними системами в процесі їх експлуатації. Для кожного судна цього типу можна вибрати (з рекомендованих) найкраще управління, яке сприяє безпеці і надійності виконання маневрених операцій. Оптимальні параметри (з рекомендованих в дисертації) сигналів управління слід закладати в автоматизовану систему управління ГЕЕУ. При необхідності, більш точні результати для кожного конкретного електрохода можна отримати

за допомогою запропонованих в роботі математичної моделі й методу оптимізації.

Методи розрахунку та оптимізації управління ГЕЕУ можуть бути використані й при проектуванні гребних електроенергетичних установок. За їх допомогою вже на початкових етапах проектування, в умовах недостатньої інформації, з'являється можливість оцінювати маневрені властивості електроходів.

Результати дисертації впроваджені:

– у Морському Інженерному Бюро в проектах пасажирських суден PV09, PV300VD як рекомендації по оцінці маневрених характеристик суднових пропульсивних комплексів, оптимізації їх параметрів, пошукам оптимальних законів управління пропульсивними комплексами в екстремальних ситуаціях (Україна, м. Одеса, акт впровадження за 2018 рік);

– на електроході «Дунай» ТОВ «Компанія «Нові Технології-Україна» як пропозиції по вдосконаленню алгоритму управління гребними електродвигунами (Україна, м. Одеса, акт впровадження за 2018 рік).

Теоретичні результати дисертаційного дослідження використовуються у навчальному процесі Одеського національного морського університету: при проведенні лекційних, лабораторних і практичних занять з дисциплін: «Суднові автоматизовані електроенергетичні системи» «Автоматизовані гребні електричні установки», «Комбіновані електромеханічні комплекси»; при дипломному проектуванні у магістрів з суднової електромеханіки (акти впровадження за 2018 рік).

Особистий внесок автора. Всі положення, що винесені на захист, отримані автором особисто. Дисертація є самостійним дослідженням і оформлена у вигляді рукописної монографії, що написана автором особисто. У роботах [73], [74], [75] здобувач брав участь у розробці математичної моделі асинхронного гребного електродвигуна, формуванні висновків. У статті [68] здобувачем розроблена математична модель синхронного генератора на основі рівнянь Парка-Горева як складова єдиної математичної моделі суднового

пропульсивного комплексу. У спільній роботі [69] внесок дисертанта – розробка уточненої математичної моделі синхронного генератора, розрахунок (за допомогою моделі) перехідних процесів синхронних генераторів реального електрохода й формування висновків. У роботах [70], [71], [72] здобувачем сформована мета, розроблена математична модель генераторних агрегатів пропульсивних комплексів електроходів, експериментально проаналізовано використання розробленої моделі, сформовані висновки.

У статті [88] дисертант брав участь у побудові аналітичних моделей показників якості, проведенні експерименту по оцінці показників якості маневрування й формуванні висновків. У роботах [63], [64] здобувач розробив уточнену математичну модель перехідних режимів гребних електроенергетичних установок і метод розрахунку на її основі маневрених режимів роботи суден з електрорухом, провів зіставлення математичного моделювання з результатами натурних експериментів для підтвердження її адекватності, сформував висновки. У статті [89] здобувач розробив аналітичні моделі показників якості маневрування електроходів і електроенергії суднової мережі, експериментально оцінив вплив параметрів на показники якості маневрування. У роботах [97]–[100] дисертант провів оптимізаційні розрахунки й знайшов оптимальні параметри сигналів управління ГЕУ, проілюстрував ефективність використання оптимального управління.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові положення й результати дисертації доповідалися, обговорювалися та отримали позитивні відгуки на: міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів у електроенергетичних системах», Севастополь, 2010 р., 2013 р.; науково-технічній конференції «Новітні технології в електроенергетиці», Харків, 2012 р.; міжнародних симпозіумах «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки (SIEMA'2017, SIEMA'2018)», Харків, 2017 р., 2018 р.; щорічних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу ОНМУ.

Публікації. Основний зміст роботи відображено у 8 публікаціях у спеціалізованих збірниках наукових праць і наукових журналах, що входять до переліку рекомендованих ВАК України (у тому числі, 4 – в наукових виданнях, які входять до переліку міжнародних наукометричних баз, з них 2 – у наукових виданнях, які входять до наукометричної бази Web of Science); у 8 доповідях, що опубліковані як тези праць міжнародних наукових конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить 175 с., у тому числі 114 с. основного тексту, анотації – на 8 с., 22 рисунки (з них 5 – на повну сторінку) та 19 таблиць (з них 1 – на повну сторінку), 7 додатків на 47 сторінках. Список використаних джерел становить 102 найменування на 11 сторінках. У додатках наведені акти впровадження результатів дисертації й рекомендації по оптимальному управлінню ГЕЕУ електроходів.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Основні етапи розвитку наукових досліджень

Гребна електроенергетична установка сучасного електрохода представляє собою складну електромеханічну систему, яка є невід'ємною частиною єдиного суднового пропульсивного комплексу. У склад комплексу входять: теплові двигуни, електричні машини й апарати, перетворювачі енергії, рушії та корпус судна.

Найважливішими показниками якості роботи ГЕЕУ в складі суднових пропульсивних комплексів є маневрені якості. Для великого класу суден вони входять у число основних показників, за якими оцінюються гідності й недоліки того чи іншого судна. Важливість оцінки маневрених якостей зростає вдвічі, коли мова йде о розробках перспективних варіантів суден з електрорухом. У цих випадках можливість обґрунтованого прогнозування їх маневрених якостей, покращення тих чи інших показників сприяє прийняттю обґрунтованого техніко-економічного рішення.

Відмінною особливістю роботи електроходів на маневрах є те, що тривалості перехідних процесів у гребній електроенергетичній установці виявляються сумірними з тривалістю перехідних процесів руху самого судна. Через те, традиційні припущення про сталість частоти обертання гребних гвинтів при русі судна на маневрах (так само як і навпаки) не прийнятні. Всі складові частини комплексу електрохода знаходяться в тісному взаємозв'язку. Лише при вирішенні частинних задач дозволено розглядати який-небудь елемент єдиного пропульсивного комплексу у відриві від інших. (Це, зокрема, відноситься до сталого руху). При аналізі ж несталих режимів гребні електроенергетичні установки слід розглядати в єдності з усіма іншими елементами пропульсивного комплексу, що включає в себе СЕЕУ, гребні гвинти і корпус судна. Лише в такій постановці можна провести ґрунтовний

аналіз їх маневрених режимів роботи й оцінити маневрені властивості електрохода.

Засновником теорії дослідження динаміки спільної роботи елементів пропульсивного комплексу був професор В.І. Небеснов. Він в своїх працях [1]-[4] розробив основи теорії й методів розрахунку перехідних та усталених режимів руху комплексу «корпус судна – гвинти – двигуни» в самих різних експлуатаційних режимах.

В останні роки ряд робіт у цьому напрямку присвячений дослідженням:

– оптимального управління гребними електроенергетичними установками в складі пропульсивних комплексів електроходів на маневрах – В.О. Яровенко [5]-[11];

– проектування суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів – В.В. Будашко [12] – [14], О.О. Оніщенко [13] – [14];

– динаміки роботи первинного двигуна в складі пропульсивного комплексу – П.С. Суворова [15] – [16], С.І. Горба [17] – [18];

– перехідних процесів у суднових електроенергетичних системах Л.Н. Токарева [19] – [20].

Серед зарубіжних вчених, які займаються питаннями математичного моделювання, експлуатації гребних електричних установок і дизель-електричних пропульсивних систем слід виділити – J.F. Hansen [21] – [23], A.K. Adnane [22] – [24], T.I. Fossen [22] – [23], D. Radan [25] – [26].

Новітні розробки енергозберігаючих гібридних електричних пропульсивних комплексів належать таким всесвітньо відомим фірмам-гігантам, як – ABB-Marine [27], Rolls-Royce-Marine [28], Wartsila [29], MAN [30] – [32], Siemens [33], та іншим.

Інтерес до цього напрямку досліджень незмінно росте, так як світові тенденції розвитку суднобудівництва спрямовані на зниження шкідливих викидів у навколишнє середовище, збільшення енергоефективності й місткості; надійності, і, як слід, маневреності та універсальності більшості типів суден,

збільшенню терміну їх експлуатації. Електричні пропульсивні установки в цьому плані стають ще більш привабливими.

Нарівні з поширеним використанням систем електроруху з гвинтокермовими гідродинамічними комплексами типу Azipod, знаходять застосування гребні електроенергетичні установки з традиційним типом рушіїв – гвинтами фіксованого кроку чи регульованого кроку.

Сучасними електроходами з традиційним типом рушіїв (не кажучи про судна, які знаходяться в експлуатації), є:

- в першу чергу, судна-криголами льодових класів ЛК2 – ЛК4 (прокладання шляхів у льодах від 2 м до 4 м за глибиною), гребні гвинти яких працюють в надважких умовах;

- круїзні судна (наприклад, – лайнери від судноплавних компаній MSC, Costa, Princess [34]);

- великотоннажні танкери-газовози зрідженого природного газу (LNG) з системою подвійного роду палива (Dual-Fuel) [35] – [40], які відрізняються гнучкістю щодо швидкості й дальності ходу, типу палива. Вони починають освоювати й арктичні широти, для чого повинні володіти якостями криголама. Термін служби таких танкерів розрахований на 30 років [41];

- та інші.

Найважливішим специфічним складовим елементом пропульсивних комплексів суден з електрорухом є гребна електрична установка. ГЕУ є «проміжною ланкою» між первинним двигуном і гребним гвинтом. Вона одночасно і виконує роль «буфера», згладжуючи й «ковтаючи» динамічні навантаження, які виникають в системі, і сама є джерелом перехідних процесів у всьому пропульсивному комплексі. Виникнення перехідних процесів у ній обумовлено, з одного боку, зміною режимів роботи всіх силових елементів гребної установки відповідно до характеру виконуваного маневру; з іншого – зміною за час маневру кінетичної енергії обертючих мас гребного електродвигуна, лінії валопроводу й гребного гвинта з приєднаними масами

води, режимів роботи теплових двигунів, електромагнітної енергії в електричних ланцюгах.

Дослідження перехідних режимів роботи гребних електроенергетичних установок мають давню історію. У численних наукових працях досить глибоко розглядаються питання аналітичних і машинних методів розрахунку основних маневрених режимів – пуску, зупинки, реверса гребних електродвигунів. Великий вклад у цей напрямок наукових досліджень внесли праці В.Т. Касьянова, Н.М. Хомякова, В.І. Полонського та А.Б. Хайкіна.

Сучасні гребні електричні установки будуються на основі асинхронних частотно-керованих і на базі вентильних гребних електродвигунів. У той же час, в експлуатації знаходиться велика кількість суден, енергетичні установки яких виконані по системі змінно-постійного струму. У зв'язку з цим, дуже актуальними є: як питання проектування сучасних електроходів із високими маневреними властивостями, так і завдання вдосконалення управління гребними енергетичними установками суден, що знаходяться в експлуатації. Причому, необхідність в оцінці маневрених властивостей електроходів, що будуються, виникає вже на початкових стадіях їх проектування, а підвищення ефективності виконання маневрових операцій існуючих суден безсумнівно актуально на будь-якій стадії їх життєвого циклу.

Проблеми використання того чи іншого типу двигуна в гребних електроприводах електроходів розглянуті в працях А.Б. Хайкіна [42], [43], Б.А. Горбунова, А.С. Савіна, В.В. Сержантова, Є.Б. Айзенштадта, Ю.М. Гілеровіча [44], [45]. Аналіз режимів роботи вентильних двигунів виконаний в роботах [46], [47], синхронних – [48], [49], асинхронних – [50]-[51]. Кожен із розглянутих типів ГЕД перспективний для гребного електропривода.

У сучасних гребних електричних установках змінного струму застосовуються статичні перетворювачі частоти (СПЧ) з проміжною ланкою постійного струму, з проміжною ланкою змінного струму підвищеної частоти й з безпосереднім зв'язком [25], [52]. Кожен тип перетворювача має свої переваги

й недоліки як конструктивного, так і техніко-економічного характеру. Використання того чи іншого типу СПЧ залежить від багатьох факторів, починаючи від величини встановленої потужності енергетичної установки й типу гребного електродвигуна, та закінчуючи вибором системи частотного управління [53].

В останні роки в теорії й практиці електроруху все більша увага приділяється електроходам з єдиною судною електроенергетичною системою [27] – [30], [33]. Така установка забезпечує живленням і систему електроруху (гребну електричну установку), і загальносуднові споживачі (рис. 1.1).

Як показує практика, ЄЕЕС володіють рядом незаперечних переваг перед автономними системами електроруху. Найбільшою мірою ці переваги проявляються на: суднах, у яких є потужні споживачі, що працюють у режимі, роздільному в часі від системи електроруху; на судах, що працюють у режимі позиціонування. Застосування єдиних систем електроруху дозволяє: скоротити кількість генераторних агрегатів, зменшити масогабаритні характеристики джерел електроенергії, знизити витрати енергії і шкідливих викидів у навколишнє середовище, поліпшити компонування енергетичного обладнання (звільнивши при цьому додаткові площі), підвищити надійність суднової електроенергетичної установки.

Разом з тим, той факт, що загальносуднові споживачі електроенергії отримують живлення від загальних шин суднової електростанції, істотно підвищує вимоги до якості електроенергії. Відповідно до вимог міжнародного стандарту [54], ця якість визначається наступними основними показниками:

- частотними характеристиками;
- характеристиками напруги;
- пусковими характеристиками дизель-генераторів;
- характеристиками паралельної роботи дизель-електричних агрегатів.

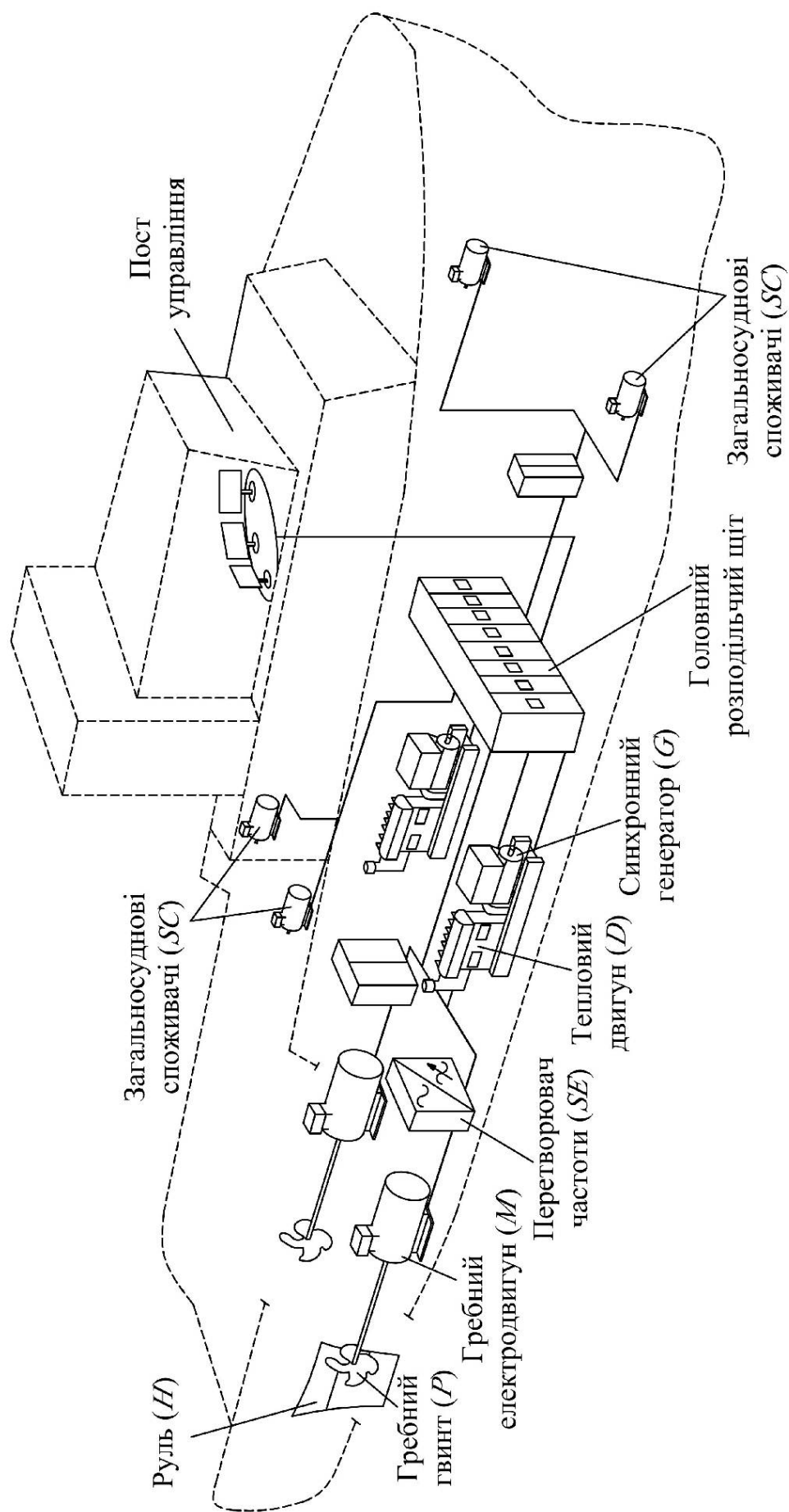


Рисунок 1.1 – Пропульсивний комплекс електрохода з єдиною електроенергетичною системою

Гребна електрична установка – найбільший по потужності споживач, тому перехідні режими її роботи неминуче позначаються на параметрах судової мережі. Виходячи з цього, показники якості маневрування і показники якості електроенергії (на маневрах) повинні розглядатися як єдиний комплекс показників роботи ЄЕЕС. Підвищення маневреності електроходів із забезпеченням при цьому відповідної [54] якості електроенергії є досить актуальним завданням.

Сучасний електрохід – це високоекономічне судно, здатне забезпечити вимоги, що пред'являються до нього з мінімальними витратами часу й коштів. Запорукою тому є правильно спроектована електроенергетична установка з раціонально функціонуючою системою управління. Іншими словами, на сучасному етапі розвитку науки й техніки величезна увага повинна бути приділена (і приділяється) питанням оптимального проектування пропульсивних комплексів та оптимального управління електроенергетичними установками суден з електрорухом.

Вирішенню цих проблем присвячено велике число робіт. Питання параметричної оптимізації окремих систем гребних установок електроходів розглянуті в роботах І.М. Болвашенкова, В.В. Романовського, І.Л. Шегала [55], Н.В. Головні [56], А.І. Гузанова, А.А. Ігнатова, І.А. Краснова, А.В. Саушева [57], В.С. Лейкіна, М.А. Семенова [58], А.І. Ракова. В основному, в них розглядається тільки гребна електрична установка судна. В якості критеріїв оптимальності прийняті показники, що характеризують роботу гребної електричної установки або системи її автоматичного регулювання.

У роботах Ю.А. Зубарева, А.Д. Собашнікова, В.А. Юхновича [59], О.М. Аронова, Н.А. Веселкова, Ю.В. Неклюдова [60] розглядаються питання параметричної оптимізації електроенергетичних установок суден і систем автоматичного управління ними на основі методів активного планування експериментів. Розглянуті методи цікаві й ілюстративні. Але, разом із тим, в їх основі лежать методи градієнтного спуску, застосування яких для вирішення задач проектування складних електромеханічних систем проблематично, а

використання наближених математичних моделей показників, що оптимізуються (як це зроблено в зазначених роботах) звужує завдання й призводить до певних втрат інформації.

Однак і по теперішній час всім зазначеним вище роботам властивий серйозний недолік. На практиці під системою електроруху мали й мають на увазі звичайно тільки електричну частину гребної електроенергетичної установки (генератори, гребні електродвигуни, перетворювачі, пульти, пости управління) без первинних двигунів і рушіїв. Зокрема, це чітко представлено в роботах [21], [26], [53], [61]. Основною відмінною особливістю цих та інших ґрунтовних робіт є те, що швидкість руху судна вважається незмінною протягом маневрів, що розглядаються. Таким чином, гребна електрична установка розглядається у відриві від єдиного суднового пропульсивного комплексу. Звичайно, в результаті такого спрощення істотно полегшується аналіз маневрених режимів роботи ГЕУ, але разом із тим, точність одержуваних результатів знижується й, що найголовніше, порушується системний принцип підходу до аналізу режимів роботи суднових електроенергетичних установок. Немає можливості оцінювати ефективність роботи електроенергетичної установки за «кінцевим результатом» – за показниками якості виконання маневру електроходу в цілому.

Другою відмітною особливістю проведених раніше досліджень є те, що переважна їх більшість виконана стосовно конкретних електроходів (в кращому випадку – до конкретних серій електроходів), до конкретних гребних електричних установок. Результати розрахунків, які отримуються за допомогою цих методів, відносяться до конкретних СЕЕУ й не можуть бути поширені на інші електроходи. Це не дозволяє проводити широких обґрунтованих наукових узагальнень. Тим самим знижується наукова цінність результатів проведених досліджень.

У фундаментальній роботі проф. В.О. Яровенка [9] знайдені оптимальні закони управління гребними електродвигунами електроходів при виконанні маневрених операцій. Для цього була розроблена математична модель

перехідних режимів роботи гребної електричної установки в складі єдиного судового пропульсивного комплексу. На підставі моделі розроблені алгоритми розрахунку перехідних режимів і запропонований метод пошуку оптимальних сигналів управління. Для надання спільності результатам розрахунків модель приведена до відносних одиниць. У результаті – виявлено критерії динамічної подібності (безрозмірні параметри) пропульсивних комплексів «теплові двигуни – гребна електрична установка – рушії – кермо – корпус судна». Виявлено можливі діапазони зміни їх значень. Саме ці параметри визначають поточні, по ходу виконання маневру, значення режимних показників всіх складових частин комплексу та безпосередньо впливають на чисельні значення показників якості маневрування. Такий підхід дозволяє надати спільності одержуваним результатам – електроходи з рівними значеннями безрозмірних параметрів будуть мати відповідно однакові значення (у відносних одиницях) показників якості маневрування. Використані в роботі принципи аналізу дозволяють поширювати результати, що отримуються на широкий клас електроходів з традиційним типом рушіїв.

Аналіз роботи [9] дозволив виявити ряд її недоліків:

- при описі процесів, що відбуваються в теплових двигунах гребної електроенергетичної установки, був прийнятий ряд припущень, що не дозволяють контролювати динамічні показники режимів їх роботи;
- математичний опис процесів, що відбуваються в синхронних генераторах, було побудовано на основі векторної діаграми генератора, що також не давало можливості повною мірою оцінити їх динаміку, і приводило до похибок при оцінці динамічних показників роботи ГЕУ;
- немає можливості враховувати при маневруванні вплив перехідних режимів у ГЕУ на роботу загальносуднових споживачів електроенергії.
- запропонований вид сигналів управління по напрузі, як показують результати аналізу, не в повній мірі задовольняє поставленим задачам.

Необхідно удосконалити математичну модель перехідних режимів гребних електроенергетичних установок у складі суднового пропульсивного комплексу і методи оптимізації управління ГЕЕУ.

1.2 Обґрунтування напрямку дослідження

У вступі обґрунтована необхідність підвищення маневрених властивостей електроходів, сформульована головна наукова задача й поставлені допоміжні задачі щодо її розв'язання.

Встановлено, що для підвищення безпеки виконання маневрених операцій і поліпшення економічних показників роботи електроходів на маневрах необхідно оптимізувати управління їх гребними електроенергетичними установками.

Оскільки якість управління ГЕЕУ оцінюється за показниками судна, гребна електроенергетична установка повинна розглядатися сумісно з усіма частинами єдиного суднового пропульсивного комплексу. Це забезпечує системний принцип підходу до аналізу режимів роботи електроенергетичних установок і дає можливість оцінювати ефективність їх роботи за «кінцевим результатом» – за показниками якості виконання маневру електрохода в цілому.

Через те, що в електроходах з єдиною електроенергетичною системою і гребна електрична установка, і загальносуднові споживачі електроенергії отримують живлення від загальних шин суднової електростанції, обидві ці складові частини оказують взаємний вплив одна на одну. Тому, при аналізі маневрених режимів слід оцінювати вплив роботи ГЕЕУ на параметри електроенергії суднової мережі. Потрібен математичний апарат, який дасть змогу знайти оптимальне управління гребними електроенергетичними установками на маневрах з забезпеченням при цьому роботи всіх складових частин силової установки в припустимих режимах і підтримкою якості електроенергії суднової мережі на необхідному рівні.

З'ясовано, що існуючий узагальнений метод розрахунку перехідних режимів ГЕЕУ не враховував динамічні режими роботи теплових двигунів і синхронних генераторів. У зв'язку з цим, не враховувався вплив на показники якості маневрування параметрів теплових двигунів, регуляторів швидкості обертання, системи автоматичного регулювання напруги синхронних генераторів і систем розподілу навантаження між генераторними агрегатами.

Спрощений опис динаміки генераторних агрегатів також не дозволяв оцінити й показники якості електроенергії при виконанні маневрених операцій.

Також з'ясовано, що в процедурі пошуку локальних оптимумів (внутрішніх процедур глобальної оптимізації) – по існуючому методу Нелдера-Міда відсутнє прискорення, що викликає труднощі при проведенні пошуку на викривлених «ярах» і «хребтах» і збільшує кількість обчислень цільової функції.

Обґрунтовано те, що математична модель і метод розрахунку на її основі перехідних режимів ГЕЕУ як складової частини суднового пропульсивного комплексу потребує уточнення опису перехідних процесів в генераторних агрегатах суднової електростанції. Зокрема:

- первинні двигуни мають бути описані рівняннями, які враховують процеси в регуляторах швидкості їх обертання, з можливістю регулювання процесу розподілу активної потужності;
- синхронні генератори мають бути представлені рівняннями Парка-Горєва, з врахуванням можливості розподілу реактивної потужності.

Метою дослідження є пошук оптимальних законів управління гребними електроенергетичними установками суден з ЄЕЕС, які забезпечують найкращі маневрені характеристики електроходів.

Досягнення поставленої мети вимагає вирішення комплексу взаємопов'язаних задач. Технологічна схема наукового дослідження надана на рис. 1.2. Вона включає наступні задачі:

– розробка математичної моделі і методу розрахунку перехідних режимів роботи гребних електроенергетичних установок суден з ЄЕЕС у складі єдиного суднового пропульсивного комплексу;

– виявлення єдиних узагальнених показників якості виконання маневрів, розробка методу їх розрахунку, та виявлення параметрів пропульсивних комплексів електроходів, які значимо впливають на маневрені властивості електроходів та на показники якості електроенергії суднової електромережі;

– удосконалення процедури формування сигналів управління й удосконалення методів оптимізації управління гребними електроенергетичними установками електроходів на маневрах, стосовно до об'єкта та запропонованих критеріїв оптимальності;

– виявлення впливу оптимального управління на показники якості суднової мережі, та виявлення впливу зміни навантаження суднової мережі на оптимальні закони управління під час маневрування;

– розробка рекомендацій з оптимального управління гребними електроенергетичними установками для широкого класу електроходів.

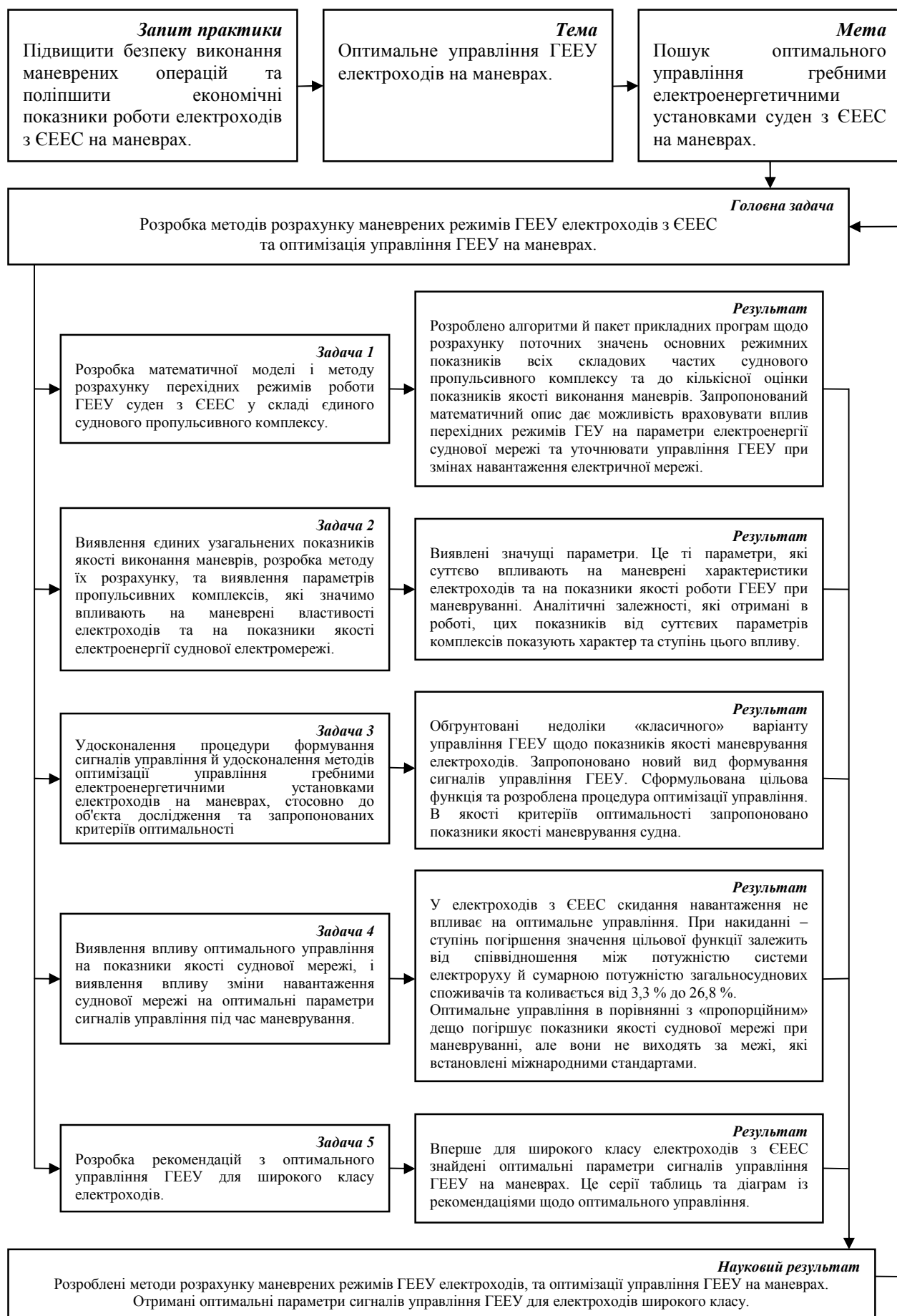


Рисунок 1.2 – Технологічна схема наукового дослідження

2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ І МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ ГРЕБНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК У СКЛАДІ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ ЕЛЕКТРОХОДІВ

2.1 Структурна схема пропульсивного комплексу електрохода

Рішення поставленого завдання проведено стосовно до найпоширенішої системи електроруху – на базі частотно-керованих асинхронних гребних електродвигунів.

Структурна схема гребної електроенергетичної установки «тепловий двигун – синхронний генератор – перетворювач частоти – асинхронний двигун» у складі пропульсивного комплексу електрохода представлена на рис. 2.1. Вона відповідає загальноприйнятому в теорії електроруху варіанту компонування електроенергетичної установки [42], [43], [45] з класичним варіантом гребних електродвигунів. У той же час, відповідно до поставленої мети, а саме – у необхідності вдосконалювання управління гребними електроенергетичними установками за показниками якості виконання маневрених операцій саме судном, у пропульсивний комплекс включені також гребні гвинти, кермо й корпус електрохода.

До складу пропульсивного комплексу, частіше за все, входять два «силових» контури. Тут:

- D – теплові двигуни,
- G – синхронні генератори (СГ),
- SE – частотні перетворювачі електроенергії,
- M – асинхронні гребні електродвигуни (ГЕД),
- P – гребні гвинти,
- H – кермо,
- $КОРПУС$ судна.

На схемі також показані елементи системи автоматичного регулювання й основні параметри, що зв'язують силові блоки та управляючі сигнали:

- DR – регулятори частоти обертання первинного двигуна;

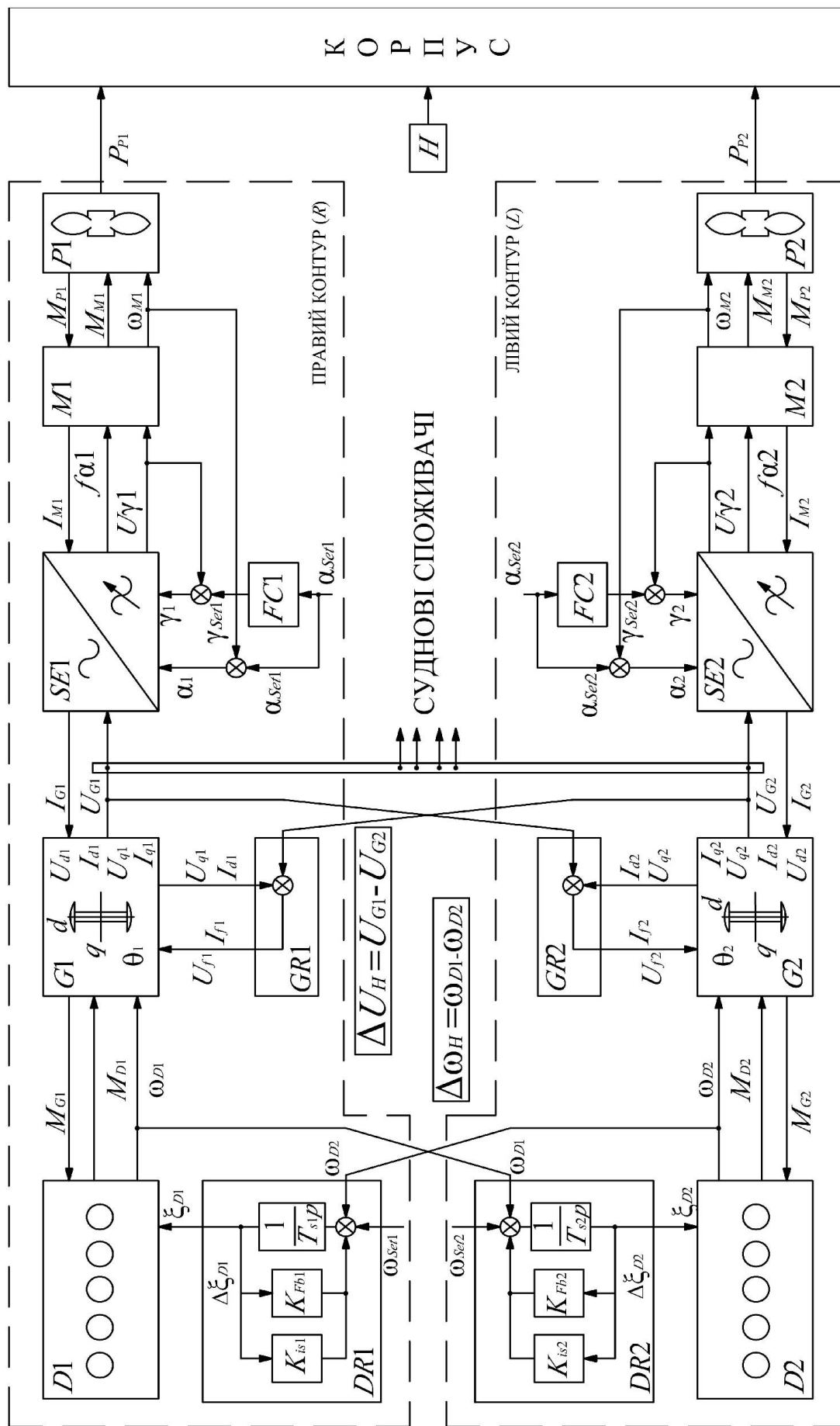


Рисунок 2.1 – Структурна схема пропульсивного комплексу електрохода

- GR – автоматичні регулятори напруги генератора;
- M_D – обертаючий момент теплового двигуна;
- ω_D – кутова швидкість обертання теплового двигуна;
- M_G – момент опору генератора;
- U_d – напруга генератора по поздовжній осі (внутрішня координата);
- U_q – напруга генератора по поперечній осі (внутрішня координата);
- I_d – струм генератора по поздовжній осі (внутрішня координата);
- I_q – струм генератора по поперечній осі (внутрішня координата);
- U_G – напруга на виході генератора;
- ω_{Set} – уставка кутової швидкості обертання регулятора швидкості;
- ξ_D – хід рейки паливного насоса;
- $\Delta\xi_D$ – приріст ходу рейки паливного насоса;
- $1/T_s p$ – ланка сервомотора;
- K_{Fb} – коефіцієнт підсилення ланки жорсткого зворотнього зв'язку;
- K_{is} – коефіцієнт підсилення гнучкого (ізодромного) зворотнього зв'язку;
- U_f – напруга збудження синхронного генератора;
- I_f – струм збудження синхронного генератора;
- I_G – струм синхронного генератора;
- I_M – струм гребного електродвигуна;
- α_{Set} – відносна частота перетворювача (значення, що задається);
- γ_{Set} – відносна напруга перетворювача (значення, що задається);
- α – відносна частота на виході перетворювача (з урахуванням зворотних зв'язків);
- γ – відносна напруга на виході перетворювача (з урахуванням зворотних зв'язків);
- FC – функціональний перетворювач, що формує закон частотного керування $\gamma = f(\alpha)$;
- M_P – момент гребного гвинта;
- P_P – упор гребного гвинта;
- M_M – обертаючий момент гребного електродвигуна;

– ω_M – кутова швидкість обертання гребного електродвигуна.

В якості регуляторів швидкості обертання теплових двигунів застосовуються [17], [19] ізодромні всережимні регулятори непрямої дії. В якості регуляторів напруги синхронних генераторів використовуються [19], [62] комбіновані (по керуючому впливу та по відхиленню величини, що регулюється) регулятори.

Система рівнянь, що описує перехідні режими роботи електроенергетичної установки в складі пропульсивного комплексу електрохода, представлена нижче.

Для додання спільності результатам аналізу модель приведена до відносних одиниць. У результаті цього виявлені критерії динамічної подібності пропульсивних комплексів. Це – безрозмірні параметри системи «теплові двигуни – гребна електрична установка – рушії – корпус судна». Знайдено діапазони зміни значень цих параметрів, що охоплюють більшість серій електроходів із традиційним приводом гребних гвинтів.

Саме ці безрозмірні параметри і визначають поточні значення відносних режимних показників всіх складових частин комплексу на перехідних режимах і чисельні значення основних показників якості маневрування. Такий підхід дозволяє надати спільність одержуваним результатам – електроходи з рівними значеннями безрозмірних параметрів будуть мати відповідно однакові значення (у відносних одиницях) показників якості маневрування. З'являється можливість в узагальненні результатів досліджень. Для кожного електрохода, після розрахунку його безрозмірних параметрів, можна вибрати готове рішення з запропонованих (нижче) рекомендацій.

Відносні значення режимних показників будуть позначатися символом з рисою. (Індекс «0» відповідає значенням режимних параметрів, при роботі електрохода в номінальному сталому режимі).

Наприклад, відносний електромагнітний момент генератора:

$$\overline{M_G} = \frac{M_G}{M_{G0}}. \quad (2.1)$$

(Для спрощення сприйняття матеріалу термін «відносний» надалі в тексті опущений).

Відносний час визначається інакше:

$$T = \frac{v_0}{L} t, \quad (2.2)$$

де v_0 – швидкість судна,

L – довжина судна по конструктивній ватерлінії,

t – поточний час.

Остаточний варіант узагальненої математичної моделі перехідних і сталих режимів роботи пропульсивних комплексів електроходів представлений нижче.

2.2 Математичний опис перехідних і сталих режимів роботи

2.2.1 Тепловий двигун і регулятор швидкості його обертання

Рівняння руху теплового двигуна [63], [64]

$$\frac{d\overline{\omega}_D}{dT} = N_D (\overline{M}_D - \overline{M}_G), \quad (2.3)$$

де

$$N_D = \frac{M_{D0} L}{J_D \omega_{D0} v_0} \quad (2.4)$$

критерій динамічної подібності,

J_D – наведений до валу теплового двигуна момент інерції двигуна й генератора.

Обертаючий момент теплового двигуна можна представити як відносне переміщення рейки паливного насоса [17]

$$\overline{M}_D = \overline{\xi}_D. \quad (2.5)$$

Потужність теплового двигуна

$$\overline{P}_D = \overline{M}_D \overline{\omega}_D. \quad (2.6)$$

Рівняння перехідних процесів у регуляторі швидкості обертання теплового двигуна, з врахуванням жорсткого й гнучкого зворотних зв'язків та з урахуванням роботи системи розподілу активної потужності (при паралельно працюючих ГА), можуть бути представлені як у [19, 62].

Приріст ходу рейки паливного насоса

$$\frac{d\bar{\xi}_D}{dT} = K_P \left(1 - (\bar{\omega}_D - \Delta\bar{\omega}_H)\right) - K_{Fb} \bar{\Delta\xi}_D - K_{is} \frac{d\bar{\Delta\xi}_D}{dT}, \quad (2.7)$$

де K_P – коефіцієнт підсилення по регульованій величині (зміні швидкості обертання теплового двигуна);

K_{Fb} – коефіцієнт жорсткого зворотнього зв'язку;

K_{is} – коефіцієнт гнучкого (ізодромного) зворотнього зв'язку;

$$\Delta\bar{\omega}_{H1} = \int_0^t \bar{U}_{s1} dt - \quad (2.8)$$

різниця кутових частот обертання генераторів;

$$\bar{U}_{s1} = \frac{\bar{I}_{ae1} - \bar{I}_{ae2}}{k_{ae1}} - \quad (2.9)$$

напруга на серводвигуні;

k_{ae} – коефіцієнт підсилення контуру автоматичного регулювання системи розподілу активного навантаження;

$$\bar{I}_{ae1} = \bar{U}_{d1} \bar{I}_{d1} + \bar{U}_{q1} \bar{I}_{q1}, - \quad (2.10)$$

активна складова струму СГ.

Для теплового двигуна генераторного агрегату другого силового контуру рівняння записуються аналогічно.

2.2.2 Синхронний генератор і система автоматичного регулювання напруги

На відміну від «класичного» [65] опису СГ, далі не враховуються процеси, які непорівнянні з постійними часу основних складових частин пропульсивного комплексу електрохода, а саме – трансформаторні електрорушійні сили (ЕРС) у статорних обмотках [66]. Зневажаємо (у зв'язку з

малістю) також активним опором якоря [67], взаємною індуктивністю (яка незрівнянно мала в порівнянні з індуктивністю обмотки збудження), а також потокозчепленнями демпферних обмоток.

До складу комбінованої системи автоматичного регулювання напруги синхронних генераторів включений контур регулювання розподілу реактивної потужності (при паралельно працюючих генераторних агрегатах).

Математична модель перехідних режимів в синхронних генераторах отримана на основі рівнянь Парка-Горєва. Зв'язок між зовнішніми й внутрішніми (в системі координат $d - q$) параметрами СГ можна отримати з його векторної діаграми. За її допомогою можна знайти кути θ , φ , ψ та визначити співвідношення між основними параметрами генератора в сталому режимі. На рис. 2.2 зображено варіант роботи генератора на активно-індуктивне навантаження, коли кут зсуву фаз між струмом і напругою – $\varphi > 0$. Кут між струмом і ЕРС генератора також позитивний – $\psi > 0$. Поздовжня реакція якоря E_{aq} є тою, що розмагнічує.

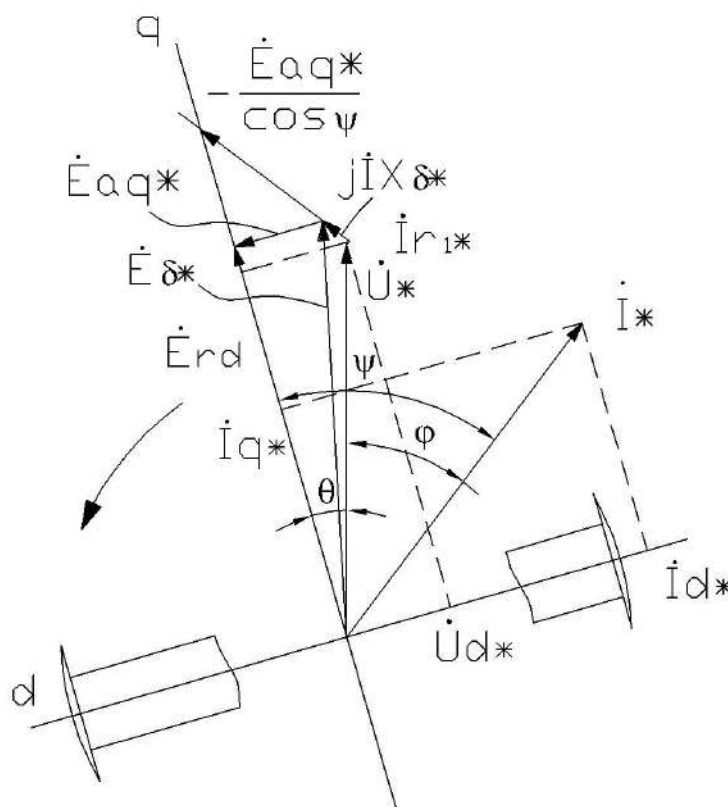


Рисунок 2.2 – Векторна діаграма синхронного генератора

У безрозмірних одиницях математична модель має наступний вид.

Кут комутації

$$\gamma_G = \arccos \left(1 - K_{\gamma G} \frac{|I_G|}{|U_G|} \right), \quad (2.11)$$

де

$$K_{\gamma G} = \frac{0,5(3x_d'' + x_q'')}{\sqrt{6}}, \quad (2.12)$$

x_d'' – понадперехідний індуктивний опір по осі d ,

x_q'' – понадперехідний індуктивний опір по осі q .

Кут зсуву фаз між векторами $\overline{I_G}$ і $\overline{U_G}$

$$\varphi_G = \frac{\gamma_G}{2}. \quad (2.13)$$

Кут зсуву фаз між векторами $\overline{E_G}$ і $\overline{I_G}$

$$\psi_G = \arctg \left(\frac{\sin \varphi_G}{\cos \varphi_G} + \frac{x_q I_G}{U_G \cos \varphi_G} \right), \quad (2.14)$$

де x_q – синхронний індуктивний опір по осі q .

Кут зсуву фаз (кут навантаження) між векторами $\overline{E_G}$ і $\overline{U_G}$

$$\theta_G = \psi_G - \varphi_G. \quad (2.15)$$

Струми генератора (внутрішні координати d - q)

$$\overline{I_d} = -\overline{I_G} \sin \psi_G, \quad (2.16)$$

$$\overline{I_q} = \overline{I_G} \cos \psi_G. \quad (2.17)$$

Напруги генератора (внутрішні координати d - q)

$$\overline{U_d} = -K_{d1} \overline{I_G} \cos \psi_G, \quad (2.18)$$

$$\overline{U_q} = -K_{q1} \overline{I_G} \sin \psi_G + K_{q2} \overline{I_f}, \quad (2.19)$$

де I_f – струм обмотки збудження генератора.

Приріст струму збудження

$$\frac{d\bar{I}_f}{dT} = N_f \left(K_{f1} K_{Uq} \bar{U}_q + K_{f2} K_{Id} \bar{I}_d - K_{f3} K_U \left(\bar{U}_G - (1 - \Delta \bar{U}_{H1}) \right) - \bar{I}_f \right), \quad (2.20)$$

де

$$\Delta \bar{U}_{H1} = \frac{\bar{I}_{re1} - \bar{I}_{re2}}{k_{re1}} - \quad (2.21)$$

різниця напруг генераторів;

$$\bar{I}_{re1} = \bar{U}_{q1} \bar{I}_{d1} - \bar{U}_{d1} \bar{I}_{q1} - \quad (2.22)$$

реактивна складова струму СГ;

$$K_{d1} = \frac{\sin \theta_0}{\cos \psi_0}, \quad (2.23)$$

$$K_{q1} = \frac{1 - \cos \theta_0}{\sin \psi_0}, \quad (2.24)$$

$$K_{q2} = 1, \quad (2.25)$$

$$K_{Uq} = \frac{U_{G0}}{U_{f0}}, \quad (2.26)$$

$$K_{Id} = \frac{I_{G0} x_d}{U_{f0}}, \quad (2.27)$$

$$K_U = \frac{U_{G0}}{U_{f0}} - \quad (2.28)$$

безрозмірні параметри;

$$N_f = \frac{L U_{f0}}{L_f I_{f0} V_0} - \quad (2.29)$$

критерій динамічної подібності;

L_f – індуктивність самоіндукції обмотки збудження;

K_{f1} – коефіцієнт підсилення по основному сигналу;

K_{f2} – коефіцієнт по впливу, що обурює;

K_{f3} – коефіцієнт по відхиленню величини, що регулюється;

k_{re} – коефіцієнт підсилення контуру автоматичного регулювання системи розподілу реактивного навантаження.

Момент опору генератора

$$\overline{M}_G = -K_{G1} \overline{I}_G^2 \sin \psi_G \cos \psi_G + K_{G2} \overline{I}_f \overline{I}_G \cos \psi_G, \quad (2.30)$$

де

$$K_{G1} = \frac{(L_d - L_q) I_{G0}^2}{M_{G0}}, \quad (2.31)$$

$$K_{G2} = \frac{M_{ad} I_{f0} I_{G0}}{M_{G0}} - \quad (2.32)$$

безрозмірні параметри;

L_d – індуктивність самоіндукції обмотки якоря по осі d ;

L_q – індуктивність самоіндукції обмотки якоря по осі q ;

M_{ad} – індуктивність взаємоіндукції по осі d .

Співвідношення (2.11) – (2.32) отримані в [68] – [72].

Напруга на виході генератора

$$\overline{U}_G = \sqrt{\overline{U}_d^2 + \overline{U}_q^2}. \quad (2.33)$$

Активна потужність генератора

$$\overline{P}_G = \overline{U}_G \overline{I}_G \cos \varphi_G. \quad (2.34)$$

Струм генератора

$$\overline{I}_G = \frac{3\sqrt{2}}{4} \mu_G \overline{I}_M \cos \varphi_M \quad (2.35)$$

де μ_G – управляючий сигнал при роботі синхронного генератора на автономний інвертор напруги (АІН) [9],

\overline{I}_M – струм гребного електродвигуна,

$\cos \varphi_M$ – коефіцієнт потужності гребного електродвигуна.

2.2.3 Перетворювач електроенергії

Розглядаючи перетворювач частоти як безінерційний «квантователь» електроенергії з ідеальними вентилями, не враховуємо електромагнітні процеси, що протікають у ньому, і вважаємо, що струм на виході перетворювача безперервний, а сам перетворювач не виходить за область нормальних навантажень [43]. Тип перетворювача – частотний з автономним інвертором напруги (ЧП з АІН).

Залежність вихідної напруги перетворювача (напруги на вході гребного електродвигуна) від вхідної (напруги на виході генератора)

$$\overline{U_M} = \gamma \overline{U_G}, \quad (2.36)$$

де U_M – напруга ГЕД,

γ – відносна напруга на виході перетворювача електроенергії.

2.2.4 Гребний електродвигун

У математичній моделі [63], [64] наведений математичний опис узагальненого гребного електродвигуна. Як окремий випадок з нього, впливає математична модель асинхронного електродвигуна (АД) при частотному керуванні. У її основі лежить точна класична схема заміщення АД, що і визначає необхідні допущення та спрощення. Напруга на затискачах статора вважається синусоїдальною, насичення сталі машини не враховується, розподіл потоку по дузі повітряного зазору приймається синусоїдальним, втрати сталі в статорі враховуються приблизно, а в роторі – не враховуються [42], [73] – [75].

Рівняння руху гребного електродвигуна

$$\frac{d\overline{\omega_M}}{dT} = N_M (\overline{M_M} - \overline{M_P}), \quad (2.37)$$

де

$$N_M = \frac{M_{M0} L}{J_M \omega_{M0} v_0} - \quad (2.38)$$

критерій динамічної подібності;

Момент на валу гребного электродвигуна

$$\overline{M}_M = K_M \overline{I}_M \overline{\Phi}_M \cos \varphi_M ; \quad (2.39)$$

Струм гребного электродвигуна

$$\overline{I}_M = C_{M24} \gamma \frac{1}{\sqrt{C_{M17} + C_{M18} \alpha^2 + \frac{C_{M21} + C_{M22} \alpha^2}{(C_{M19} \alpha - C_{M20} \overline{\omega}_M)^2} + \frac{C_{M23} \alpha}{C_{M19} \alpha - C_{M20} \overline{\omega}_M}}} ; \quad (2.40)$$

Магнітний потік гребного электродвигуна

$$\overline{\Phi}_M = C_{M25} \gamma \sqrt{\frac{x_{2M}^2 (C_{M19} \alpha - C_{M20} \overline{\omega}_M)^2 + r_{2M}^2}{(b_M^2 + c_M^2 \alpha^2) (C_{M19} \alpha - C_{M20} \overline{\omega}_M)^2 + (d_M^2 + e_M^2 \alpha^2) r_{2M}^2 + 2r_{1M} r_{2M} \alpha (C_{M19} \alpha - C_{M20} \overline{\omega}_M)}} ; \quad (2.41)$$

Коефіцієнт потужності гребного электродвигуна

$$\cos \varphi_M = \frac{1}{\sqrt{1 + C_{M26} (C_{M19} \alpha - C_{M20} \overline{\omega}_M)^2}} ; \quad (2.42)$$

$$C_{M17} = \frac{b_M^2}{r_{2M}^2} , \quad (2.43)$$

$$C_{M18} = \frac{c_M^2}{r_{2M}^2} \alpha_0^2 , \quad (2.44)$$

$$C_{M19} = \alpha_0 , \quad (2.45)$$

$$C_{M20} = \frac{\omega_{M0}}{\omega_{1Mn}} , \quad (2.46)$$

$$C_{M21} = d_M^2 , \quad (2.47)$$

$$C_{M22} = e_M^2 \alpha_0^2 , \quad (2.48)$$

$$C_{M23} = 2 \frac{r_{1M}}{r_{2M}} \alpha_0 , \quad (2.49)$$

$$C_{M24} = \sqrt{C_{M17} + C_{M18} + \frac{C_{M21}}{\beta_{M0}^2} + \frac{C_{M22}}{\beta_{M0}^2} + \frac{C_{M23}}{\beta_{M0}}} , \quad (2.50)$$

$$C_{M25} = \sqrt{\frac{(b_M^2 + c_M^2 \alpha_0^2)(C_{M19} \alpha_0 - C_{M20} \omega_{M0})^2 + (d_M^2 + e_M^2 \alpha_0^2) r_{2M}'^2 + 2r_{1M} r_{2M}' \alpha_0 (C_{M19} \alpha_0 - C_{M20} \omega_{M0})}{x_{2M}'^2 + \frac{r_{2M}'^2}{\beta_{M0}^2}}}, \quad (2.51)$$

$$C_{M26} = \frac{x_{2M}'^2}{r_{2M}'^2} - \quad (2.52)$$

безрозмірні параметри пропульсивного комплексу електрохода;

$$b_M = r_{1M} (1 + \tau_{2M}), \quad (2.53)$$

$$c_M = x_{0M} \tau_M, \quad (2.54)$$

$$d_M = \frac{r_{1M}}{x_{0M}}, \quad (2.55)$$

$$e_M = 1 + \tau_{1M} - \quad (2.56)$$

постійні коефіцієнти асинхронного частотно-керованого ГЕД;

$$\tau_{1M} = \frac{x_{1M}}{x_{0M}}, \quad (2.57)$$

$$\tau_{2M} = \frac{x_{2M}'}{x_{0M}}, \quad (2.58)$$

$$\tau_M = \tau_{1M} + \tau_{2M} + \tau_{1M} \tau_{2M} - \quad (2.59)$$

коефіцієнти розсіювання;

J_M – момент інерції двигуна;

K_M – постійний конструктивний коефіцієнт;

ω_{1Mn} – частота обертання магнітного поля статора;

r_{1M} – активний опір статора АД;

r_{2M}' – активний опір ротора (приведеного до обмотки статора) АД;

x_{1M} – індуктивний опір статора АД;

x_{2M}' – індуктивний опір ротора (приведеного до обмотки статора) АД;

x_{0M} – індуктивний опір намагнічування;

β_{M0} – абсолютне ковзання ротора АД.

Співвідношення (2.34) – (2.52) отримані в ході переведення математичної моделі гребного електродвигуна з абсолютної в безрозмірну форму запису [63], [64]. Рівняння (2.53) – (2.59) отримані в [76] – [78].

2.2.5 Управління електроенергетичною установкою

Управління електроенергетичною установкою здійснюється з поста управління (ПУ) на містку. Основне завдання – управління рухом судна в режимі реального часу. Положення задатчика ПУ визначає відносну частоту напруги живлення ГЕД α , яка формує (за допомогою функціонального блоку *FC* перетворювача частоти) відносну напругу живлення ГЕД $\gamma = f(\alpha)$.

Перший сигнал управління – відносна частота напруги живлення гребних електродвигунів – задає частоту їх обертання [63]

$$\alpha = \alpha_{Set} - K_{\alpha P} \alpha_P - K_{\alpha \omega} \alpha_{\omega} - K_{\alpha f} (\alpha_f - \alpha_{f \max}) - K_{\alpha M} (\alpha_M - \alpha_{M \max}) - K_{\alpha I} (\alpha_I - \alpha_{I \max}) - K_{\alpha PD} (\alpha_{PD} - \alpha_{PD \max}), \quad (2.60)$$

де α_{Set} – задане значення відносної частоти (задане значення частоти обертання гребного електродвигуна);

α_P – коригувальний зв'язок по потужності ГЕД;

α_{ω} – коригувальний зв'язок по кутовій швидкості обертання ГЕД;

α_f – відсічення по вихідній частоті перетворювача частоти;

α_M – відсічення по обертаючому моменту ГЕД;

α_I – відсічення по струму статора ГЕД;

α_{PD} – відсічення по потужності, яка споживається системою електроруху;

$K_{\alpha P}$ – коефіцієнт підсилення по потужності ГЕД;

$K_{\alpha \omega}$ – коефіцієнт підсилення по кутовій швидкості обертання ГЕД;

$K_{\alpha f}$ – коефіцієнт підсилення по вихідній частоті перетворювача частоти;

$K_{\alpha M}$ – коефіцієнт підсилення по обертаючому моменту ГЕД;

$K_{\alpha I}$ – коефіцієнт підсилення по струму статора ГЕД;

$K_{\alpha PD}$ – коефіцієнт підсилення по потужності, яка споживається системою електроруху.

Коефіцієнти підсилення визначаються конкретною системою управління.

Другий сигнал управління – відносна напруга живлення гребних електродвигунів [63]

$$\gamma = \gamma_{Set} - K_{\gamma I}(\gamma_I - \gamma_{I_{max}}) - K_{\gamma U}\gamma_U, \quad (2.61)$$

де γ_{Set} – задане значення відносної напруги перетворювача частоти – сигнал, що є функцією відносної частоти й прийнятого закону управління напругою;

γ_U – коригувальний зв'язок по напрузі ГЕД;

γ_I – відсічення по струму статора ГЕД;

$K_{\gamma I}$ – коефіцієнт підсилення по струму статора ГЕД;

$K_{\gamma U}$ – коефіцієнт підсилення по напрузі ГЕД.

У кожному конкретному випадку система автоматичного управління має свій «набір» управляючих сигналів по кожному каналу регулювання.

Саме ці сигнали управління визначають характер перехідних процесів у СЕЕУ й впливають на показники якості маневрування електроходів.

2.2.6 Гребні гвинти

Гідродинамічна реверсивна характеристика гребного гвинта наведена на рис. 2.3. З неї випливає, що момент опору гребного гвинта і його упор – залежать і від кутової частоти обертання гвинта ω_M , і від швидкості натікання води на гвинт $v_e = (1 - \psi_B)v$, де ψ_B – коефіцієнт попутного потоку гвинта. І саме на маневрених режимах роботи ця залежність проявляється в повній мірі.

З урахуванням руху судна по криволінійній траєкторії, представимо гідродинамічні характеристики у вигляді параболічного полінома [1], [79].

Момент опору гвинта

$$\overline{M}_P = a_{21}\overline{\omega}_M^2 + b_{21}\overline{\omega}_M\overline{v}_e + c_{21}\overline{v}_e^2 + a_M\overline{v}^{-2}\text{tg}^2\alpha_{Bev}, \quad (2.62)$$

Упор гвинта

$$\overline{P}_P = a_{11}\overline{\omega}_P^2 + b_{11}\overline{\omega}_P\overline{v}_e + c_{11}\overline{v}_e^2 + a_P\overline{v}^{-2}\text{tg}^2\alpha_{Bev}, \quad (2.63)$$

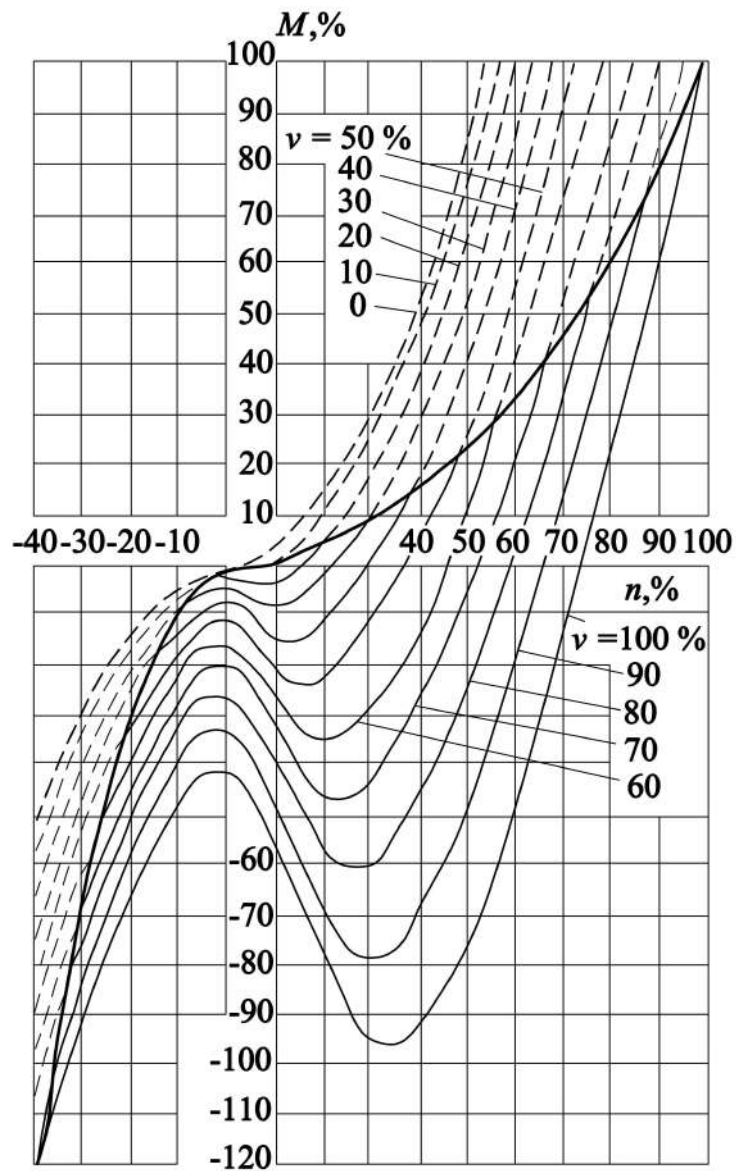


Рисунок 2.3 – Гідродинамічна реверсивна характеристика гребного гвинта

де a_{21} , b_{21} , c_{21} , a_{11} , b_{11} , c_{11} – коефіцієнти універсальної гідродинамічної характеристики гвинта (постійні в певних діапазонах зміни значень $\overline{\omega}_M$ та \overline{v}_e);

$\overline{\omega}_p$ – кутова швидкість обертання гвинта;

\overline{v}_e – швидкість натікання води на гвинт;

\overline{v} – швидкість руху судна;

a_M , a_p – постійні коефіцієнти – отримані в [9];

α_{Bev} – кут скошу потоку води.

Коефіцієнти a_{21} , b_{21} , c_{21} , a_M , a_{11} , b_{11} , c_{11} , a_P – отримані в [1]:

$$\left. \begin{aligned} a_{11} = a_{21} = 1,73 \\ b_{11} = b_{21} = 0,33 \\ c_{11} = c_{21} = -1,06 \end{aligned} \right\} \text{при } 1 \geq \frac{\overline{\omega_P}}{v_e} > 0,3$$

$$\left. \begin{aligned} a_{11} = a_{21} = -4,0 \\ b_{11} = b_{21} = -0,6 \\ c_{11} = c_{21} = -0,3 \end{aligned} \right\} \text{при } 0,3 \geq \frac{\overline{\omega_P}}{v_e} \geq -\infty$$
(2.64)

2.2.7 Корпус електрохода

Розглядається рух судна по вільній поверхні води в пов'язаній з ним системі координат $GXYZ$, початок якої збігається із центром ваги судна G (рис. 2.4). Площина GXY паралельна основній площині судна, вісь GX розміщується в діаметральній площині та спрямована в ніс, вісь GY – на правий борт, вісь GZ – вертикально вгору. Приєднаним моментом λ_{26} зневажаємо [80].

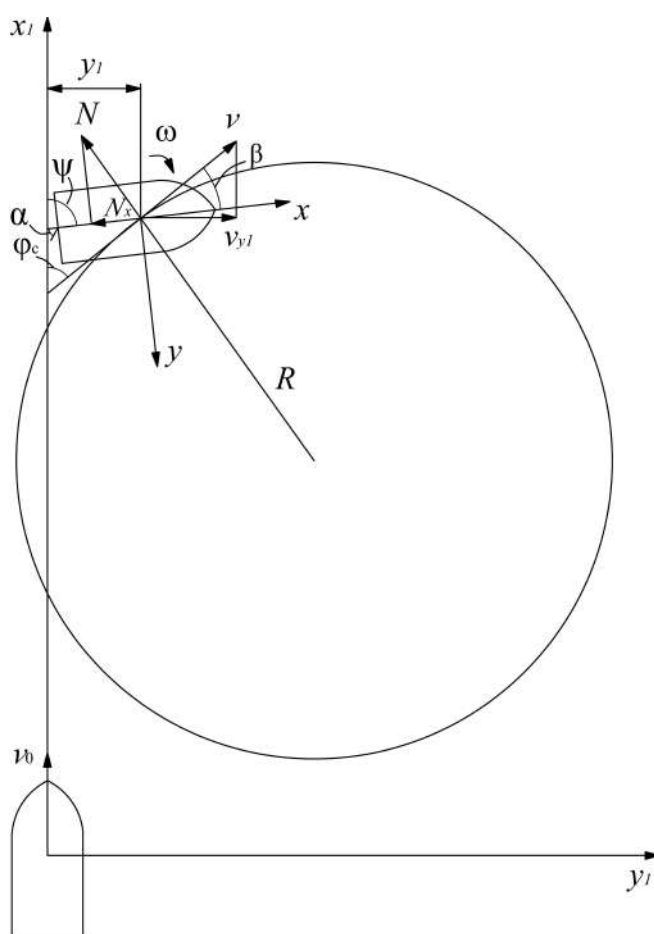


Рисунок 2.4 – Судно на циркуляції

Складові швидкості руху судна уздовж осей X , Y і швидкість обертання навколо осі Z :

$$\frac{d\overline{v}_X}{dT} = C_{\lambda 2} \overline{v}_Y \overline{\Omega}_Z + N_X \left\{ \sum_J K_{Pj} \overline{P}_{ej} - C_{RX} \beta_{RP} \overline{v}^2 - \overline{R}_X \right\}, \quad (2.65)$$

$$\frac{d\overline{v}_Y}{dT} = -\frac{1}{C_{\lambda 2}} \overline{v}_X \overline{\Omega}_Z + \frac{N_X}{C_{\lambda 2}} \left\{ \sum_J K_{Pj} \alpha_{jz} \overline{P}_{ej} - C_{RY} \beta_{RP} \overline{v}^2 - \overline{R}_Y \right\}, \quad (2.66)$$

$$\frac{d\overline{\Omega}_Z}{dT} = -\frac{N_\Omega}{N_X} C_{\lambda 21} \overline{v}_X \overline{v}_Y + N_\Omega \left\{ \sum_j K_{Pj} h_{Pj} \overline{P}_{ej} + (\overline{M}_{PZ} - \overline{M}_{DZ}) + C_{RY} \overline{X}_R \beta_{RP} \overline{v}^2 \right\}, \quad (2.67)$$

де поздовжня сила керма

$$\overline{R}_X = \left\{ C_{11} \cos 1,5\beta_{dr} - C_{12} \sin^4 1,5\beta_{dr} + C_{13} \left(\frac{2\beta_{dr}}{\pi} \right)^3 \right\} \overline{v}^2; \quad (2.68)$$

поперечна сила керма

$$\overline{R}_Y = \left\{ C_{21} \sin 2\beta_{dr} \cos \beta_{dr} + C_{22} \sin^2 \beta_{dr} + C_{23} \sin^4 2\beta_{dr} \right\} \overline{v}^2; \quad (2.69)$$

момент повороту

$$\overline{M}_{PZ} - \overline{M}_{DZ} = \left[C_{61} \sin 2\beta_{dr} + C_{62} \sin \beta_{dr} + C_{63} \sin^3 2\beta_{dr} + C_{64} \sin^4 2\beta_{dr} \right] \overline{v}^2 - C_{65} \overline{\Omega}_Z \overline{v}^2; \quad (2.70)$$

$$C_{\lambda 2} = \frac{m + \lambda_{22}}{m + \lambda_{11}}, \quad (2.71)$$

$$C_{\lambda 21} = \frac{2(\lambda_{22} - \lambda_{11})}{m + \lambda_{11}}, \quad (2.72)$$

$$C_{RX} = \frac{\mu_{rx} \frac{\rho}{2} v_0^2 S_C (1 - \psi)^2}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}, \quad (2.73)$$

$$C_{RY} = \frac{\mu_K \frac{\rho}{2} v_0^2 S_C (1 - \psi)^2}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}, \quad (2.74)$$

$$C_{11} = \frac{R_{X0}}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}, \quad (2.75)$$

$$C_{12} = \frac{0,07 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}, \quad (2.76)$$

$$C_{13} = \frac{c_4 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}, \quad (2.77)$$

$$C_{21} = \frac{0,5 C_Y^\beta \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}, \quad (2.78)$$

$$C_{22} = \frac{c_2 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}, \quad (2.79)$$

$$C_{23} = \frac{c_3 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}, \quad (2.80)$$

$$C_{61} = \frac{2m_1 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}, \quad (2.81)$$

$$C_{62} = \frac{2m_2 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}, \quad (2.82)$$

$$C_{63} = \frac{2m_3 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}, \quad (2.83)$$

$$C_{64} = \frac{2m_4 \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}}, \quad (2.84)$$

$$C_{65} = \frac{2 \left[0,739 + 8,7 \frac{T}{L} \right] C_{m0}^\omega \frac{\rho}{2} v_0^2 F_D}{\sum K_{Pj} P_{ej0}} - \quad (2.85)$$

безрозмірні параметри;

$$N_x = \frac{L \sum K_{Pj} P_{ej0}}{(m + \lambda_{11}) v_0^2}, \quad (2.86)$$

$$N_\Omega = \frac{L^3 \sum K_{Pj} P_{ej0}}{2(J_z + \lambda_{66}) v_0^2} - \quad (2.87)$$

критерії динамічної подібності;

У цих співвідношеннях:

X_R – відстань від центра системи координат до керма;

P_{ej} і K_{Pj} – корисний упор гребного гвинта і його частка в сумарному упорі відповідно;

L – довжина судна по конструктивній ватерлінії;

m – маса судна;

ρ – питома щільність води;

λ_{11} і λ_{22} – приєднані маси води уздовж осей X і Y ;

λ_{66} – приєднаний момент інерції води;

μ_{rx} – коефіцієнт опору пера керма;

μ_K – коефіцієнт бічної сили керма;

ψ – кут курсу;

S_C – наведена площа пера керма;

c_4 – коефіцієнт поздовжньої позиційної сили опору води;

C_Y^β , c_2 , c_3 – коефіцієнти сили корпусу;

m_1 , m_2 , m_3 , m_4 – коефіцієнти позиційного моменту опору;

F_D – наведена площа зануреної частини діаметральної площини судна;

M_{PZ} – позиційний момент опору;

M_{DZ} – демпфуючий момент опору;

C_{m0}^ω – коефіцієнт демпфуючого моменту опору;

β_{dr} – кут дрейфу;

J_z – момент інерції судна при обертанні його навколо осі Z .

Кут атаки пера керма:

$$\beta_{RP} = K_R \beta_R - \chi_C \left(\arctg \beta_{dr} - \varepsilon \frac{\overline{\Omega_Z}}{v} \right), \quad (2.88)$$

де β_R – кут перекладки пера керма;

χ_C – наведений коефіцієнт впливу корпусу і гвинтів на кермо;

ε – величина, обумовлена відношенням l_R/L ;

l_R – відстань між кермом і мідель шпангоутом.

Співвідношення (2.65)-(2.88) отримані та наведені в [63].

Розроблена математична модель дозволяє всебічно аналізувати перехідні процеси пропульсивних комплексів електроходів на маневрах.

2.3 Способи дослідження перехідних і сталих режимів роботи

Для аналізу маневрених режимів роботи розроблено алгоритм розрахунку й аналізу основних режимних показників пропульсивних комплексів електроходів на маневрах та алгоритм оцінки основних показників якості виконання маневрених операцій. Розроблено пакет прикладних програм.

Базовою є програма, що дозволяє розраховувати поточні значення відносних режимних показників всіх складових частин суднового пропульсивного комплексу під час виконання різноманітних маневрених операцій. Відповідно до неї, при аналізі маневрених режимів:

- розраховуються безрозмірні параметри складових частин комплексу;
- для маневру, який досліджується, вводяться параметри управління відповідно до положень рукояток постів управління та перекладки пера керма;
- задаються початкові умови;
- відповідно до обраних маневрів формуються сигнали управління кожним силовим контуром;
- розраховуються поточні значення основних режимних показників кожного силового контуру електроенергетичної установки по ходу виконання маневру;

– визначаються гідродинамічні сили й моменти, що діють на судно; розраховуються поточні значення параметрів руху судна в пов'язаній із ним системі координат, а потім – у незв'язаній системі координат.

Рішення представленої вище системи рівнянь (2.3) – (2.88) – це рішення задачі Коші. У якості методу рішення використаний метод Рунге-Кутта-Мерсона. Він дозволяє отримати результати з необхідною точністю й за мінімальний час.

Остаточні результати розрахунків представляються в числовому вигляді й у вигляді готових графіків зміни в часі режимних показників:

а) по кожному «силовому» контуру:

- кутової швидкості обертання теплового двигуна – ω_D ,
- обертаючого моменту теплового двигуна – M_D ;
- потужності теплового двигуна – P_D ;
- напруги на виході генератора – U_G ;
- струму генератора – I_G ;
- струму збудження генератора – I_{fG} ;
- відносної напруги керування перетворювачем – γ ;
- напруги гребного електродвигуна – U_M ;
- струму гребного електродвигуна – I_M ;
- обертаючого моменту гребного електродвигуна – M_M ;
- кутової швидкості обертання гребного електродвигуна – ω_M ;

б) по параметрах руху судна:

- швидкості руху – v ;
- складової швидкості v по поздовжній осі X – v_X ;
- складової швидкості v по поперечній осі Y – v_Y ;
- кутової швидкості обертання навколо осі Z – Ω_Z ;
- кута дрейфу – β_{dr} ;
- кута курсу – ψ .

При необхідності, можуть реєструватися і будь-які інші, одержувані в процесі розрахунків, режимні показники.

У якості прикладу, на рис. 2.5 приведено приклад розрахунку поточних значень основних режимних показників електрохода при виконанні маневру «розгін».

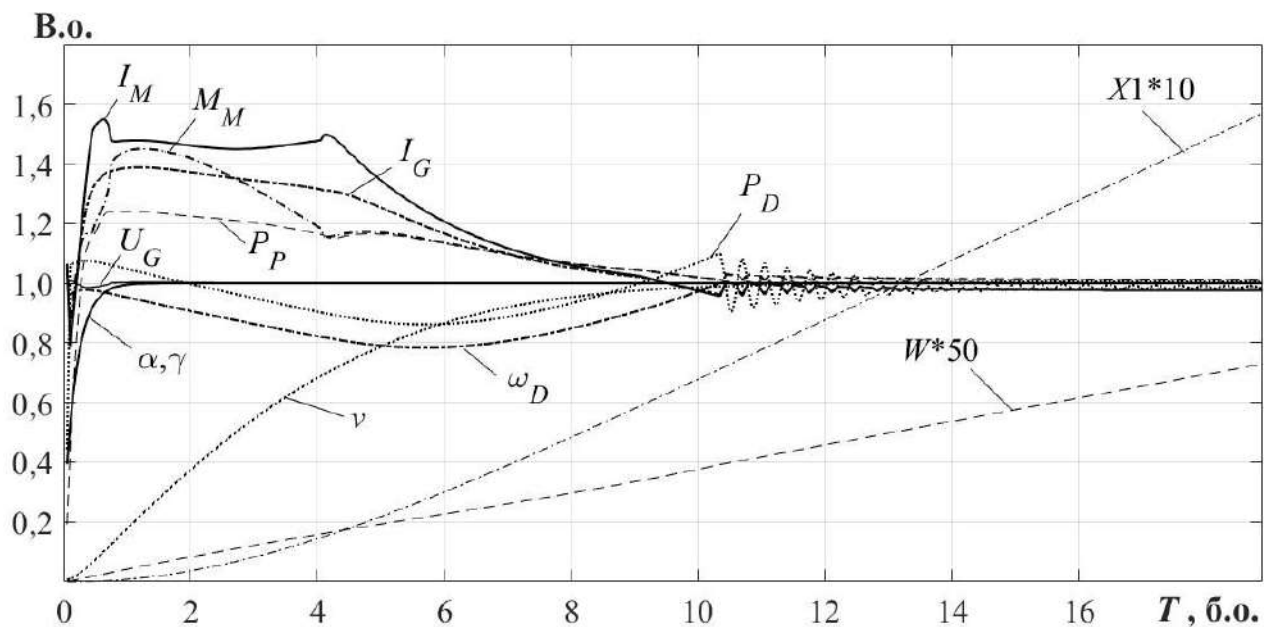


Рисунок 2.5 – Поточні значення основних режимних показників електрохода при виконанні маневру – «розгін»

На рис.2.5 розгін відбувався від нульової до номінальної швидкості. Закони зміни основних режимних показників представлені у відносних одиницях (в.о.). Вісь часу (T) – вісь безрозмірних одиниць (б.о.). Одна поділка по осі часу відповідає – 13,5 с. Розгін закінчується при досягненні швидкості руху v сталого значення (в даному випадку «одиниці»).

Отримані результати наочно демонструють можливості використання математичної моделі при рішенні практичних задач.

2.4 Експериментальна перевірка результатів теоретичних досліджень

Для підтвердження адекватності розробленої математичної моделі й методу розрахунку, побудованого на її основі, зіставимо результати математичного моделювання з опублікованими в роботах [45], [81] даними, отриманими в ході натурних експериментів іншими дослідниками.

Скористаємося наведеними в зазначених роботах осцилограммами розгону і реверса гребної електроустановки атомного електрохода «Арктика».

Перелічені (для зручності порівняльного аналізу) у відносні величини, ці осцилограми наведені, відповідно, на рис. 2.6 і рис. 2.7 суцільними лініями. Тут же штриховими лініями нанесені поточні значення режимних показників, отриманих за допомогою розробленого методу розрахунку.

Основні параметри пропульсивного комплексу, необхідні для розрахунку безрозмірних параметрів і критеріїв динамічної подібності представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні параметри пропульсивного комплексу

Довжина судна по конструктивній ватерлінії	136 м
Швидкість судна	21 вузол
Номінальні параметри теплових двигунів	
потужність	27 600 кВт
частота обертання	3500 об/хв
Номінальні параметри синхронних генераторів	
потужність	9000 кВт
напруга	780 В
частота обертання	3500 об/хв
коефіцієнт потужності	0,88
обмотувальні дані, в.о.:	
x_d	0,96
x_q	1,12
x''_d	0,14
x''_q	0,16
Номінальні параметри гребних електродвигунів	
потужність	17600 кВт
струм якоря	9200 А
частота обертання	130 об/хв

Узагальнені безрозмірні параметри та критерії динамічної подібності розраховані по співвідношенням (2.4), (2.12), (2.23) – (2.25), (2.29), (2.31), (2.32), (2.35), (2.43) – (2.52), (2.64), (2.71), (2.72), (2.75) – (2.86), і наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Безрозмірні параметри та критерії динамічної подібності атомохода «Арктика»

K_M	1,071	$K_{\gamma G}$	0,118
K_{d1}	1,12	a_{11}	1,73
K_{q1}	0,294	a_{21}	1,73
K_{q2}	1	b_{11}	0,33
K_{G1}	- 0,029	b_{21}	0,33
K_{G2}	1,684	c_{11}	- 1,06
N_D	0,641	c_{21}	- 1,06
N_{fG}	5,6	C_{11}	1
N_M	6,06	C_{12}	1,674
N_X	0,2	C_{13}	0,24
C_{M17}	0,41	C_{21}	3,588
C_{M18}	23,73	C_{22}	23,441
C_{M19}	1	C_{23}	2,87
C_{M20}	0,96	C_{61}	2,392
C_{M21}	0,0002	C_{62}	0,048
C_{M22}	1,096	C_{63}	1,387
C_{M23}	1,12	C_{64}	0,239
C_{M24}	27,5	C_{65}	4,141
C_{M25}	0,2556	$C_{\lambda 2}$	1,65
C_{M26}	7,5776	$C_{\lambda 21}$	1,3

Закони управління кожним силовим контуром задані в математичній моделі відповідно до осцилограм натурних випробувань [45], [81]:

а) при розгоні $0 \leq T \leq T_1$:

$$\overline{U_{Gset}} = 0,8(1 - e^{-K_1 T}), \quad (2.89)$$

$$\overline{U_{Mset}} = 1; \quad (2.90)$$

б) при реверсі з переднього ходу на задній $T_1 \leq T \leq T_2$:

$$\overline{U_{Gset}} = 0,8 - 1,5(1 - e^{-0,8K_2(T-T_1)}), \quad (2.91)$$

$$\overline{U_{Mset}} = 1 - 1,5(1 - e^{-K_2(T-T_1)}) - \quad (2.92)$$

для $\omega_M > 0$;

$$\overline{U_{Gset}} = 0,1 + 0,5(1 - e^{-1,5K_2(T-T_1)}), \quad (2.93)$$

$$\overline{U_{Mset}} = -0,5 - 0,5(1 - e^{-K_2(T-T_1)}) - \quad (2.94)$$

для $\omega_M \leq 0$;

в) при реверсі із заднього ходу на передній $T_2 \leq T \leq T_3$:

$$\overline{U_{Gset}} = 0,1 + 0,7(1 - e^{-1,5K_3(T-T_2)}), \quad (2.95)$$

$$\overline{U_{Mset}} = 0,5 + 0,5(1 - e^{-K_3(T-T_2)}) - \quad (2.96)$$

для $\omega_M < 0$;

$$\overline{U_{Gset}} = 0,6 - 1,5(1 - e^{-0,8K_3(T-T_2)}), \quad (2.97)$$

$$\overline{U_{Mset}} = -1 + 1,5(1 - e^{-K_3(T-T_2)}) - \quad (2.98)$$

для $\omega_M \geq 0$;

де U_{Gset} – сигнал управління в системі збудження СГ;

U_{Mset} – сигнал управління в системі збудження ГЕД;

K_1, K_2, K_3 – постійні часу.

Результати розрахунку основних (наведених на осцилограмах) режимних показників ($I_{fG}, U_M, \omega_M, I_M$), виконані відповідно до співвідношень (2.20), (2.35), (2.36), (2.38) у пакеті прикладних програм *qb64, Matlab*, показані штриховими лініями на рис. 2.6-2.7.

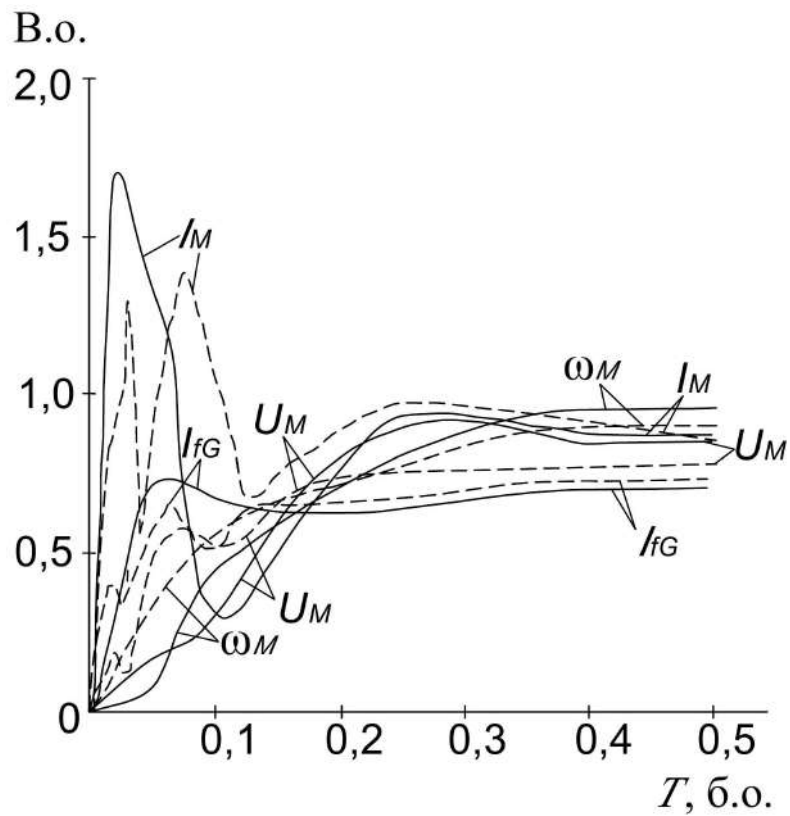


Рисунок 2.6 – Порівняння теоретичного розрахунку розгону ГЕУ атомного електрохода «Арктика» з експериментальними даними

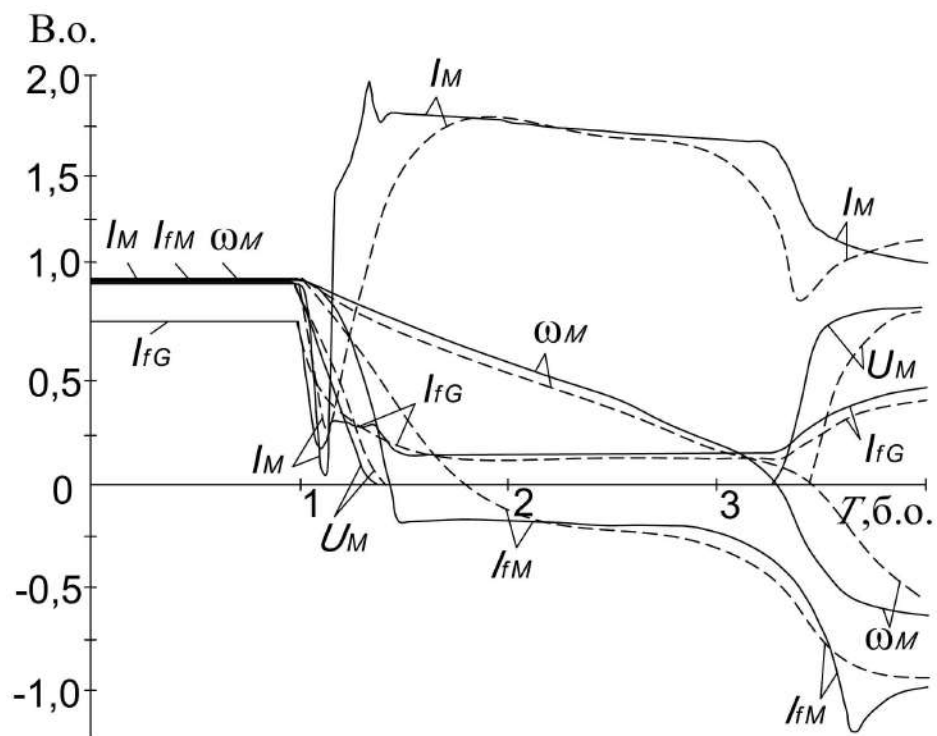


Рисунок 2.7 – Порівняння теоретичного розрахунку реверсів, що чергуються, ГЕУ атомного електрохода «Арктика» з експериментальними даними

Порівняння результатів розрахунку по розробленій математичній моделі з експериментальними даними показує, що відхилення між ними не перевищує 15 %. Для математичних моделей складних систем це є достатнім [82]. Оскільки, згідно [83], точності використовуваних (у натурних випробуваннях) вимірювальних пристроїв мають певні похибки, які у сукупності і визначають сумарні похибки експериментів. Як показано у роботі [82] такі похибки у натурних випробуваннях знаходяться у діапазоні 5 % –18 %. Тенденції зміни режимних показників збігаються. Певні розбіжності у початкових стадіях перехідних процесів очікувані, і пояснюються настроюваннями та коефіцієнтами підсилення системи автоматичного регулювання.

Таким чином, проведені дослідження підтверджують достовірність і прийнятність розроблених математичної моделі та методу розрахунку для аналізу маневрених режимів роботи електроходів.

2.5 Короткі висновки

1. Запропоновано математичну модель і метод розрахунку на її основі перехідних режимів роботи гребних електроенергетичних установок у складі пропульсивних комплексів електроходів.

2. Метод дозволяє розраховувати поточні значення основних режимних показників складових частин пропульсивних комплексів й оцінювати показники якості маневрування.

3. Використання розробленого методу розрахунку відкриває можливості в пошуку сигналів управління гребними електроенергетичними установками, які забезпечують найліпші маневрені властивості електроходів.

4. Достовірність і адекватність розробленого методу підтверджено порівняльним аналізом розрахунків за допомогою запропонованої математичної моделі із результатами натурних випробувань, проведених незалежними дослідниками.

3 ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ ЕЛЕКТРОХОДІВ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ МАНЕВРІВ

3.1 Постановка завдання

Для аналізу маневрених режимів електроходів з ЄЕЕС у 2 розділі запропоновані математична модель і метод розрахунку перехідних режимів ГЕЕУ як складової частини суднового пропульсивного комплексу. Розроблений метод дозволяє розраховувати поточні значення основних режимних показників ГЕЕУ як у сталих, так і в динамічних режимах роботи та оцінювати основні показники якості роботи електроходів на маневрах. Запропонований математичний опис дає можливість враховувати вплив перехідних режимів у ГЕЕУ на параметри електроенергії суднової мережі (тобто на роботу загальносуднових споживачів) при маневруванні.

Модель наведена у відносних одиницях. В ході переведення моделі у відносні одиниці були отримані узагальнені безрозмірні параметри та виявлені критерії динамічної подібності пропульсивних комплексів. Саме ці безрозмірні параметри й критерії впливають на поточні значення відносних режимних показників складових частин комплексу й визначають чисельні значення показників якості маневрування.

Результати численних розрахунків перехідних режимів при різних маневрах [3, 9], практика проектування та експлуатації електроходів [43, 45], дають підстави запропонувати для оцінки якості роботи ГЕЕУ (у складі пропульсивних комплексів) на маневрах наступні показники:

- максимальне збільшення потужності первинних двигунів

$$P_{Dm} = P_{Dmax} / P_{Dstd}; \quad (3.1)$$

- відносне відхилення кутової швидкості обертання первинних двигунів

$$\Delta\omega_D = (\omega_{Dmax} - \omega_{Dmin}) / \omega_{Dstd}; \quad (3.2)$$

- кидки струму генераторів при розгоні

$$I_{Gacc} = I_{Gacc\ max} / I_{Gacc\ std} \quad (3.3)$$

– кидки струму генераторів при реверсі

$$I_{Grev} = I_{Grev \max} / I_{Grev \text{ std}}; \quad (3.4)$$

– кидки обертаючого моменту гребних електродвигунів (ГЕД) при розгоні

$$M_{Macc} = M_{Macc \max} / M_{Macc \text{ std}} \quad (3.5)$$

і при реверсі

$$M_{Mrev} = M_{Mrev \max} / M_{Mrev \text{ std}}; \quad (3.6)$$

– кидки струму ГЕД при розгоні

$$I_{Macc} = I_{Macc \max} / I_{Macc \text{ std}} \quad (3.7)$$

і при реверсі

$$I_{Mrev} = I_{Mrev \max} / I_{Mrev \text{ std}}; \quad (3.8)$$

– максимальна швидкість судна до кінця маневру – v_{\max} ;

– тривалість виконання маневру – T_M ;

– пройдений судном шлях по закінченню маневру – X_1 ;

– відносні витрати енергії на виконання маневру – W ;

– тривалість розгону електрохода до заданого значення швидкості судна – T_{Mpset} (тут і далі під заданою буде матися на увазі швидкість $v = 0,95 v_0$);

– пройдений судном шлях до заданого значення швидкості судна – X_{1pset} ;

– відносні витрати енергії до заданого значення швидкості судна – W_{pset} .

Поряд з показниками гребної електроенергетичної установки та показниками якості маневрування судна, включені й показники, що характеризують динамічні параметри напруги і частоти на виході генераторів (суднової мережі) (відповідно до [54]). Зокрема це:

– відносне відхилення частоти на виході генераторів при підвищенні

$$\delta f_{dyn}^- = [(f_{dyn \min} - f_{Gstd}) / f_{Gstd}] 100\% \quad (3.9)$$

і зниженні навантаження

$$\delta f_{dyn}^+ = [(f_{dyn \max} - f_{Gstd}) / f_{Gstd}] 100\%; \quad (3.10)$$

– відносне відхилення напруги на виході генераторів при підвищенні

$$\delta U_{dyn}^- = [(U_{dyn \min} - U_{Gstd}) / U_{Gstd}] 100\% \quad (3.11)$$

і зниженні навантаження

$$\delta U_{dyn}^+ = [(U_{dyn \max} - U_{Gstd}) / U_{Gstd}] 100\%; \quad (3.12)$$

– час відновлення частоти на виході генераторів при підвищенні t_{fin} і зниженні потужності t_{fde} ;

– час відновлення напруги на виході генераторів при підвищенні – t_{uin} і зниженні потужності – t_{ude} .

Ці показники характеризують «якість» електроенергії суднової мережі.

Чисельні значення всіх показників якості (крім W), визначаються в ході розрахунків поточних значень (наприклад, рис.3.1) відповідних режимних показників. Відносні витрати енергії W розраховуються [3] по співвідношенню

$$\overline{W} = \int_0^T \overline{g_e M_D \omega_D} dT \quad (3.13)$$

де $\overline{M_D}$ і $\overline{\omega_D}$ – відносний момент і кутова швидкість обертання теплового двигуна;

$$\overline{g_e} = g_e / g_{e0} - \quad (3.14)$$

відносна поточна питома витрата палива, обумовлена [3] як

$$\overline{g_e} = \begin{cases} 0,983 + 1,22(P_D - 0,882)^2, & \text{при } P_D \geq 0,882 \\ 0,983 + 0,315(P_D - 0,882)^2, & \text{при } P_D < 0,882 \end{cases} \quad (3.15)$$

Кількісна оцінка ступеня показників якості маневрування та показників функціонування ГЕЕУ здійснюється за результатами розрахунків перехідних режимів роботи ГЕЕУ в складі пропульсивних комплексів на маневрах. На рис. 3.1, як приклад, наведені поточні значення основних режимних показників і деякі показники якості при виконанні електроходом комбінації маневрів «розгін ГЕЕУ – реверс ГЕЕУ на задній хід до зупинки електрохода». На такому «комбінованому маневрі» найбільшою мірою «проявляються» динамічні показники роботи ГЕЕУ.

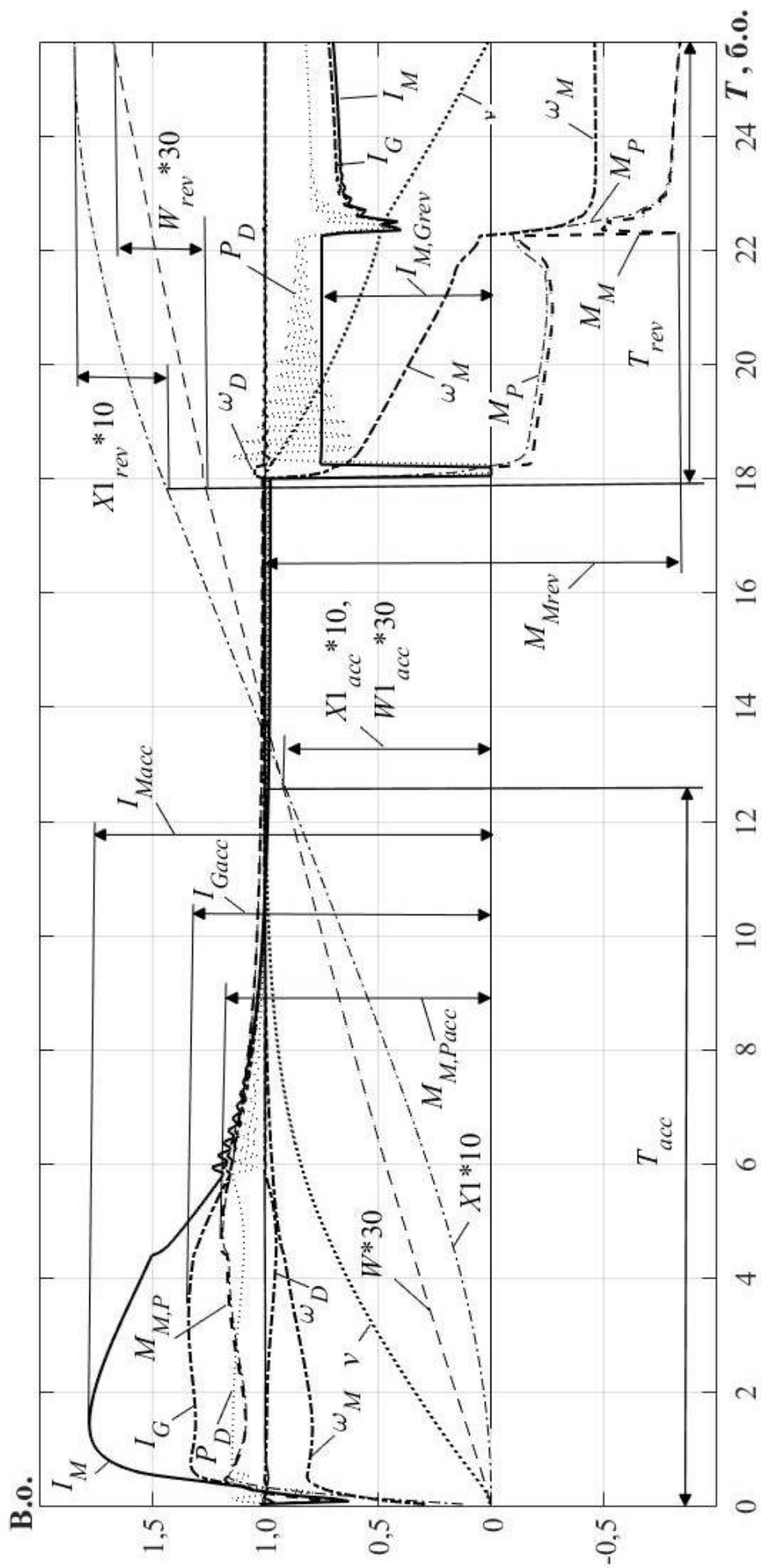


Рисунок 3.1 – Поточні значення режимних показників електрохода при виконанні комбінації маневрів «розгін ГЕЕУ

– реверс ГЕЕУ на задній хід до зупинки електрохода»

На рис. 3.1 показані закони зміни режимних показників при виконанні розгону електрохода до сталої швидкості, яка задається (в даному випадку номінальної) – $(0 < T < 12,5)$, та реверса електрохода на задній хід до його зупинки ($v = 0$) – $(18 < T < 25,7)$. Одна поділка по осі часу відповідає – 13,5 с.

Початковими умовами є: працюючий на холостому ходу генераторний агрегат, параметри електроенергії (частота та напруга) – номінальні, гребні електродвигуни нерухомі; швидкість судна $v = 0$.

Рукоятка поста управління, перекладається у положення відповідне заданому значенню частоти обертання гребного гвинта (гвинтів) – заданої швидкості руху судна. Вона визначає значення відносної частоти живлення ГЕД – α . На виході функціонального блоку FC частотного перетворювача формується сигнал відносної напруги живлення ГЕД $\gamma = f(\alpha)$. На ГЕД подається живлення з відповідними значеннями частоти й діючого значення напруги. З'являються струм I_M і момент M_M гребних електродвигунів, починає зростати швидкість їх обертання ω_M . Внаслідок цього гребні гвинти створюють упор P_P і швидкість руху електроходу v починає зростати. Водночас зростає момент опору M_P , який навантажує гребні електродвигуни (рис. 3.1). Значення стрибків струму I_M та моменту M_M ГЕД в початковий момент часу визначаються різницею між заданою (α) й фактичною (ω_M) швидкістю його обертання (у відносних одиницях) та уставками відповідних зворотних зв'язків. Пропорційно струму ГЕД змінюється й струм I_G та момент M_G синхронного генератора. Тепловий двигун отримує навантаження, швидкість його обертання ω_D зменшується, автоматичний регулятор частоти обертання зміщує рейку паливного насоса, збільшуючи подачу палива. Момент M_D і, внаслідок цього, потужність P_D зростають (рис. 3.2, а).

У міру зростання швидкості обертання гребних електродвигунів ω_M , відхилення основних режимних показників (описаних вище) зменшується і наближається до сталих значень, згідно з положенням поста управління (у випадку на рис. 3.1 – це відносна одиниця). Закінченням розгону вважається досягнення швидкості руху електрохода сталою значення.

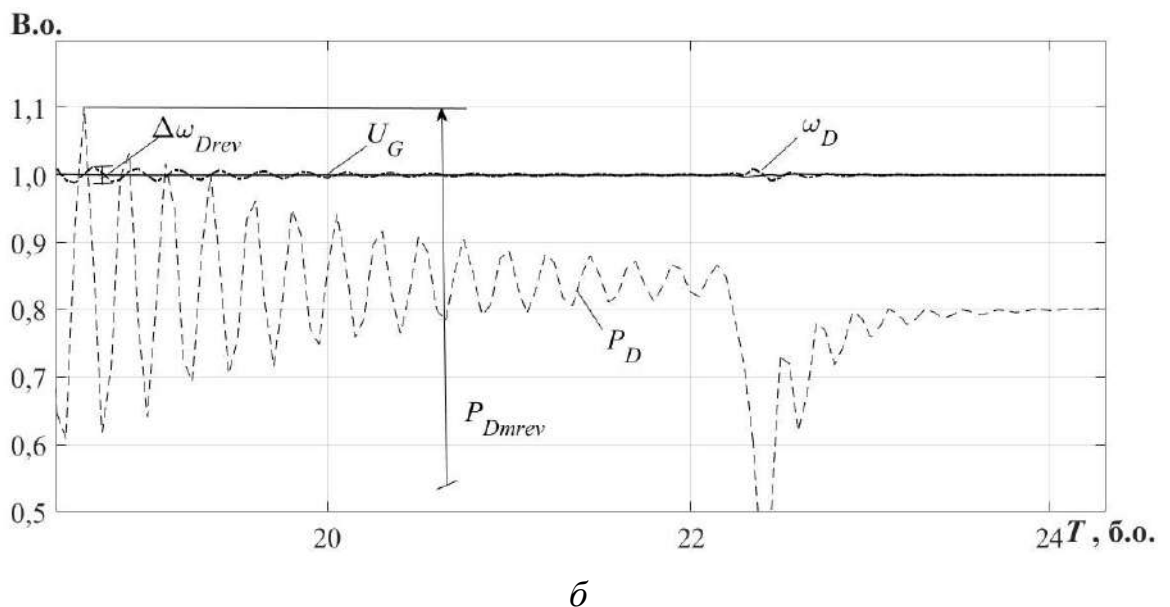
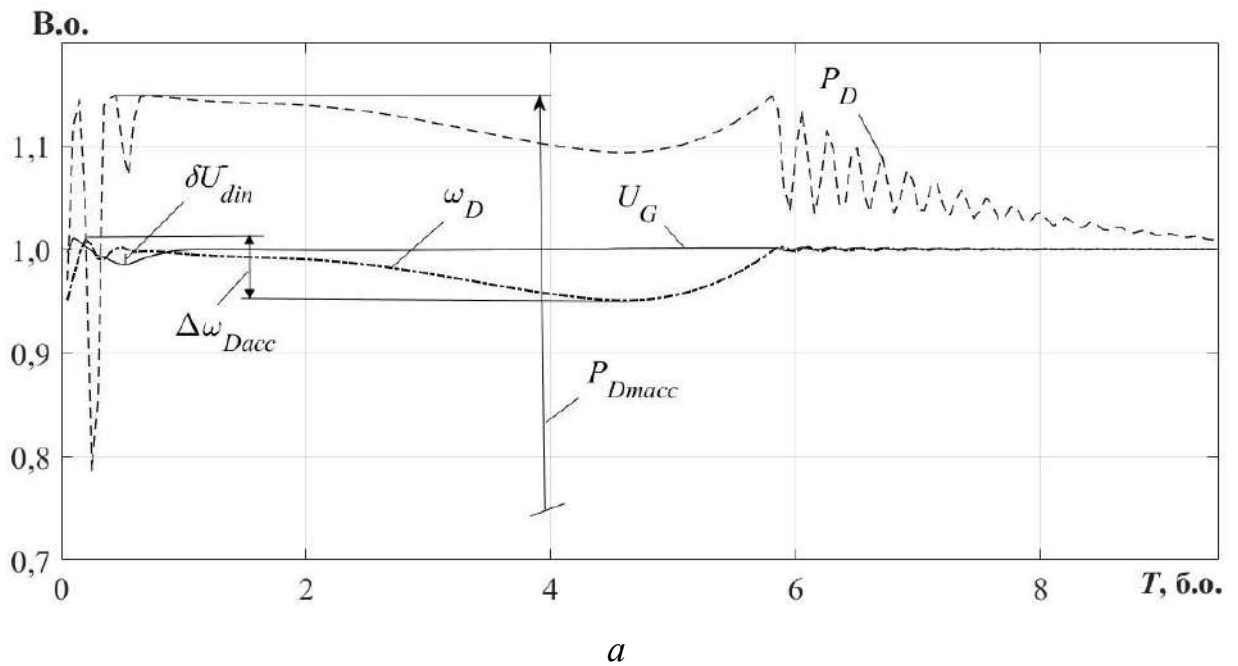


Рисунок 3.2 – Поточні значення режимних показників і деякі показники якості (збільшення): *a* – при розгоні ГЕЕУ; *б* – при реверсі ГЕЕУ на задній хід

При реверсі ГЕЕУ рукоятку поста управління перекладають з положення «вперед» в одне з положень «назад».

Після припинення подачі енергії до ГЕД, він переходить у режим вільного обертання, при якому його момент M_M стрімко падає до нуля (рис. 3.1), а швидкість обертання до значення $\omega_M = (0,6-0,7)\omega_{Mstd}$. При цьому можна спостерігати максимальне відхилення кутової швидкості обертання первинного двигуна ω_M й напруги генератора U_G (рис. 3.2, б).

Другий етап реверса – етап динамічного гальмування, коли гребний гвинт, за рахунок енергії потоку, що набігає, продовжує обертатись у тому ж напрямку й розвиває негативний момент опору та працює в режимі гідротурбіни. Для зупинки гвинта необхідно щоб ГЕД розвивав гальмівний момент (негативний обертаючий момент) більше, ніж обертаючий момент гвинта. При цьому, уся енергія, що запасена на гвинті, гаситься в ланці постійного струму на гальмівному опорі перетворювача частоти. Струм ГЕД I_M (струм динамічного гальмування) при цьому приймає фіксоване значення й визначає тривалість цього етапу, який закінчується при досягненні швидкості обертання ГЕД $\omega_M = 0$ (рис. 3.1).

Третій етап реверса – частотно-керований розгін ГЕД у оборотньому напрямку. Під дією «негативного» обертаючого моменту гвинт загальмовується і починає розгортатися в протилежному напрямку, створюючи ефективне гальмування руху судна в режимі гідравлічного гальма. Під дією гвинта, що обертається в протилежну сторону, судно зупиняється ($v = 0$).

Отже, в абсолютних одиницях, у даному прикладі, тривалість розгону становить – 2,8 хвилини. Реверса до зупинки електрохода – 1,7 хвилини. Це цілком відповідає показникам інерційних характеристик суден-електроходів [84] – [87].

На рис. 3.2 більш детально (збільшений масштаб від рис. 3.1) представлені показники якості первинного двигуна й напруги генераторів при розгоні (а) та реверсі на задній хід (б) відповідно.

Аналіз перехідних режимів роботи, з метою їх подальшого поліпшення, ускладнений тим, що число безрозмірних параметрів – велике, а обсяг інформації, необхідної для їхнього розрахунку, досить обмежений. Тому, визначення чисельних значень цих параметрів іноді досить проблематично. Кількісний аналіз поведінки ГЕЕУ на маневрах і пошуки шляхів поліпшення маневрених характеристик виявляються нереальними.

У той же час відомо [9, 88], що значимий вплив на показники якості роботи складних електромеханічних систем надає лише невелике (до 6-10) число параметрів. Відповідно до цього, необхідно виявити по кожному показнику якості значимі параметри й оцінити внески цих параметрів у відповідні показники. Інші параметри можна буде віднести до шумового поля та у подальших дослідженнях вважати неварійованими. Це дозволить надалі істотно скоротити обсяг обчислювальних процедур, оскільки можна буде оперувати невеликою кількістю суттєво впливаючих параметрів.

3.2 Методи дослідження

Аналіз математичної моделі (2.3) – (2.88) дозволив виявити безрозмірні параметри пропульсивних комплексів, які впливають на показники якості роботи електроходів на маневрах. Це:

- критерій динамічної подібності теплового двигуна – N_D ;
- коефіцієнт підсилення по регульованій величині (зміні швидкості обертання теплового двигуна) ходу рейки паливного насоса – K_P ;
- коефіцієнт жорсткого зворотнього зв'язку ходу рейки паливного насоса – K_{Fb} ;
- коефіцієнт гнучкого (ізодромного) зворотнього зв'язку ходу рейки паливного насоса – K_{is} ;
- безрозмірні параметри генератора – $K_{d1}, K_{q1}, K_{G1}, K_{G2}$;
- безрозмірні параметри системи збудження генератора – K_{Uq}, K_{Id}, K_U ;
- критерій динамічної подібності системи збудження генератора – N_{fG} ;
- коефіцієнт підсилення системи збудження синхронного генератора по основному сигналу – K_{f1} ;
- коефіцієнт по впливу, що обурює, системи збудження синхронного генератора – K_{f2} ;
- коефіцієнт по відхиленню регульованої величини системи збудження синхронного генератора – K_{f3} ;
- енергоозброєність електрохода – N_X ;

- критерій динамічної подібності гребного електродвигуна – N_M ;
- безрозмірні параметри $C_{M17} - C_{M26}$ частотно-керованого ГЕД;
- безрозмірні параметри $C_{11} - C_{13}$, $C_{21} - C_{23}$, $C_{61} - C_{65}$, $C_{\lambda 2}$, $C_{\lambda 21}$ корпусу електрохода;
- критерій динамічної подібності корпусу електрохода – N_Ω .

В основі пошуку параметрів, зміни значень яких суттєво впливають на показники якості маневрування, закладено методи активного планування експериментів [9], [59].

На першому етапі аналізу було виявлено параметри, які суттєво впливають на запропоновані показники якості й оцінено ступінь цього впливу. В основі аналізу закладено метод випадкового балансу. У його основі лежить матриця випадкового балансу, що складається на основі матриці повного факторного експерименту (ПФЕ). Для її отримання чинники розділені на групи, що містять не більше чотирьох чинників. Фактори можуть знаходитися на двох рівнях: одиниці з плюсом відповідає верхній рівень (максимальне значення), одиниці з мінусом – нижній рівень (мінімальне значення). Матриця планування складається з підматриць, складених на основі ПФЕ типу 2^4 . Матриця випадкового балансу для 41 параметру (означених вище) надана в додатку Е.

Підматриці ПФЕ для різних груп факторів складаються з тих же рядків, що й базова, однак порядок чергування рядків у кожній підматриці різний і визначається за допомогою матриці випадкових чисел. Підматриці планування, об'єднані через підрядник в одну матрицю, утворюють матрицю випадкового балансу, що є вихідною для проведення експериментів (розрахунків), тобто представляє собою план проведення експериментів. У результаті розрахунків досліджуваних маневрів у точках, що задаються матрицею випадкового балансу, виходить вектор-стовпець показника якості **J**.

Аналіз впливу параметрів пропульсивних комплексів (факторів) на кожен показник якості з метою виявлення значимих (для кожного показника), проводиться за методикою, скорочено представленою нижче.

На першому етапі аналізу будується діаграма розсіювання. Вклад фактора E визначається величиною центрів зміщення змінних по кожному стовпцю. Для кількісної оцінки суттєвих факторів складається матриця ПФЕ типу 2^l і допоміжна матриця J^{VS} з результатами розрахунків матриці ПФЕ. На основі допоміжної матриці складається модель показника якості J виду

$$J = \sum_{i=0}^k b_i q_i \quad (3.16)$$

У формулі (3.16) значенням b_i , $i = 0, 1, \dots, l$ відповідає лінійна модель показника. При $i = \overline{l+1, k}$ коефіцієнти b_i відображають ефекти взаємодії факторів. Коефіцієнти b_i визначаються як

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^m q_{ir} \overline{J}_j \quad (3.17)$$

де $m = 2$;

$$\overline{J}_j = \frac{1}{\eta_j} \sum_{r=1}^{\eta_j} J_{jr}, \quad j = \overline{1, m}; \quad (3.18)$$

η_j – число паралельних розрахунків.

Статистичний аналіз результатів, які отримуються на кожному етапі аналізу проводиться в наступній послідовності:

– визначаються вибіркові дисперсії по рядках матриці J^{VS}

$$s_j^2 = \frac{1}{\eta_j - 1} \sum_{r=1}^{\eta_j} (J_{jr} - \overline{J}_j)^2, \quad j = \overline{1, m}; \quad (3.19)$$

– знаходяться дисперсії відтворюваності одиничного значення

$$s^2\{J\} = \frac{\sum_{j=1}^m s_j^2 (\eta_j - 1)}{\sum_{j=1}^m (\eta_j - 1)}, \quad (3.20)$$

дисперсія відтворюваності середнього значення

$$s^2\{\overline{J}\} = \frac{s^2\{J\}}{m} \sum_{j=1}^m \frac{1}{\eta_j}, \quad (3.21)$$

і дисперсія коефіцієнтів регресії

$$s^2\{b_i\} = \frac{s^2\{\bar{J}\}}{m}, \quad \bar{1}, \bar{l}; \quad (3.22)$$

проводиться перевірка значущості коефіцієнтів за критерієм Стюдента при числі свободи

$$f = \sum_{j=1}^m \eta_j - m, \quad (3.23)$$

і рівні значущості α ;

– визначається умова значущості

$$|b_i| > ts\{b_i\}, \quad i = \bar{1}, \bar{l}. \quad (3.24)$$

За результатами першого етапу виявляються суттєві параметри. Як показали експерименти, кількість параметрів, які суттєво впливають на показники якості зменшується з декількох десятків до 4-7.

На другому етапі будуються аналітичні моделі показників, які являють собою наближені залежності показників якості від **суттєвих** параметрів (факторів) комплексу.

При встановленні зв'язків показників якості J із параметрами пропульсивного комплексу q_i використовується прийом адекватного уявлення показника [9], [59]

$$J = J(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (3.25)$$

наближеною аналітичною моделлю

$$J^* = J^*(q_1, q_2, \dots, q_n). \quad (3.26)$$

При побудові таких аналітичних моделей найбільше застосування отримало многочленне наближення $J^*(\mathbf{V}, q)$, де \mathbf{V} – вектор коефіцієнтів наближеного полінома.

Для аналізу судових електромеханічних систем найчастіше досить обмежитися поданням показників J^* поліномом першого порядку

$$J^* = \sum_{i=0}^n b_i q_i + \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} q_i q_j, \quad i \neq j \quad (3.27)$$

Вагові внески по кожному параметру будемо визначати як

$$b_{ik} = \frac{\Delta J_k (\Delta q_i)}{\overline{J_k}} \quad (3.28)$$

де $\overline{J_k}$ – середнє значення показника якості,

$\Delta J_k (\Delta q_i)$ – максимальне збільшення показника якості при зміні q_i -го безрозмірного параметра в повному діапазоні його зміни.

Безрозмірні параметри використовуються в нормованому вигляді. Нормування проводиться по співвідношенню

$$q_i^n = \frac{q_i - q_{i0}}{\Delta q_i}, \quad (3.29)$$

де q_{i0} – середнє значення i -го параметра;

$$\Delta q_i = q_{i\max} - q_{i0} = q_{i0} - q_{i\min} \quad (3.30)$$

діапазон зміни i -го параметра.

Аналітичні моделі показників якості – наближені їх залежності від значимо впливаючих параметрів – отримуються численими експериментами, виконаними по матрицям ПФЕ. Варіювання параметрів в методі проводиться на двох рівнях. Нормування параметрів проводиться за формулами (3.29), (3.30). Нормовані таким чином максимальні й мінімальні значення параметрів рівні відповідно +1 і -1, а середні значення рівні нулю.

Матриця планування $Q_{4.1}$ ПФЕ при семи факторах передбачає виконання $N = 2^7 = 128$ варіантів розрахунків. Скоротити кількість розрахунків можливо за рахунок переходу до дрібної репліки типу 2^{7-1} . Частина (перша половина) остаточної матриці – 32 варіанти розрахунків приведена в додатку Ж.

У результаті реалізації схеми планування знаходяться значення кожного показника $J = (J_1, J_2, \dots, J_N)$. Розрахунок коефіцієнтів апроксимуючих поліномів здійснюється за формулами

$$b_0 = \frac{\sum_{r=1}^N J_r}{N}; \quad (3.31)$$

$$b_i = \frac{\sum_{r=1}^N q_{ir} J_r}{N}; \quad (3.32)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{r=1}^N q_{ir} q_{jr} J_r}{N}. \quad (3.33)$$

Оцінка адекватності аналітичної моделі показників якості здійснюється шляхом співставлення значень коефіцієнтів b_0 зі значеннями показників J , знайденими при середніх значеннях факторів. Величини b_0 і J не повинні суттєво відрізнятись.

3.3 Результати досліджень

Аналіз технічних характеристик існуючих електроходів дозволив розрахувати чисельні значення отриманих безрозмірних параметрів і критеріїв динамічної подібності та визначити можливі діапазони їх зміни (табл. 3.1).

Серії чисельних розрахунків перехідних режимів ГЕЕУ на маневрах виконаних по планам матриць планування експериментів за допомогою розробленого в розділі 2 методу розрахунку перехідних режимів й обробка їх результатів дозволили проаналізувати вплив зміни значень (у всьому можливому діапазоні їх зміни) всіх відзначених безрозмірних параметрів та критеріїв динамічної подібності на обрані показники якості маневрування. За результатами аналізу – [89] зі всієї сукупності параметрів виявлені ті, вплив яких на обрані показники якості є значущим, із внеском більше 2%. Це безрозмірні параметри: N_D , N_X , N_M , C_{M17} , C_{M18} , C_{M20} , C_{M23} . Вплив інших параметрів – незначний, і їх можна обґрунтовано віднести до шумового поля та надалі приймати неварійованими.

Таблиця 3.1 – Діапазони зміни безрозмірних параметрів пропульсивних комплексів електроходів

Безрозм. параметр	Діапазон значень	Безрозм. параметр	Діапазон значень	Безрозм. параметр	Діапазон значень
K_{d1}	0,58–1,12	C_{M17}	0,016–0,41	C_{12}	1,12–1,67
K_{q1}	0,16–0,29	C_{M18}	23,73–40	C_{13}	– 0,16–0,24
K_{f1}	0,16–0,24	C_{M19}	1	C_{21}	3,37–3,58
K_{f2}	– 0,01– – 0,015	C_{M20}	0,895–0,97	C_{22}	21,19–23,44
K_{f3}	0,16–0,24	C_{M21}	0,0001– 0,0002	C_{23}	1,69–2,87
K_{uq}	4,22–6,15	C_{M22}	1,1–1,12	C_{61}	2,39–3,56
K_{id}	5,86–19,62	C_{M23}	0,23–1,2	C_{62}	0,048
K_U	4,22–6,15	C_{M24}	12–27,5	C_{63}	1,3–1,39
K_{G1}	-0,03–0,01	N_M	5,1–6,06	C_{64}	0,239–0,241
K_{G2}	1,31–1,69	N_X	0,132–0,2	C_{65}	4,076–4,141
N_{fG}	5,6–5,65	C_{M25}	0,256–1,175	$C_{\lambda 2}$	1,37–1,65
N_D	0,64–1,94	C_{M26}	7,58–13,5	$C_{\lambda 21}$	0,74–1,3
K_M	1,006–1,07	$K_{\gamma G}$	0,118–0,121	N_{Ω}	0,99–1,1

Як приклад, у таблиці 3.2 показаний вплив на показники якості маневрування зміни значень безрозмірних параметрів N_X і C_{M23} .

Таблиця 3.2 – Вплив зміни безрозмірних параметрів N_X і C_{M23} на основні показники якості маневрування при реверсі ГЕЕУ електрохода

Показник якості	Значення параметра C_{M23}			Значення в параметра N_X		
	0,03	0,60	1,20	0,13	0,16	0,20
Максимальна швидкість v_{MAX} , в.о.	1	0,99	0,99	0,91	0,98	0,99
Тривалість маневру T_M , в.о.	1,13	1,2	1,27	1,82	1,26	1,4
Вибіг $X1$, в.о.	10,5	11	11,6	11,6	10,9	14
Витрати енергії W , в.о.	68,5	68,3	72,2	106	74,2	81
Час виходу на задану швидкість $T_{M_{pset}}$, в.о.	0,61	0,69	0,75	—*	0,9	0,67
Вибіг на задану швидкість $X1_{pset}$, в.о.	3,8	4,5	5	—*	6,41	4,66
Витрати енергії до досягнення судном заданої швидкості W_{pset} , в.о.	40,1	40,4	43,5	—*	53,9	41
Максимальне збільшення потужності первинних двигунів P_{Dm}	1,87	1,39	1,41	2,33	1,93	1,97
Кидки струму генераторів при реверсі I_{Grev}	1,44	1,30	1,28	1,34	1,46	1,28
Кидки обертаючого моменту ГЕД при реверсі M_{Mrev}	1,48	1,23	1,19	1,26	1,39	1,32
Кидки струму ГЕД при реверсі I_{Mrev}	1,8	1,83	1,82	1,94	1,95	1,82
Відносне відхилення частоти на виході генераторів при підвищенні навантаження δf_{dyn}^-	6,65	6,62	6,7	10,8	8,69	8,94
Відносне відхилення напруги на виході генераторів при підвищенні навантаження δU_{dyn}^-	3,61	1,83	1,88	2,92	3,86	6,12
Час відновлення напруги на виході генераторів при підвищенні потужності $t_{u in}$, с	1,3	1,15	1,1	2,05	1,4	1,4
Час відновлення частоти на виході генераторів при підвищенні потужності $t_{f in}$, с	1,25	0,55	0,55	2,55	1,7	1,05

* – судно не досягло заданої швидкості $v = 0,95 v_0$

При цьому, в ході чисельних експериментів, для виявлення ступеня впливу параметрів комплексу на показники якості, зворотні зв'язки систем автоматичного регулювання були «відключені». У результаті, чисельні значення показників якості виходять явно завищеними, однак саме це дозволяє виявити ступінь значимості впливу кожного параметра.

Остаточні результати аналізу впливу безрозмірних параметрів на обрані показники якості маневрування наведені в таблиці 3.3. При цьому, внески величиною менш ніж 2 % (для відносного відхилення частоти і відносного відхилення напруги на виході генераторів (суднової мережі) при підвищенні навантаження – 0,2 %) не враховуються.

Таблиця 3.3 – Внески безрозмірних параметрів та ефектів їх взаємодії у показники якості маневрування при реверсі ГЕЕУ електрохода

Показник якості маневрування	Внески безрозмірних параметрів та ефектів їх взаємодії								
	N_D	N_X	N_M	C_{M17}	C_{M18}	C_{M20}	C_{M23}	$\frac{N_X}{C_{M23}}$	$\frac{C_{M20}}{C_{M23}}$
Максимальна швидкість v_{MAX} , в.о.	–	8,9	–	–	2,6	5,7	1,1	–	0,031
Тривалість маневру T_M , в.о.	3,2	45,3	4,7	3,8	38,2	24,1	14,7	0,88	0,94
Вибіг $X1$, в.о.	4,2	34,3	6,3	5,3	19,3	23,7	13,4	0,54	–
Витрати енергії W , в.о.	6,3	47,5	4,5	3,7	37,7	29,6	10,8	3,48	2,61
Час виходу на задану швидкість T_{Mpsets} , в.о.	–	57,4	–	–	64,2	14,2	23,1	–	–
Вибіг на задану швидкість $X1_{psets}$, в.о.	–	82	–	–	51,5	36,9	29,5	–	–
Витрати енергії до досягнення судном заданої швидкості W_{psets} , в.о.	7	55,8	–	–	58,1	11	13,8	–	–
Максимальне збільшення потужності первинних двигунів P_{Dm}	19,1	66	–	–	6,8	6,7	52,8	2,3	1,17
Кидки струму генераторів при реверсі I_{Grev}	–	21,6	–	–	13	–	12,4	–	–
Кидки обертаючого моменту ГЕД при реверсі M_{Mrev}	–	38,5	4	–	32,2	4,3	30,5	–	–
Кидки струму ГЕД при реверсі I_{Mrev}	–	13,6	–	–	24,2	8,4	–	–	–
Відносне відхилення частоти на виході генераторів при підвищенні навантаження δf_{dyn}^-	4,9	4,1	–	–	–	–	2,7	–	–
Відносне відхилення напруги на виході генераторів при підвищенні навантаження δU_{dyn}^-	0,5	4,3	–	–	0,5	0,5	2	–	–
Час відновлення напруги на виході генераторів при підвищенні потужності t_{uin} , с	13,7	86,4	–	–	50	18,2	31,8	–	–
Час відновлення частоти на виході генераторів при підвищенні потужності t_{fin} , с	54,6	363,6	–	–	–	–	127,3	–	–

За результатами табл. 3.3 для кожного показника якості отримані, як було зазначено в підрозділі 3.2, рівняння внесків безрозмірних параметрів у відповідний показник якості:

– максимальна швидкість до кінця маневру

$$v_{\text{MAX}} = 0,99 + 8,9N_X - 2,6C_{M18} - 5,7C_{M20} - 1,1C_{M23} + 0,031C_{M20}C_{M23}; \quad (3.34)$$

– тривалість маневру

$$T_M = 1,26 - 45,3N_X + 4,7N_M + 3,8C_{M17} + 38,2C_{M18} - 24,1C_{M20} + 14,7C_{M23} - \\ - 0,88N_XC_{M23} - 0,94C_{M20}C_{M23}; \quad (3.35)$$

– вибіг судна

$$X1 = 11,4 - 4,2N_D + 34,3N_X + 6,3N_M - 5,3C_{M17} + 19,3C_{M18} - 23,7C_{M20} + 13,4C_{M23} + \\ + 0,54N_XC_{M23}; \quad (3.36)$$

– витрати енергії

$$W = 71,7 - 6,3N_D - 47,5N_X + 4,5N_M + 3,7C_{M17} + 37,7C_{M18} - 29,6C_{M20} + 10,8C_{M23} - \\ - 3,48N_XC_{M23} + 2,61C_{M20}C_{M23}; \quad (3.37)$$

– час виходу на задану швидкість

$$T_{M_{\text{pset}}} = 0,76 - 57,4N_X + 64,2C_{M18} - 14,2C_{M20} + 23,1C_{M23}; \quad (3.38)$$

– вибіг на задану швидкість

$$X1_{\text{pset}} = 5,1 - 82,1N_X + 51,5C_{M18} + 36,9C_{M20} + 29,5C_{M23}; \quad (3.39)$$

– витрати енергії до досягнення судном заданої швидкості

$$W_{\text{pset}} = 44 - 7N_D - 55,8N_X + 58,1C_{M18} - 11C_{M20} + 13,8C_{M23}. \quad (3.40)$$

– максимальне збільшення потужності теплових двигунів

$$P_{Dm} = 1,41 - 19,1N_D - 66N_X + 6,8C_{M18} - 6,7C_{M20} + 52,8C_{M23} - 2,3N_XC_{M23} - \\ - 1,17C_{M20}C_{M23}; \quad (3.41)$$

– кидки струму генераторів при реверсі

$$I_{\text{Grev}} = 1,3 + 21,6N_X - 13C_{M18} - 12,4C_{M23}; \quad (3.42)$$

– кидки обертаючого моменту ГЕД при реверсі

$$M_{Mrev} = 1,15 + 38,5N_X - 4N_M - 32,2C_{M18} - 4,3C_{M20} - 30,5C_{M23}; \quad (3.43)$$

– кидки струму ГЕД при реверсі

$$I_{Mrev} = 1,82 - 13,6N_X + 24,2C_{M18} - 8,4C_{M20}; \quad (3.44)$$

– відносне відхилення частоти на виході генераторів при підвищенні навантаження

$$\delta f_{dyn}^- = 6,7 + 4,9N_D - 4,1N_X + 2,7C_{M23}; \quad (3.45)$$

– відносне відхилення напруги на виході генераторів при підвищенні навантаження

$$\delta U_{dyn}^- = 1,81 + 0,5N_D + 4,3N_X + 0,5C_{M18} - 0,5C_{M20} - 2C_{M23}; \quad (3.46)$$

– час відновлення напруги на виході генераторів при підвищенні потужності

$$t_{u\ in} = 1,1 + 13,6N_D - 86,4N_X - 50C_{M18} + 18,2C_{M20} - 31,8C_{M23}; \quad (3.47)$$

– час відновлення частоти на виході генераторів при підвищенні потужності

$$t_{f\ in} = 0,55 + 54,6N_D - 363,6N_X - 127,3C_{M23}; \quad (3.48)$$

Таким чином, відповідно до поставленої мети, із сукупності параметрів, що впливають на показники якості роботи ГЕЕУ електроходів на маневрах, виявлені значимі параметри. Отримані аналітичні залежності показують ступінь і характер їх впливу. Інші параметри можна обґрунтовано віднести «до шумового поля» й в подальших дослідженнях вважати неварійованими.

3.4 Практичне застосування

Розроблені аналітичні залежності дозволяють не тільки оцінювати вплив параметрів пропульсивного комплексу на основні показники якості роботи ГЕЕУ при маневруванні, але й відшукувати шляхи поліпшення цих показників.

Проілюструємо це стосовно до маневру «реверс електрохода». Поставимо завдання – спробувати зменшити відносне відхилення напруги на виході генераторів при підвищенні навантаження до 1 %.

З рівняння (3.46) видно, що параметрами, що оказують найбільш значимий вплив на цей показник, є параметри N_X і C_{M23} , а також, рівною мірою, N_D , C_{M18} та C_{M20} . Для того щоб δU_{dyn}^- стало рівним 1 %, необхідно, щоб сума всіх (за винятком першого) доданків правої частини стала рівною $(-0,81)$.

Іншими словами:

$$-0,81 = 0,5 N_D + 4,3 N_X + 0,5 C_{M18} - 0,5 C_{M20} - 2 C_{M23}. \quad (3.49)$$

Аналіз залежності (3.49) показує, що для зменшення відносного відхилення напруги на виході генераторів необхідно: залишити на рівні середніх значень ($N_X = 0,17$; $C_{M23} = 1,26$), збільшити до максимального ($C_{M20} = 0,97$), зменшити до мінімального значення ($C_{M18} = 15,7$). Параметр N_D буде визначений далі з рівняння внесків. Рівняння внесків (3.37) при цьому прийме вигляд:

$$0,81 = 2(0) - 0,5N_D - 4,3(0) - 0,5(-1) + 0,5(1) = 1 - 0,54N_D^n. \quad (3.50)$$

$$\text{Нормоване значення параметра } N_D^n = \frac{N_D - N_{D0}}{\Delta N_D} = \frac{N_D - 1,3}{0,64} = 0,352. \quad (3.51)$$

Звідси, безрозмірне значення параметра $N_D = 1,58$.

Як приклад розглянемо проект конкретного електрохода (назвемо його «Project») і його ГЕЕУ (Табл.3.4).

Таблиця 3.4 – Основні характеристики електрохода «Project»

Довжина судна по конструктивній ватерлінії	160 м
Швидкість судна	22 вузла
Номінальні параметри турбогенераторів	
кількість x потужність	2 x 36 МВт
напруга	10,5 кВ
частота обертання	3000 об/хв
частота живлення	50 Гц
Номінальні параметри гребних електродвигунів	
кількість x потужність	3 x 20 МВт
напруга	3 кВ
струм статора	4496 А
частота обертання	120–165 об/хв
Трансформатори відбору потужності	4 x 2,5 МВА

Чисельні значення відповідних безрозмірних параметрів, розраховані по наведеним вище співвідношенням, наведені в табл.3.5.

Таблиця 3.5 – Значення безрозмірних параметрів електрохода «Project»

Параметр	Чисельні значення параметрів	
	«Project»	Необхідне значення
N_D	1,282	1,58
N_X	0,2	0,17
C_{M18}	23,73	63,95
C_{M20}	0,96	0,97
C_{M23}	1,2	1,26

Повернемося до співвідношень, по яких розраховуються безрозмірні параметри. У них параметри: L , v_0 , P_{e0} , m , λ_{11} – є заданими (це параметри судна) і змінюватися не можуть.

Виходячи із цього, як впливає з отриманих співвідношень, для підтримки відносного відхилення напруги на виході генераторів у межах 1 % необхідно:

- зменшити момент інерції J_D , наведений до вала теплового двигуна або збільшити відношення M_{D0} / ω_{D0} на 23 %;
- зменшити сумарний упор гвинтів на 15 %;
- збільшити відношення C_M / r_{2M}' на 29 %;
- зменшити ковзання ротора АД з 0,04 до 0,03;
- збільшити на 5 % відношення r_{1M} / r_{2M}' .

Проведений аналіз і його рекомендації носять деякою мірою умовний характер, оскільки не враховують впливи цих параметрів на інші показники якості. Однак вони чітко показують вплив на якість роботи ГЕЕУ основних параметрів електроходів.

3.5 Короткі висновки

1. При аналізі динамічних режимів роботи складних електромеханічних систем важливим завданням є визначення значимих параметрів й оцінка ступеня їх впливу. Це сприяє цілеспрямованості досліджень, виявленню об'єктивних закономірностей розглянутих процесів, скороченню обсягу обчислювальних робіт.

2. Із сукупності параметрів, що впливають на показники якості роботи ГЕЕУ електроходів, виявлені значимі параметри. Отримані аналітичні залежності, що показують характер і ступінь їх впливу. Інші параметри можна приймати неварійованими.

3. Запропоновані залежності показують можливі шляхи поліпшення якості перехідних процесів ГЕЕУ електроходів.

4 ОПТИМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ ГРЕБНИМИ ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ ЕЛЕКТРОХОДІВ НА МАНЕВРАХ

4.1 Стан питання, що розглядається

При пошуку найкращого управління гребними електродвигунами ГЕЕУ критеріями їх оцінки треба, у першу чергу, вибирати показники, що оцінюють ефективність роботи самого судна, як «старшої» системи. Тільки так може бути забезпечений системний підхід до пошуку оптимальних параметрів сигналів управління.

Стосовно до гребних електроенергетичних установок із частотно-регульованими ГЕД традиційно пропонується пропорційний закон управління, запозичений з теорії частотного управління загальнопромисловими електроприводами [76] – [78]

$$\frac{\gamma}{\alpha} = const, \quad (4.1)$$

де γ – відносна напруга

$$\gamma = \frac{U}{U_n}, \quad (4.2)$$

α – відносна частота

$$\alpha = \frac{f}{f_n}. \quad (4.3)$$

Однак, варто пам'ятати, що він отриманий стосовно до «електричних» показників якості роботи електродвигунів. При системному ж підході ці показники відходять на другий план. Виникає необхідність у пошуках тих сигналів управління, які забезпечать найкращі значення показників якості маневрування електрохода, з контрольованими при цьому (із заданими допусками) показниками роботи гребної електроенергетичної установки.

Для пошуку оптимального управління, яке забезпечить з одного боку – найкращі значення показників якості маневрування, з іншого боку – припустимі динамічні навантаження на гребну електроенергетичну установку й необхідні

показники якості суднової електромережі, необхідно уточнити вид та процедуру пошуку оптимальних параметрів сигналів управління.

Основними показниками якості маневрування пропонується прийняти (як приклад рішення подібних задач) мінімум гальмівного шляху судна або мінімум витрат енергії (витрат палива) на виконання маневру. Вибір показника визначається поставленими цілями й умовами виконання маневру.

4.2 Метод рішення задачі

До складу електроенергетичної установки входить два силових контури (по кількості гребних електродвигунів). Управління кожним контуром здійснюється незалежно від іншого з поста управління (ПУ), розташованого на містку. При цьому на гребні електродвигуни формуються два сигнали управління: перший – по частоті обертання (залежить від відносної частоті струму α), другий – і по відносній напрузі живлення двигуна γ .

Пропонується формувати сигнали управління у вигляді:

$$\alpha = \alpha_{prim} + K_1(1 - \exp(-K_5T)), \quad (4.4)$$

$$\gamma = K_2\alpha + K_3\alpha^2 + K_4\alpha^3 + (1 - K_2 - K_3 - K_4)\alpha^4 \quad (4.5)$$

де α_{prim} – початкове значення відносної частоти живлячої ГЕД напруги;

K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 – параметри сигналів управління, які має сенс оптимізувати.

Необхідність у початковій ненульовій α_{prim} стає очевидною з порівняння (рис. 4.1) реверсивної характеристики гребного гвинта (крива 2) з механічними характеристиками асинхронного ГЕД при зворотньому напрямку обертання магнітного поля (криві 1).

Відповідно до поставленої в роботі мети, в якості критеріїв оптимальності приймаються або мінімум гальмівного шляху судна – L_{Tmin} , або мінімум витрат енергії на виконання маневру – W_{min} . Інші критерії у вигляді умов враховуються як обмеження.

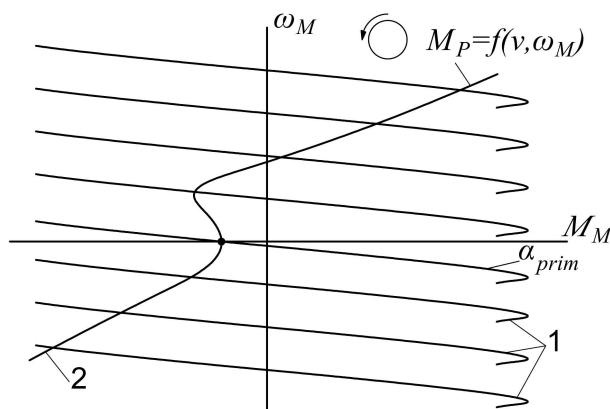


Рисунок 4.1 – Реверсивна характеристика гребного гвинта та механічні характеристики ГЕД

Поставлені задачі відносяться до області нелінійного програмування. Необхідно мінімізувати цільову функцію

$$L_T(\mathbf{K}) \rightarrow \min, K \in E^n \quad \text{або} \quad W(\mathbf{K}) \rightarrow \min, K \in E^n, \quad (4.6)$$

де $\mathbf{K} = [K_1, K_2, K_3, K_4, K_5]$ – параметри сигналів управління, що оптимізуються;

E^n – припустима область n – мірного простору.

Лінійні обмеження p у вигляді нерівностей

$$g_j(\mathbf{K}) \geq 0, j = 1, 2, \dots, p, \quad (4.7)$$

визначаються припусками з діапазону змін режимних показників ГЕЕУ.

Оптимальним рішенням буде пара \mathbf{K}^* і $L_T(\mathbf{K}^*)$ (або $W(\mathbf{K}^*)$), що складається з оптимальної точки

$$\mathbf{K}^* = [K_1, K_2, K_3, K_4, K_5] \quad (4.8)$$

і відповідного їй значення цільової функції $L_T(\mathbf{K}^*)$ (або $W(\mathbf{K}^*)$).

Відомо, що для рішення реальних практичних оптимізаційних задач, класичні існуючі методи оптимізації [90] – [92], як правило, не підходять. Потрібні спеціальні методи, що враховують специфіку і характер цільових функцій.

Значення мінімуму гальмівного шляху судна або мінімуму витрат енергії на виконання маневру відшуковуються за результатами розрахунків маневрів, які описуються складною системою алгебраїчних і диференціальних рівнянь із

численними обмеженнями у вигляді нерівностей. Ставити завдання пошуку першої і, тим більше, другої похідної цільових функцій просто нереально.

Методи пошуку оптимальних рішень будувалися виходячи з виявленого характеру цільових функцій. Вони є багатоекстремальними, з невідомою кількістю локальних мінімумів. Попередні розрахунки і їх аналіз показали, що цільові функції мають вигляд крутих і витягнутих ярів. Аналіз існуючих методів пошуку глобальних оптимумів подібних цільових функцій, дав підстави закласти в основу розроблених алгоритмів глобальної оптимізації метод глобального випадкового пошуку – випадковий мультистарт.

У чистому вигляді випадковий мультистарт неефективний через можливі повторні спуски до крапок локальних мінімумів. Тому, в алгоритм глобальної оптимізації була закладена комбінація одного з пасивних методів покриттів – методу випадкової сітки – з модифікованим методом тунельного алгоритму [9].

Склад та послідовність операцій щодо пошуку глобального оптимуму надані на рис. 4.2.

При розробці методів пошуку локальних мінімумів (внутрішніх процедур глобальної оптимізації) було знову ж враховане, що цільові функції мають явно виражений яружний характер. Виходячи з цього, алгоритми пошуку локальних оптимумів створювалися на базі комбінації методів локального спуску й способів яружного пошуку. Найбільш ефективними для рішення подібних задач виявилися методи Пауелла й Нелдера-Міда [93], [94]. Відсутність прискорення й труднощі пошуку на викривлених «ярах» і «хребтах» долаються за рахунок зміни форми багатогранника.

Яружний пошук локального оптимуму здійснювався в такий спосіб. Організовувалися два локальних спуски з прилеглих початкових крапок. З кожної крапки здійснювалися пошуки проміжних локальних мінімумів $f_1^*(x_1^*)$ і $f_2^*(x_2^*)$. Потім знаходився новий напрямок s_0^* , проведений з x_1^* в x_2^* (або навпаки, залежно від того, котрий зі знайдених проміжних мінімумів $f_1^*(x_1^*)$ або $f_2^*(x_2^*)$ більше), і уздовж його відшукувалося мінімальне значення функції $f_{opt.loc}(x^*)$, що й було локальним оптимумом.

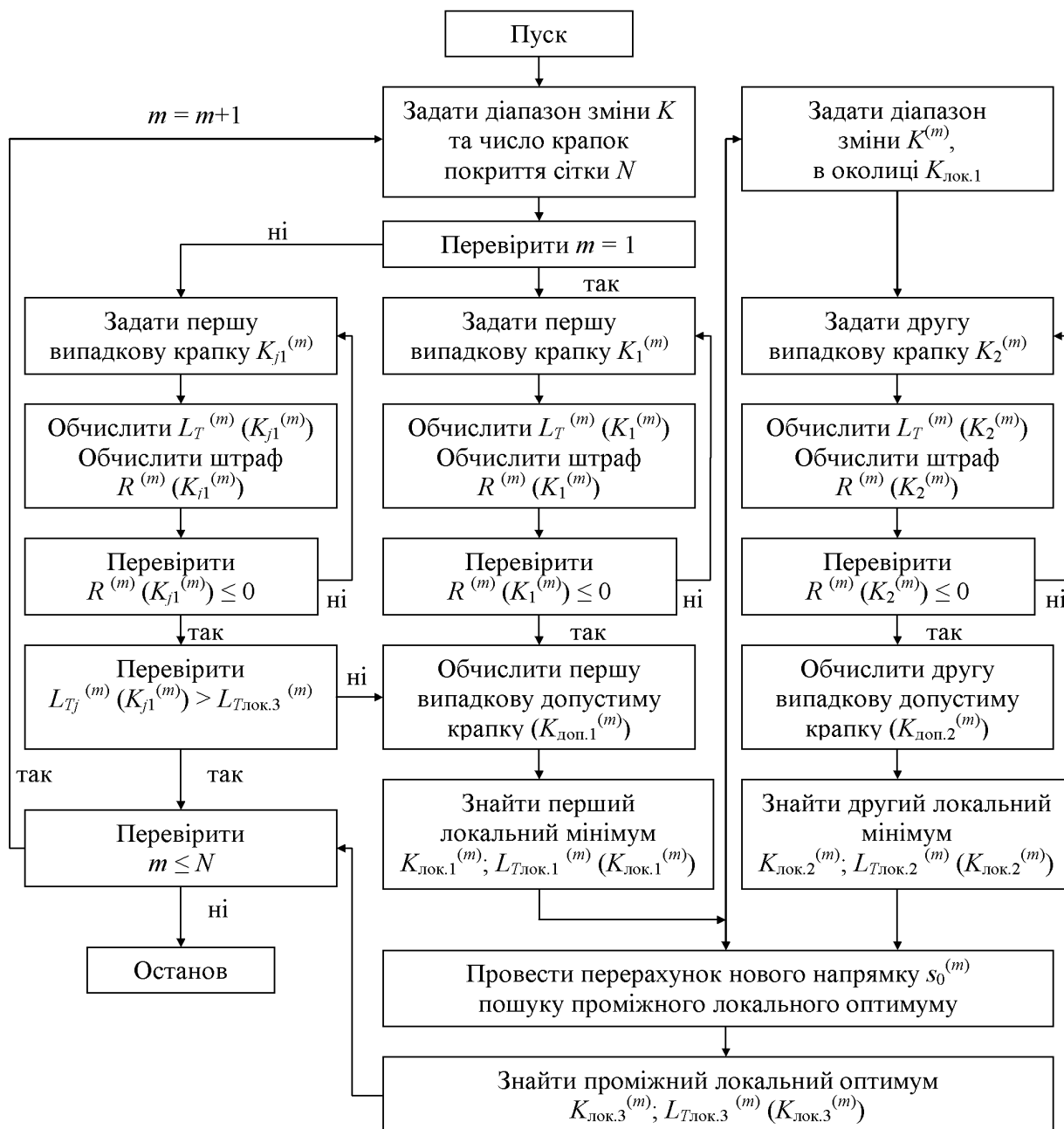


Рисунок 4.2 – Склад та послідовність операцій щодо пошуку глобального оптимуму

Для рішення задач мінімізації використовували методи оптимізації сполучалися з методом штрафних функцій [95], що дозволило звести задачі нелінійного програмування з обмеженнями до еквівалентної послідовності задач без обмежень.

Пошук оптимальних сигналів управління здійснюється в такий спосіб. Щораз, після задання випадкової початкової крапки, здійснюється розрахунок досліджуваного маневру й знаходяться відповідні значення критеріїв оптимальності (зокрема – гальмівного шляху або витрат енергії на виконання маневру). Потім, відповідно до описаної процедури руху до оптимуму, розраховуються нові вихідні дані (нові значення параметрів, що оптимізуються), знову розраховується маневр і знаходяться відповідні значення критеріїв оптимальності. Розрахунок закінчується по досягненню глобального оптимуму.

Розроблений математичний апарат дозволяє знаходити оптимальні параметри сигналів управління ГЕЕУ на маневрах.

Нижче розглянутий пошук оптимальних параметрів сигналів управління ГЕЕУ електроходів при реверсі. Було відзначено, що вибір показників якості й відповідно вигляд цільової функції процесу, що оптимізується, визначається поставленою метою й умовами виконання маневру. При роботі в обмежених умовах реверс (якість реверсування) безпосередньо впливає на безпеку виконання маневрених операцій. У цьому випадку основним критерієм оптимальності є мінімум гальмівного шляху електрохода – L_{Tmin} . Якщо маневрування здійснюється в «спокійних» умовах, поблизу немає інших суден або інших об'єктів, величина гальмівного шляху електрохода відходить на другий план. У цьому випадку, в якості критерію оптимальності має сенс прийняти мінімум витрат енергії на виконання маневру – W_{min} . І в одному, і в другому випадку мова буде йти про процедуру однокритерійної оптимізації. Інші показники якості маневрування враховуються у вигляді обмежень (разом з уставками систем захистів й обмеженнями, що забезпечують нормальне функціонування пропульсивного комплексу). Це повною мірою відповідає принципам системного підходу [96].

4.3 Оптимальне управління при реверсуванні

4.3.1 Оптимальне управління при реверсуванні. Критерії оптимальності

У електроходів частотно-керований етап реверса гребних електродвигунів починається з моменту часу, коли кутова швидкість обертання ГЕД переходить через нульове значення. Цей етап характеризується інтенсивним гальмуванням електрохода. Варто мати на увазі, що гребні електродвигуни при цьому працюють у дуже важкому режимі, відчуваючи великий момент опору з боку гребних гвинтів, істотно збільшуючи тим самим навантаження на всі складові частини гребної електроенергетичної установки.

Для кожного конкретного електрохода при виконанні маневрених операцій оптимальні сигнали управління будуть різними. У той же час, запропонований математичний апарат дає можливість знайти оптимальні сигнали управління для досить великого класу суден. Для цього необхідно виявити ті безрозмірні параметри комплексу, які найбільш значимо впливають на сигнали управління, знайти діапазони зміни їхніх значень (охопивши при цьому як можна більший клас суден) і, провівши необхідні процедури оптимізації, знайти оптимальні сигнали управління для різних варіантів сполучення цих параметрів. Іншими словами – знайти сигнали управління для цілого класу суден.

Результати аналізу впливу початкових умов виконання маневру й безрозмірних параметрів комплексу на критерії L_{Tmin} та W_{min} , проведеного методами активного планування експериментів в 3 розділі дисертаційного дослідження, дають підстави розглядати в якості параметрів, що впливають значимо, наступні [97] – [100]:

- v_{prim} – початкову швидкість судна;
- N_x – енергоозброєність електрохода;
- C_{M18} , C_{M20} – безрозмірні параметри частотно-керованого ГЕД.

4.3.2 Оптимальні параметри сигналів управління

Нижче, у табл. 4.1, наведені результати пошуку оптимальних сигналів управління гребними електродвигунами, що забезпечують мінімальний гальмівний шлях електрохода – L_{Tmin} . (Мінімальний гальмівний шлях сприяє безпеці виконання маневрених операцій). Серії оптимізаційних розрахунків були проведені для різних сполучень значень суттєвих безрозмірних параметрів (діапазони зміни безрозмірних параметрів представлені в табл. 3.1). Різні сполучення параметрів це, по суті справи, не що інше, як різні електроходи.

У табл. 4.1 наведена невелика частина (для приклада) можливих сполучень суттєвих параметрів. Варіювання по кожному параметру проводилося на трьох (мінімальному, середньому і максимальному) рівнях. Для всіх сполучень по алгоритму, описаному вище, відшукувалися оптимальні параметри сигналів управління. Для оцінки ефективності проведених оптимізаційних розрахунків наведені також значення критерію L_{Tmin} , отримані при управлінні по «класичному» закону, що традиційно рекомендується для гребних електроприводів $\gamma / \alpha = \text{const}$. Це – графа $L_{Tclassic}$. Порівняння отриманих результатів (див. останню графу табл. 4.1) наочно демонструє ефективність використання оптимального управління.

Результати оптимізації зручно представити в графічному вигляді. Як приклад, на рис. 4.3 наведені залежності $\alpha = \alpha(T)$, $\gamma = \gamma(T)$ і $\gamma = \gamma(\alpha)$ для перших трьох варіантів сполучення параметрів (для трьох електроходів). Аналіз результатів розрахунків показує, що перехід до оптимального (по L_{Tmin}) управління гребними електродвигунами дозволяє істотно скоротити гальмівний шлях електрохода. Залежно від конкретного судна (від конкретних сполучень параметрів комплексу) це скорочення перебуває в діапазоні від 15 % до 27 %.

Таблиця 4.1 – Поєднання значимих параметрів і знайдені оптимальні рішення за критерієм L_{Tmin} (при $v_{prim} = 0,3$)

Вар-т	Значення значимих параметрів, в.о.			$L_{Tclassic}$, в.о.	Оптимальне рішення						Ефект. %
	N_X	C_{M18}	C_{M20}		рівняння $\alpha = \alpha(T)$		рівняння $\gamma = \gamma(\alpha)$			L_{Tmin} , в.о.	
					K_1	K_5	K_2	K_3	K_4		
1	0,12	15,7	0,88	0,43	0,57	7,03	0,99	0,26	1,35	0,36	16,3
2	0,165	15,7	0,88	0,403	0,57	7,59	1,17	0,22	1,28	0,33	18,1
3	0,21	15,7	0,88	0,365	0,56	6,75	1,02	0,27	1,32	0,31	15,1
4	0,12	43,9	0,88	0,437	0,57	6,98	1,32	-0,19	1,33	0,35	19,9
5*	0,165	43,9	0,88	0,406	–	–	–	–	–	–	–
6	0,21	43,9	0,88	0,369	0,57	6,22	1,34	-0,19	1,3	0,31	16
7	0,12	72	0,88	0,444	0,6	6,89	1,19	0,2	0,89	0,35	21,2
8	0,165	72	0,88	0,412	0,57	7,14	1,35	0,106	1,3	0,33	19,9
9	0,21	72	0,88	0,373	0,6	6,2	1,2	0,2	0,87	0,3	19,6
10	0,12	15,7	0,925	0,403	0,6	6,28	1,2	0,2	0,99	0,32	20,6
11	0,165	15,7	0,925	0,378	0,6	6,12	1,85	0,24	1,33	0,3	20,6
12	0,21	15,7	0,925	0,345	0,6	6,6	1,17	0,26	1,35	0,28	18,8
13	0,12	43,9	0,925	0,407	0,62	6,14	1,2	0,19	0,74	0,32	21,4
14	0,165	43,9	0,925	0,381	0,619	6,56	1,28	0,2	1,38	0,3	21,3
15	0,21	43,9	0,925	0,348	0,61	6,6	1,18	0,22	1,05	0,28	19,5
16	0,12	72	0,925	0,412	0,63	7,54	1,19	0,21	0,95	0,31	24,8
17	0,165	72	0,925	0,385	0,63	6,49	1,2	0,2	0,93	0,3	22,1
18	0,21	72	0,925	0,351	0,63	6,43	1,2	0,2	0,93	0,28	20,2
19	0,12	15,7	0,97	0,38	0,64	6,46	1,19	0,2	0,86	0,28	26,3
20	0,165	15,7	0,97	0,358	0,63	6,48	0,96	0,26	1,33	0,26	27,4
21	0,21	15,7	0,97	0,328	0,639	6,487	0,968	0,263	1,332	0,261	20,4
22	0,12	43,9	0,97	0,382	0,64	6,57	1,18	0,22	1,05	0,28	26,7
23	0,165	43,9	0,97	0,361	0,65	6,47	1,2	0,2	0,86	0,27	25,2
24	0,21	43,9	0,97	0,33	0,65	6,17	1,19	0,2	0,85	0,26	21,2
25	0,12	72	0,97	0,386	0,65	5,82	1,36	0,2	0,76	0,29	24,9
26	0,165	72	0,97	0,364	0,65	5,81	1,36	0,195	0,74	0,28	23,1
27	0,21	72	0,97	0,332	0,656	5,886	1,365	0,192	0,745	0,258	22,3

* – при даному співвідношенні значимих параметрів знаходження оптимального рішення стає неможливим.

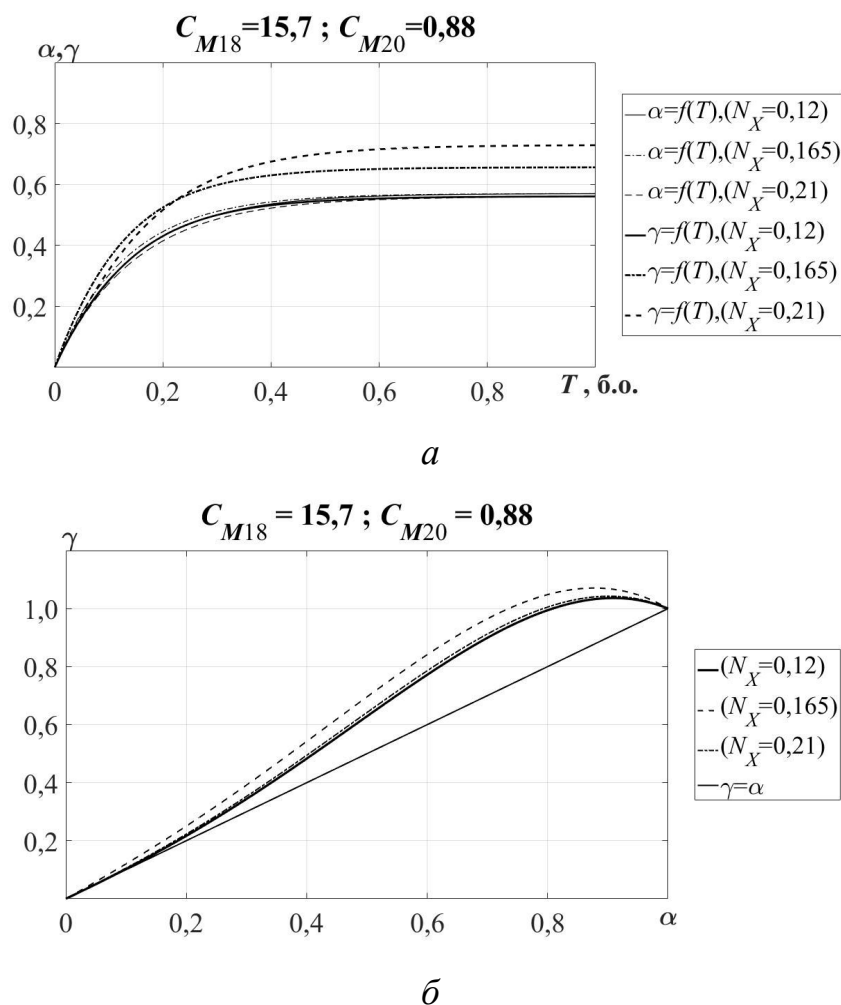


Рисунок 4.3 – Залежності за критерієм мінімуму $L_{T\min}$ при $v_{prim} = 0,3$:

$$a - \alpha = \alpha(T), \gamma = \gamma(T); б - \gamma = \gamma(\alpha)$$

Отримані результати (в аналітичному вигляді – оптимальні параметри сигналів управління $\alpha = \alpha(T)$ і $\gamma = \gamma(\alpha)$, які надані у табл. 4.1, і в графічній їх інтерпретації – рис. 4.2) дозволяють для будь-якого електрохода розглянутого класу призначити сигнали управління гребними електродвигунами, які забезпечують виконання маневру «реверс» з мінімальним гальмівним шляхом.

Якщо безрозмірні параметри електрохода відрізняються від наведених у таблицях, можна скористатися будь-яким методом інтерполяції.

Подібні таблиці складені і для інших значень початкової швидкості руху судна v_{prim} . Для них також знайдені оптимальні рішення. Вони надані у додатку И.

Якщо маневрування здійснюється в необмеженій акваторії, при відсутності поблизу інших суден, як критерій оптимальності має сенс прийняти мінімум витрат енергії на виконання маневру – W_{\min} . Найімовірніше, сигнали управління при цьому будуть іншими. Відшукаємо їх.

Відповідно до проведених досліджень, результати яких наведені в 3 розділі, параметрами, що впливають значимо, й за цим критерієм оптимальності (з рівнем внеску – не менш ніж 10 %) є – v_{prim} , N_X , C_{M18} , C_{M20} . Частина варіантів сполучень цих параметрів і знайдені оптимальні рішення наведені в табл. 4.2. Тут же для оцінки ефективності оптимізації наведені й значення $W_{classic}$, отримані при класичному $\gamma / \alpha = \text{const}$ пропорційному управлінні.

Таблиця 4.2 – Поєднання значимих параметрів і знайдені оптимальні рішення за критерієм W_{\min} ($v_{prim} = 0,3$).

Вар-т	Значення значимих параметрів, в.о.			$W_{classic}$ в.о.	Оптимальне рішення					W_{\min} , в.о.	Ефект. %
	N_X	C_{M18}	C_{M20}		рівняння $\alpha = \alpha(T)$		рівняння $\gamma = \gamma(\alpha)$				
					K_1	K_5	K_2	K_3	K_4		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	0,12	15,7	0,88	4,235	0,601	4,745	1,245	-0,075	0,092	3,583	15,4
2	0,165	15,7	0,88	3,527	0,590	1,052	1,117	0,092	0,721	2,993	15,1
3	0,21	15,7	0,88	2,92	0,576	6,149	1,231	0,014	1,351	2,522	13,6
4	0,12	43,9	0,88	4,41	0,591	1,432	1,363	0,147	1,451	3,549	19,5
5	0,165	43,9	0,88	3,573	0,526	4	1,31	0,378	2,07	2,774	22,4
6	0,21	43,9	0,88	3,063	0,526	4,33	1,31	0,378	2,07	2,36	23
7	0,12	72	0,88	4,59	0,569	4,5	1,397	0,199	1,106	3,492	23,9
8	0,165	72	0,88	3,74	0,575	4,507	1,367	0,193	1,092	2,937	21,5
9	0,21	72	0,88	3,1	0,53	5,1	1,31	0,38	2,07	2,36	23,9
10	0,12	15,7	0,925	4,083	0,615	5,97	1,239	-0,0007	0,738	3,372	17,4
11	0,165	15,7	0,925	3,416	0,662	1,421	1,304	0,154	1,468	2,824	17,3
12	0,21	15,7	0,925	2,836	0,5	5,31	1,216	0,4	2,9	2,29	19,3
й	0,12	43,9	0,925	4,247	0,631	1,433	1,375	0,159	1,448	3,335	21,5
14	0,165	43,9	0,925	3,458	0,53	3,98	1,31	0,328	2,17	2,3	33,5
15	0,21	43,9	0,925	2,97	0,53	4,43	1,31	0,38	2,07	2,3	22,6
16	0,12	72	0,925	4,417	0,635	6,181	1,334	0,131	1,251	3,273	25,9
17	0,165	72	0,925	3,62	0,633	6,74	1,249	0,005	1,323	2,764	23,6
18	0,21	72	0,925	3,00	0,636	6,669	1,36	0,131	1,161	2,354	21,5
19	0,12	15,7	0,97	3,93	0,633	3,976	1,276	0,058	1,529	3,199	18,6

Продовження таблиці 4.2

Вар-г	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
20	0,165	15,7	0,97	3,31	0,642	2,696	1,224	0,011	1,251	2,696	18,5
21	0,21	15,7	0,97	2,843	0,62	4,87	1,22	0,28	1,56	2,27	20,2
22	0,12	43,9	0,97	4,08	0,658	8,523	1,053	-0,006	1,48	3,189	21,8
23	0,165	43,9	0,97	3,35	0,666	5,426	1,285	0,036	0,56	2,677	20,1
24	0,21	43,9	0,97	2,873	0,57	4,45	1,3	0,586	1,03	2,24	22
25	0,12	72	0,97	4,235	0,666	4,546	1,417	-0,028	0,775	3,16	25,4
26	0,165	72	0,97	3,492	0,56	4	1,31	0,33	2,17	2,61	25,3
27	0,21	72	0,97	2,91	0,47	3,16	1,38	0,46	2,48	2,16	25,8

Ці сигнали управління також графічно проілюстровані (рис. 4.4) Ефективність (по витратах енергії) оптимального управління перебуває в діапазоні 14 % – 34 %. У додатку И наведені таблиці для значення $v_{prim} = 0,5$.

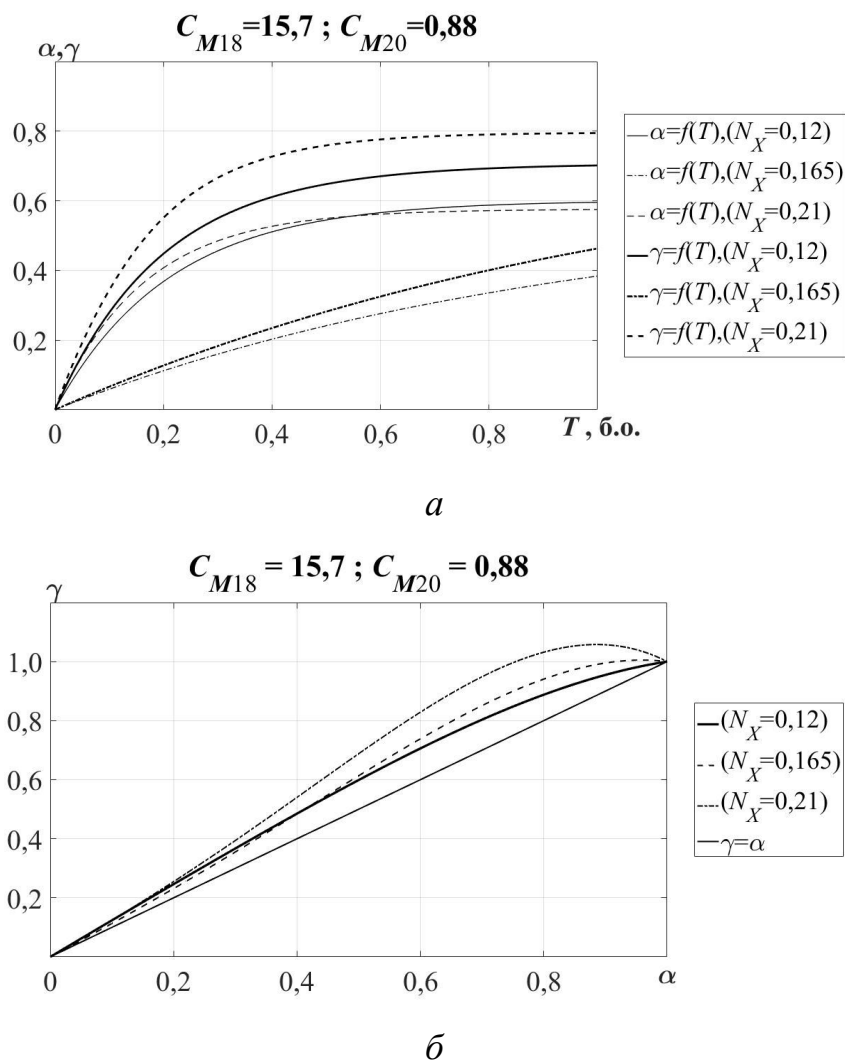


Рисунок 4.4 – Залежності за критерієм мінімуму W_{min} при $v_{prim} = 0,3$:

$$a - \alpha = \alpha(T), \gamma = \gamma(T); \quad б - \gamma = \gamma(\alpha)$$

4.4 Оптимальне управління при криволінійному русі

4.4.1 Управління пропульсивним комплексом при криволінійному русі

Високі маневрені якості сучасних електроходів обумовлені наявністю в них, крім кермової машини, декількох досить потужних, динамічних і стійких до перевантажень гребних електродвигунів. При спільному маневруванні кермом і гвинтами суттєво поліпшується поворотність судна. Але з іншого боку – істотно змінюються навантаження на гребні електроенергетичні установки. Ці зміни обумовлені як самим процесом маневрування (кожний ГЕД працює в різному режимі), так і перерозподілом навантажень між внутрішнім та зовнішнім стосовно центра циркуляції гребними гвинтами.

При правильній організації управління гребними електричними установками можна домогтися найкращих значень показників якості виконання маневру й одночасно з цим забезпечити роботу всіх елементів силової установки в припустимих режимах. Визначення оптимальних параметрів сигналів управління і є метою цього підрозділу.

Пошуки оптимальних параметрів сигналів управління було проведено для характерного маневру електрохода – циркуляції. Розглядався початковий етап циркуляції – відворот, коли кут курсу судна стає рівним 90° від початкового. У якості критеріїв оптимальності обрані: мінімум вибігу електрохода при відвороті – $X1_{Cmin}$ або мінімум витрат енергії на виконання такого маневру – W_{Cmin} . Управління здійснювалося переключенням керма на один з бортів з одночасним підгальмовуванням відповідного гребного електродвигуна. Із двох рівнянь (4.4), (4.5) оптимізація стосується тільки другого ($\gamma = \gamma(\alpha)$). Це обумовлено тим, що відносна частота α_L для лівого ГЕД постійна на протязі всього маневру. Для правого відносна частота α_R теж постійна, але зменшується в началі маневру і визначається новим положенням рукоятки ПУ, формуючи ступінь підгальмовування.

Результати розрахунків, проведених у розділі 3 показали, що на критерії $X_{I_{Cmin}}$ і W_{Cmin} суттєвий вплив оказують наступні параметри:

- різниця між заданими ПУ частотами обертання лівого α_L і правого α_R гребних електродвигунів – ступінь підгальмовування,
- v_{prim} – початкова швидкість судна,
- N_X – енергоозброєність електрохода,
- β_R – кут перекидки пера керма.

У ряді робіт [79, 101] показано, що зниження частоти обертання одного з гребних гвинтів (підгальмовування гребним двигуном) або реверсування його є ефективним засобом зниження радіуса циркуляції електрохода. У той же час, це не може не позначатися на роботі гребної електроенергетичної установки електрохода та складових її частин. Можлива потреба у коректуванні сигналів управління.

У електроходів із частотно-регульованими гребними електродвигунами реалізація режиму підгальмовування викликає певні труднощі. Вони обумовлені тим, що в розглянутому режимі гальмування, загальні точки A_i механічних характеристик ГЕД (криві 1) і гідродинамічної характеристики гребного гвинта (крива 2) на рис. 4.5 не можуть перебувати в другому квадранті координатної системи $\omega_M = \omega(M_M)$.

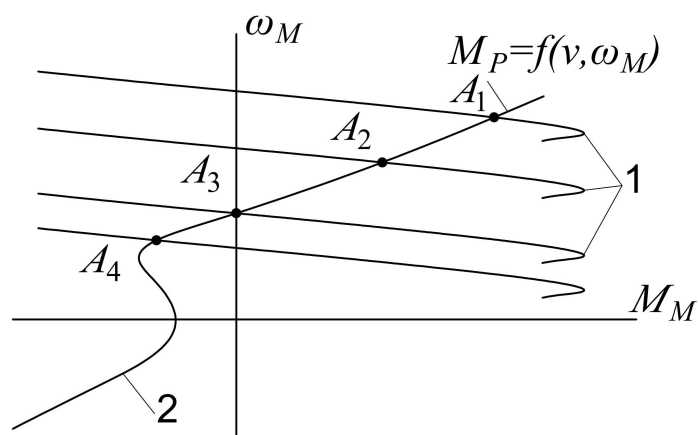


Рисунок 4.5 – Механічні характеристики ГЕД і гідродинамічна характеристика гребного гвинта

Це накладає обмеження на мінімально припустимі значення відносної частоти напруги α , що живить двигун, (а отже й кутової швидкості обертання гребного гвинта) в режимі підгальмовування. Численні розрахунки циркуляційного руху електроходів із різними сполученнями значень істотних параметрів, і з різним ступенем підгальмовування показали, що не треба в розглянутому режимі роботи зменшувати відносну частоту напруги, що живить двигун, менш, ніж $\alpha = 0,55$. (Варто мати на увазі, що в загальному випадку на це значення впливає велика кількість параметрів і в кожному конкретному випадку воно може трохи змінюватися).

4.4.2 Оптимальні сигнали управління при циркуляції

Розглядаючи криволінійний рух судна у відкритій (необмеженій) акваторії, варто зупинитися на двох значеннях початкової швидкості v_{prim} – 0,8 (повний) та 1,0 (самий повний). Величину перекладки пера керма β_R – прийемо трьома значеннями – 15° (0,262 рад), 23° (0,4 рад) та 33° (0,576 рад).

Варіанти можливих сполучень параметрів, виходячи з міркувань наведених вище, представлені в табл. 4.3. Тут же представлені оптимальні рішення й, в останньому стовпці таблиці, ефективність оптимізації.

Таблиця 4.3 – Поєднання значимих параметрів комплексу і оптимальні рішення за критерієм мінімуму витрат енергії W_{Cmin} при виході судна на циркуляцію (етап відвороту)

Вар-т	Значення значимих параметрів, в.о.					$W_{classic}$ в.о.	Оптимальне рішення				Ефект. , %
	v_{prim}	α_L	α_R	N_X	β_R		рівняння $\gamma = \gamma(\alpha)$			W_{Cmin} в.о.	
							K_2	K_3	K_4		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	1,0	1,0	0,8	0,12	0,262	16,67	2,08	-1,15	2,38	15,37	7,8
2	0,8	0,8	0,65	0,12	0,262	15,09	2,97	-2,39	1,71	10,86	28,03
3	0,8	0,8	0,55	0,12	0,262	13,16	3,24	-2,62	1,16	9,352	28,94
4	1,0	1,0	0,8	0,165	0,262	14,27	2,08	-1,16	2,38	13,88	2,73
5	0,8	0,8	0,65	0,165	0,262	12,9	3,24	-2,62	1,19	9,21	28,6
6	0,8	0,8	0,55	0,165	0,262	11,27	3,03	-2,5	1,74	8,0	29,02

Продовження таблиці 4.3

Вар-т	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7	1,0	1,0	0,8	0,21	0,262	14	2,08	-1,16	2,38	12,9	7,86
8	0,8	0,8	0,65	0,21	0,262	12,54	3,2	-2,57	1,26	8,94	28,72
9	0,8	0,8	0,55	0,21	0,262	11	3,24	-2,62	1,16	7,77	29,36
10	1,0	1,0	0,8	0,12	0,4	14,23	3,03	-2,49	1,76	13,12	7,8
11	0,8	0,8	0,65	0,12	0,4	12,96	2,4	0,11	-1,693	9,36	27,78
12	0,8	0,8	0,55	0,12	0,4	11,32	3,2	-2,57	1,26	8,09	28,53
13	1,0	1,0	0,8	0,165	0,4	12,1	2,08	-1,16	2,38	11,7	3,31
14	0,8	0,8	0,65	0,165	0,4	11,0	3,47	-3,089	1,342	7,93	27,91
15	0,8	0,8	0,55	0,165	0,4	9,7	3,27	-2,67	1,21	6,88	29,07
16	1,0	1,0	0,8	0,21	0,4	11,7	2,08	-1,16	2,38	10,8	7,69
17	0,8	0,8	0,65	0,21	0,4	10,6	3	-2,4	1,71	7,6	28,3
18	0,8	0,8	0,55	0,21	0,4	9,32	3,27	-2,67	1,21	6,6	29,18
19	1,0	1,0	0,8	0,12	0,576	12,34	2,08	-1,15	2,36	11,37	7,86
20	0,8	0,8	0,65	0,12	0,576	11,26	3,25	-2,62	1,16	8,2	27,18
21	0,8	0,8	0,55	0,12	0,576	9,88	3,24	-2,67	1,31	7,61	22,98
22	1,0	1,0	0,8	0,165	0,576	10,45	2,08	-1,16	2,38	10	4,31
23	0,8	0,8	0,65	0,165	0,576	9,56	2,56	0,08	-2,27	6,93	27,51
24	0,8	0,8	0,55	0,165	0,576	8,4	3,25	-2,67	1,31	6	28,57
25	1,0	1,0	0,8	0,21	0,576	9,95	2,08	-1,16	2,38	9,2	7,54
26	0,8	0,8	0,65	0,21	0,576	9,09	3,07	-2,19	0,927	6,54	28,05
27	0,8	0,8	0,55	0,21	0,576	8,02	3,2	-2,57	1,26	5,71	28,8

Оптимальні сигнали управління (для перших 3 варіантів таблиці) побудовані на рис. 4.6.

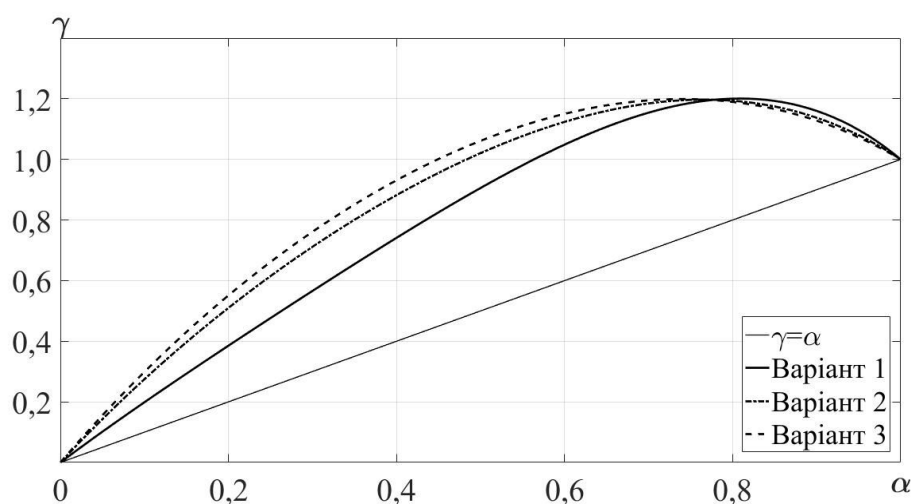


Рисунок 4.6 – Залежність $\gamma = \gamma(\alpha)$ за критерієм мінімуму W_{Cmin} для варіантів №1 – №3 з табл. 4.3

Ефективність оптимізації коливається від 2,7 до 29,4 %. При чому ніжні значення відповідають руху судна з більшою швидкістю, а вищі – з меншою швидкістю й максимальним підгальмовуванням.

4.5 Оптимальне управління при екстреному маневруванні

4.5.1 Постановка задачі

Під екстреним маневруванням будемо мати на увазі маневри, які виконує електрохід у ситуаціях близьких до критичних. Зокрема, це ситуації, коли потрібно «аварійно» скоротити до мінімуму вибіг судна X_1 . Скороченню величини X_1 безсумнівно сприяє правильний вибір режимів роботи гребної електроенергетичної установки. У подібних випадках доцільно переглянути штатні захисти й блокування для того, щоб короткочасно «загрубити» їх до максимально припустимих значень і спробувати повною мірою використати можливості електроенергетичної установки для досягнення поставленої мети.

Найважливішою задачею, яка виникає при аналізі подібних ситуацій, є визначення оптимальних параметрів сигналів управління електроенергетичною установкою, які забезпечують мінімум критерію оптимальності X_1 . Треба відзначити, що оптимальні параметри сигналів управління, отримані в п. 4.3-4.4, не підходять для маневрів, що розглядаються, оскільки були отримані за результатами відшукування оптимумів цільової функції вигляду (4.6) з іншими – штатними – обмеженнями. У той же час, окремі результати досліджень, які були проведені в попередніх пунктах, можуть бути використані при розрахунках режимів екстреного маневрування.

Маючи на меті пошук оптимальних параметрів сигналів управління електроенергетичною установкою за критерієм мінімуму вибігу судна X_1 , має сенс розглядати такі маневри, на яких оптимізація управління електроенергетичною установкою реально сприяє скороченню X_1 . До них можна віднести – реверс гребного електродвигуна на прямолінійній траєкторії.

Враховуючи переважувальні здатності окремих елементів електроенергетичних установок, припустимо наступні короточасні обмеження на режимні показники:

- перевищення потужності первинних двигунів – 20 %;
- кратність струму головних генераторів – 3,0;
- відносне відхилення напруги на виході генераторів при підвищенні навантаження – 25 %;
- відносне відхилення напруги на виході генераторів при зниженні навантаження – 10 %;
- кратність струму гребних електродвигунів – 3,0;
- кратність обертаючого моменту ГЕД – 2,4.

Для оцінки доцільності проведення оптимізаційних розрахунків при «загрублених» захистах, проведена невелика серія експериментів по пошуку оптимальних рішень для двох варіантів уставок захистів та блокувань – штатного та «аварійного». Розглядався маневр – реверс гребного двигуна до повної зупинки електрохода. Результати розрахунків наведені в табл.4.4.

Таблиця 4.4 – Результати оптимізації при «штатних» і «загрублених» захистах

Вар-г	Значення значимих параметрів, в.о.			$L_{Tclassics}$ в.о.	Оптимальні рішення					Ефект. %	
	N_X	C_{M18}	C_{M20}		рівняння $\alpha = \alpha(T)$		рівняння $\gamma = \gamma(\alpha)$				L_{Tmin} , в.о.
					K_1	K_5	K_2	K_3	K_4		
штат.	0,165	15,7	0,88	0,403	0,57	7,59	1,17	0,22	1,28	0,33	18,1
загруб.					0,646	9,8	1,41	-0,39	1,3	0,296	26,6

Порівняння результатів розрахунків показує, що переключення уставок систем захисту від штатного режиму на аварійний суттєво впливає на оптимальні параметри сигналів управління. Досить значно скорочується вибіг судна – з 0,33 до 0,3 його довжини при $v_{prim} = 0,3$. Таким чином, доцільність оптимізації управління з варіантом «загрублених» захистів **очевидна**.

4.5.2 Оптимальне управління при екстремому реверсі ГЕД

Для розрахунку оптимальних параметрів сигналів управління при екстремому маневруванні розроблена таблиця можливих варіантів сполучень безрозмірних параметрів комплексу, аналогічна таблицям, наведеним в п. 4.3 – 4.4. Її частина наведена в табл. 4.5 разом з результатами розрахунків оптимальних параметрів сигналів управління.

Таблиця 4.5 – Поєднання значимих параметрів і знайдені оптимальні рішення за критерієм L_{Tmin} при «загублених» уставках (при $v_{prim} = 0,3$).

Вар-т	Значення значимих параметрів, в.о.			$L_{Tclassic}$, в.о.	Оптимальне рішення						Ефект. %
	N_X	C_{M18}	C_{M20}		рівняння $\alpha = \alpha(T)$		рівняння $\gamma = \gamma(\alpha)$			L_{Tmin} , в.о.	
					K_1	K_5	K_2	K_3	K_4		
1	0,12	15,7	0,88	0,43	0,656	11,2	1,362	-0,38	1,26	0,3	30,2
2	0,165	15,7	0,88	0,403	0,646	9,8	1,41	-0,39	1,3	0,296	26,6
3	0,21	15,7	0,88	0,365	0,627	12,42	1,11	0,714	1,39	0,265	27,4
4	0,12	43,9	0,88	0,437	0,738	14,82	1,17	0,266	1,284	0,29	33,6
5	0,165	43,9	0,88	0,406	0,738	10,95	1,446	0,062	0,775	0,278	31,5
6	0,21	43,9	0,88	0,369	0,74	14,78	1,174	0,263	1,284	0,254	31,2
7	0,12	72	0,88	0,444	0,677	11,5	1,1	0,59	1,377	0,304	31,5
8	0,165	72	0,88	0,412	0,656	8,511	1,41	0,384	0,745	0,297	27,9
9	0,21	72	0,88	0,373	0,69	10,1	1,115	0,563	1,34	0,269	27,9
10	0,12	15,7	0,925	0,403	0,894	17,58	0,67	0,209	1,287	0,26	35,5
11	0,165	15,7	0,925	0,378	0,895	16,32	0,688	0,207	1,289	0,248	34,4
12	0,21	15,7	0,925	0,345	0,893	17,34	0,675	0,207	1,288	0,231	33
13	0,12	43,9	0,925	0,407	0,744	10,85	1,281	0,384	0,746	0,265	34,9
14	0,165	43,9	0,925	0,381	0,761	8,942	1,239	0,29	1,294	0,257	32,5
15	0,21	43,9	0,925	0,348	0,762	13,42	1,252	0,264	1,284	0,231	33,6
16	0,12	72	0,925	0,412	0,695	12,34	1,037	0,65	1,379	0,276	33
17	0,165	72	0,925	0,385	0,68	8,66	1,38	0,386	0,745	0,271	29,6
18	0,21	72	0,925	0,351	0,7	13,13	0,993	0,707	1,422	0,243	30,8
19	0,12	15,7	0,97	0,38	0,73	10	1,37	-0,38	1,269	0,247	35
20	0,165	15,7	0,97	0,358	0,725	9,039	1,407	-0,402	1,325	0,243	32,1
21	0,21	15,7	0,97	0,328	0,731	8,991	1,395	-0,386	1,282	0,226	31,1
22	0,12	43,9	0,97	0,382	0,774	8,825	1,364	0,372	0,672	0,246	35,6
23	0,165	43,9	0,97	0,361	0,785	8,19	1,382	0,373	0,67	0,239	33,8
24	0,21	43,9	0,97	0,33	0,797	8,411	1,41	0,373	0,674	0,221	33
25	0,12	72	0,97	0,386	-	-	-	-	-	-	-
26	0,165	72	0,97	0,364	0,72	10,9	1,01	0,64	1,4	0,246	32,4
27	0,21	72	0,97	0,332	0,704	8,267	1,4	0,372	0,67	0,234	29,5

Ефективність оптимізації при цьому перебуває в діапазоні від 27 % до 36 % (проти 15 % – 27 % при штатних уставках).

Представимо графічно 3 перших варіанта оптимальних рішень (для трьох конкретних електроходів $v_{prim} = 0,3$) з табл. 4.3 на рис. 4.6.

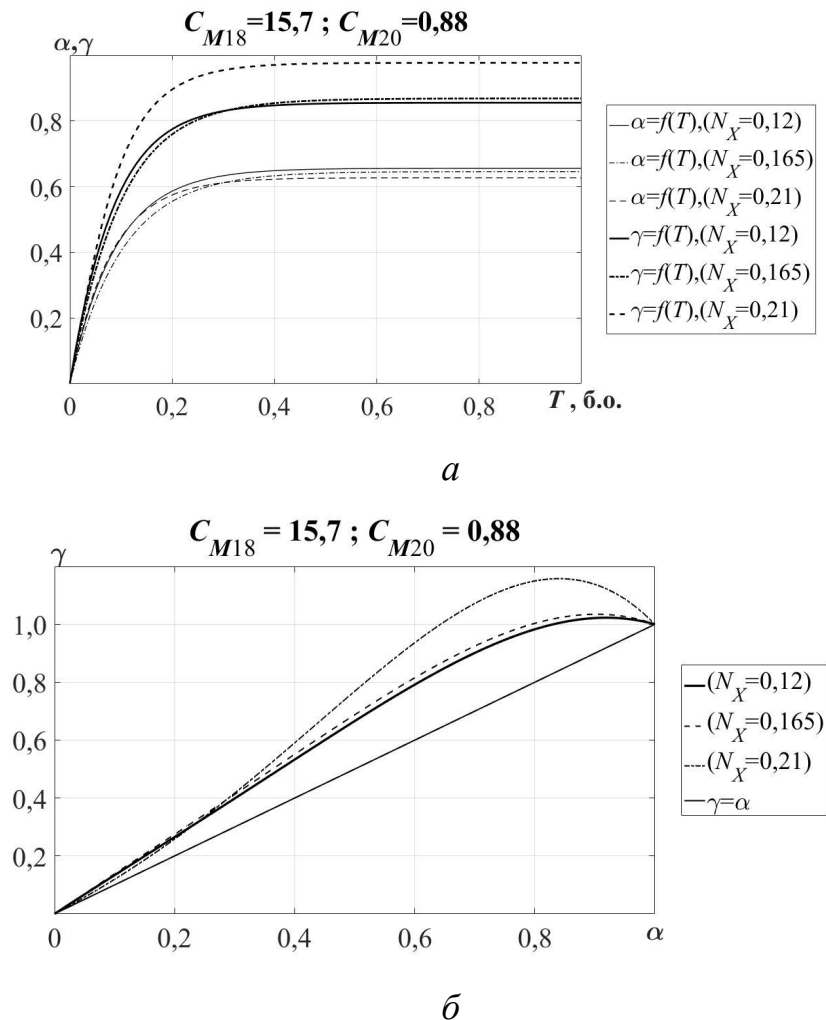


Рисунок 4.6 – Залежності за критерієм мінімуму L_{Tmin} при «загрублених» уставках: $a - \alpha = \alpha(T), \gamma = \gamma(T), б - \gamma = \gamma(\alpha)$

Для першого варіанта таблиці 4.3 гальмівний шлях – L_{Tmin} – скоротиться з 0,36 (при штатних уставках) до 0,3 відносних одиниць, що при довжині електрохода в 150 м становить – 9 метрів. В залежності від конкретної ситуації така відстань може грати суттєву, якщо не вирішальну, роль у недопущенні зіткнення. Це **підтверджує доцільність** використання такого прийому гальмування й доцільність оптимізації параметрів сигналів управління.

Саме таке управління відносною частотою α й відносною напругою γ рекомендується закладати в систему частотного керування гребними електродвигунами, якщо необхідно забезпечити мінімальний гальмівний шлях електрохода при реверсі.

Якщо ж застосовувати традиційний пропорційний сигнал управління, то гальмівний шлях складе 0,43 довжини судна, або в абсолютних одиницях – 64,5 м. Таким чином, в порівнянні з класичним «пропорційним» управлінням, ефективність застосування розрахованого оптимального управління при «загрублених» уставках, становить 30,2 %.

4.6 Практичне використання отриманих рекомендацій

Отримані результати можуть бути корисними на самих початкових стадіях проектування гребних електроенергетичних установок. З'являється можливість вже на цих етапах оцінювати маневрені характеристики майбутніх електроходів. Але більш корисні вони для суден, які знаходяться в експлуатації. Для конкретного електрохода, відповідно до поставленої мети може бути обраний і закладений у систему регулювання найкраще управління ГЕЕУ.

Як приклад розглянемо проект електрохода. Основні його характеристики, необхідні для розрахунку безрозмірних параметрів, що впливають значимо – N_X , C_{M18} , C_{M20} – наведені в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Основні характеристики електрохода

Довжина судна по ватерлінії, L	160 м
Швидкість судна в сталому режимі, v_0	22 вузла
Маса судна, m	33540 т
Сумарний упор гвинтів, $\sum K_{pj} P_{ej0}$	6250 т м/с ²
Приєднані до судна маси води по поздовжній осі, λ_{11}	0,11 т
Кутова швидкість обертання ГЕД, ω_M	120 об/хв
Кутова частота обертання магнітного поля статора ГЕД, ω_{1Mn}	124 об/хв
Постійний конструктивний коефіцієнт, c_M	0,423 Ом
Наведений активний опір ротора ГЕД, r'_{2M}	0,0639 Ом

Чисельні значення значимих параметрів, розраховані по наведеним вище співвідношенням, наведені в табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Значення безрозмірних параметрів електрохода

Параметр	Чисельне значення
N_X	0,21
C_{M18}	43,9
C_{M20}	0,97

Для цього сполучення параметрів – для цього електрохода – оптимальними сигналами управління гребними електродвигунами, що забезпечують мінімальний гальмівний шлях при реверсі при штатних уставках блокувань і захистів – L_{Tmin} , буде варіант 24 з табл. 4.1. А саме:

$$\alpha = 0,1 + 0,65(1 - \exp(-6,17T)); \quad (4.9)$$

$$\gamma = 1,19\alpha + 0,2\alpha^2 + 0,85\alpha^3 - 1,24\alpha^4 \quad (4.10)$$

Отримані результати можуть бути проілюстровані графічно. На рис. 4.7 наведені криві зміни в часі відносної частоти $\alpha = \alpha(T)$, і відносної напруги $\gamma = \gamma(T)$ (рис. 4.7, а), а також оптимальна залежність $\gamma = \gamma(\alpha)$ при реверсуванні ГЕД електрохода, що рухається на малому ході (з початковою швидкістю $v_{prim} = 0,3$) і пропорційна залежність $\gamma_0 = \gamma_0(\alpha)$ для порівняння з оптимальною (рис. 4.7, б).

Якщо реверсування здійснюється в необмежених умовах і доцільно забезпечити мінімум витрат енергії, то оптимальним управлінням даного електрохода буде той же варіант № 24, але вже з табл. 4.2. Сигнали управління в цьому випадку:

$$\alpha = 0,1 + 0,57(1 - \exp(-4,45T)), \quad (4.11)$$

$$\gamma = 1,3\alpha + 0,586\alpha^2 + 1,03\alpha^3 - 1,916\alpha^4. \quad (4.12)$$

При управлінні за цими сигналами витрати енергії скорочуються в порівнянні з класичним варіантом з 2,873 до 2,24 відносних одиниць.

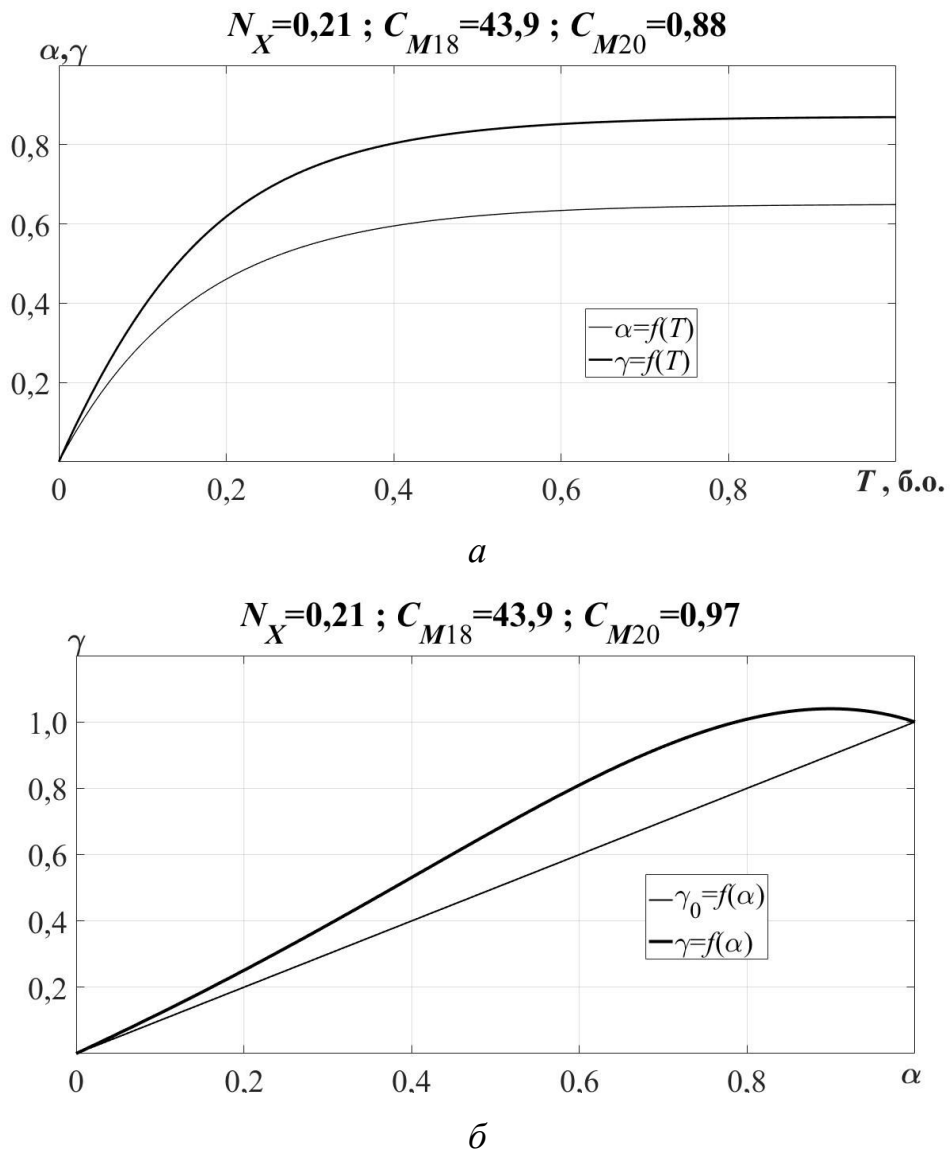


Рисунок 4.7 – Залежності за критерієм мінімуму L_{Tmin} для «проекту» електрохода (при $v_{prim} = 0,3$): $a - \alpha = \alpha(T)$, $\gamma = \gamma(T)$, $b - \gamma = \gamma(\alpha)$

При необхідності сигнали можуть бути уточнені. Для цього необхідно підставити в математичну модель чисельні значення безрозмірних параметрів комплексу й розрахувати за допомогою розробленого методу оптимальні параметри сигналів управління (тепер вже уточнені) при відповідному критерії оптимальності. Це вже доцільно робити для конкретних електроходів у конкретних умовах роботи або на більш пізніх етапах проектування, при наявності більш повної інформації про судно, що проектується.

4.7 Вплив зміни навантаження суднової мережі на оптимальне управління ГЕД електроходів з ЄЕЕС

При маневруванні електроходів можливе раптове скидання чи накидання навантаження загальносуднових споживачів електроенергії. Це може впливати на знайдені оптимальні рішення. З іншого боку, перехід до оптимального управління в певній мірі збільшує навантаження на гребну установку й відповідно на генераторні агрегати, що може привести до таких відхилень показників якості електроенергії, які перевищатимуть вимоги міжнародних стандартів. Через те розглянуто вплив зміни навантаження суднової мережі на оптимальне управління гребними електроенергетичними установками, та вплив оптимального управління на показники якості суднової мережі [54] під час маневрів.

Для початку треба оцінити долю потужності системи електрорухоу (означимо – ГЕД) від загальної потужності джерел електроенергії (означимо – СГ) в сучасних електроходах [102]. Таке співвідношення для декількох електроходів надане у табл. 4.8. З неї – доля потужності пропульсивних електродвигунів у розглянутих електроходах коливається в межах 50 % – 83 % від сумарної потужності джерел електроенергії. Це співвідношення справедливе й для струмів.

Таблиця 4.8 – Співвідношення сумарних потужностей ГЕД і джерел електроенергії на сучасних електроходах з ЄЕЕС

Тип та назва електрохода	Сумарна потужність ГЕД, МВт	Сумарна потужність СГ, МВт
Криголам «Арктика», проект 22220	60	72
Криголам «Таймир»	36	45
Криголам «Otso»	15	30
Рятувальний «Берінгов пролив»	7	11,5
Сейсмічний «Sanco star»	5	6,6
Малий гідрографічний «Вайгач»	1,1	2

Розглядаючи взаємний вплив системи електроруху та суднових споживачів, які живляться від загальних шин ГРЩ, має сенс представити паралельно працюючі генераторні агрегати одним «еквівалентним» генераторним агрегатом, вважаючи розподіл навантаження між ними симетричним; а сумарний струм, що споживається – струмом «еквівалентного» генератора (рис. 4.8).

У такому випадку, сумарний струм такого «еквівалентного» генератора складатиме

$$I_{Geq} = K_{IM}(I_{M1} + I_{M2}) + K_{Isc}\sum I_{SC} = K_{IM}\sum I_M + K_{Isc}\sum I_{SC} \quad (4.13)$$

де K_{IM} – коефіцієнт, який встановлює долю струму системи електроруху у загальному струмі, що споживається;

I_{M1} – струм ГЕД правого контуру;

I_{M2} – струм ГЕД лівого контуру;

K_{Isc} – коефіцієнт, який встановлює долю сумарного струму суднових споживачів у загальному струмі, що споживається;

$\sum I_{SC}$ – сумарний струм суднових споживачів.

Внівши корегування (4.13) в математичну модель (2.3) – (2.85), можна аналізувати вплив зміни навантаження на оптимальне управління і вплив переходу до оптимального управління на показники якості електроенергії суднової мережі.

Розглядався реверс електрохода (зі значеннями значимих параметрів $N_X = 0,165$; $C_{M18} = 43,9$; $C_{M20} = 0,925$) на прямолінійній траєкторії до повної зупинки ($v = 0$), коли обидва гребних електродвигуна працюють в однаковому режимі. В момент переходу у частотно-керований етап реверса стрибкоподібно змінювалося сумарне навантаження суднових споживачів: скидалося – табл. 4.9, рис. 4.9, і накидалося – табл. 4.10, рис. 4.10.

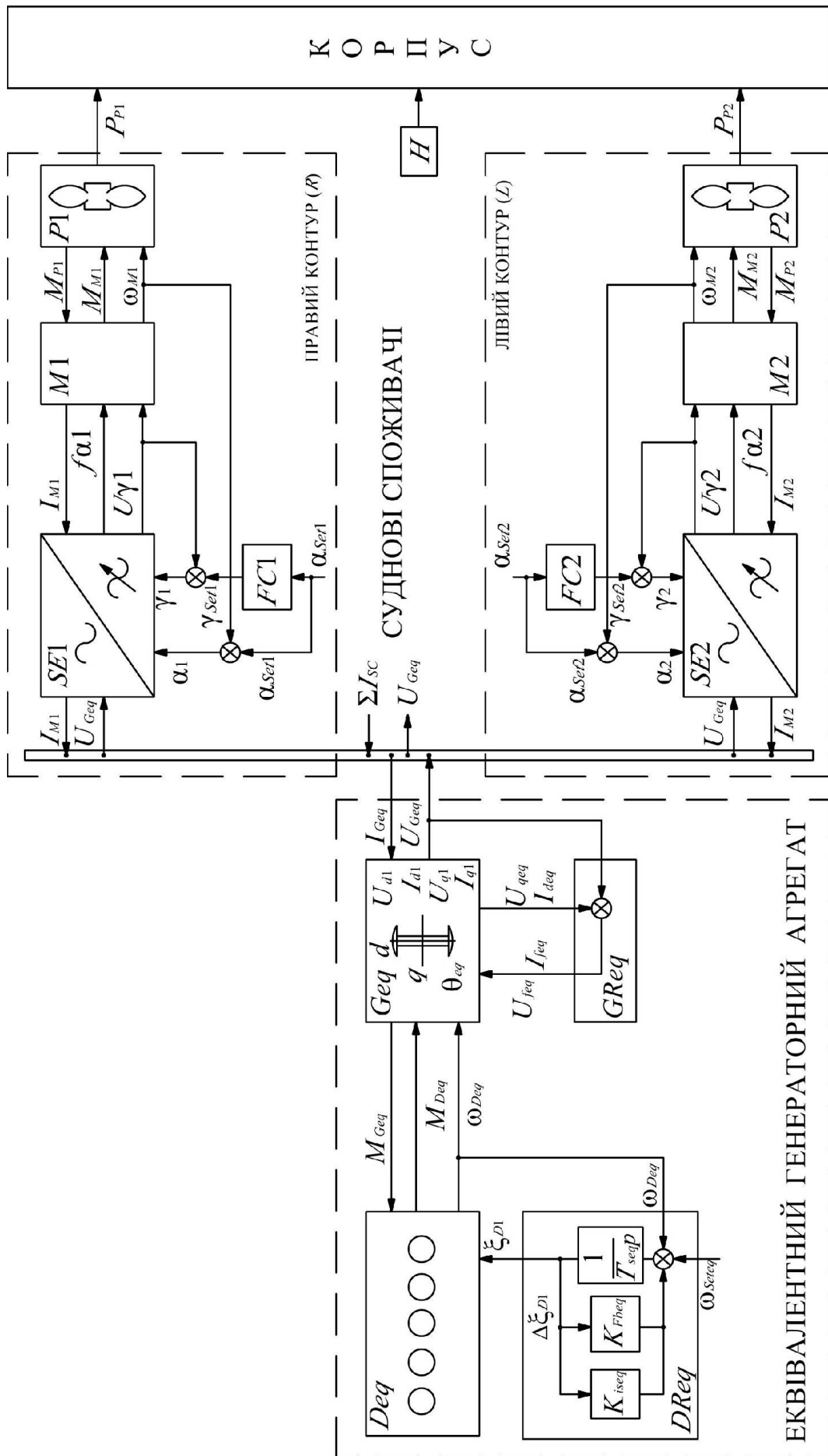


Рисунок 4.8 – Структурна схема пропульсивного комплексу електрохода з єдиною електроенергетичною системою при роботі ГЕУ й суднової мережі від «еквівалентного» ГА

Таблиця 4.9 – Оптимальні рішення за критерієм мінімуму L_{Tmin} ($v_{prim} = 0,5$) при скиданні навантаження суднової мережі під час реверса

Вар-т співвідн. потужн.	Доля струмів у в.о. від I_{Geq}		Оптимальне рішення					L_{Tmin} , в.о.	Ступінь погіршення, %
	$\sum I_M$	$\sum I_{SC}$	рівняння $\alpha = \alpha(T)$		рівняння $\gamma = \gamma(\alpha)$				
			K_1	K_5	K_2	K_3	K_4		
1	0,5	0,5	0,637	6,94	1,28	0,026	1,03	0,832	0,6
	0,5	0,25*	0,637	6,94	1,3	-0,126	1,03	0,837	
2	0,6	0,4	0,665	5,2	1,334	0,215	0,76	0,849	0,3
	0,6	0,2*	0,663	5,13	1,337	0,213	0,755	0,852	

* – частина навантаження суднових споживачів скинута під час реверса.

На рис. 4.9 наведені залежності $\alpha = \alpha(T)$, $\gamma = \gamma(T) - a$, і $\gamma = \gamma(\alpha) - b$ для першого варіанта співвідношення потужностей з табл. 4.9.

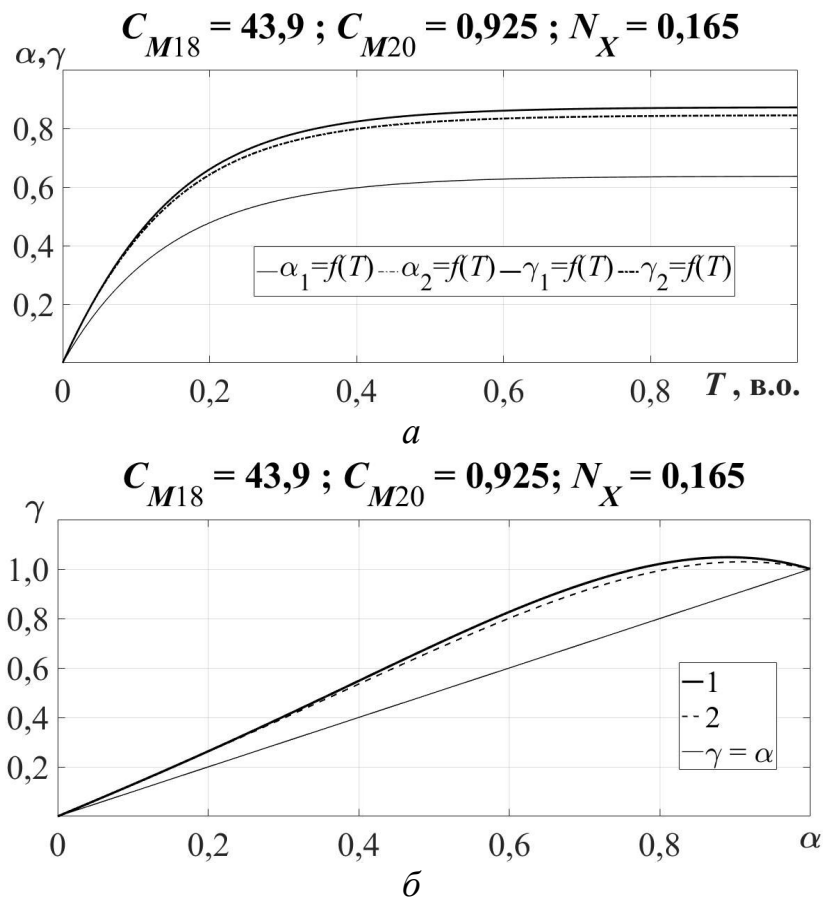


Рисунок 4.9 – Залежності за критерієм мінімуму L_{Tmin} при скиданні навантаження суднової електромережі: $a - \alpha = \alpha(T)$, $\gamma = \gamma(T)$, $b - \gamma = \gamma(\alpha)$. Криві: $\alpha_1, \gamma_1, 1$ – навантаження незмінне, $\alpha_2, \gamma_2, 2$ – навантаження скидається

Таблиця 4.10 – Оптимальні рішення за критерієм мінімуму L_{Tmin} ($v_{prim} = 0,5$) при накиданні навантаження суднової мережі під час реверса

Вар-т співвідн. потужн.	Доля струмів у в.о. від I_{Geq}		Оптимальне рішення					L_{Tmin} , в.о.	Ступінь погір- шення, %
	$\sum I_M$	$\sum I_{SC}$	рівняння $\alpha = \alpha(T)$		рівняння $\gamma = \gamma(\alpha)$				
			K_1	K_5	K_2	K_3	K_4		
1	0,5	0,25	0,634	4,18	1,37	0,18	0,654	0,425	26,8
	0,5	0,5*	0,64	4,57	1,36	-0,04	1,52	0,539	
2	0,6	0,2	0,66	5,07	1,436	0,087	0,742	0,513	10
	0,6	0,4*	0,65	4,53	1,35	0,2	0,687	0,566	

* – частина навантаження суднових споживачів накинута під час реверса.

На рис. 4.10 наведені залежності $\alpha = \alpha(T)$, $\gamma = \gamma(T)$ – а, і $\gamma = \gamma(\alpha)$ – б для першого варіанта співвідношення потужностей з табл. 4.10.

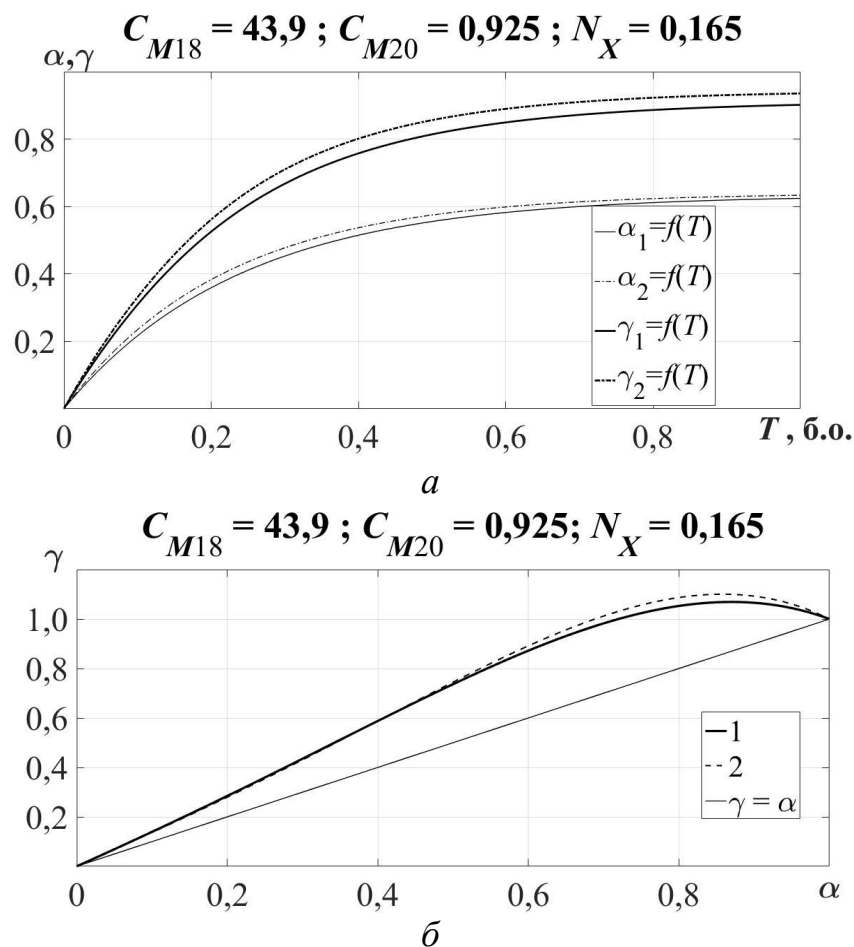


Рисунок 4.10 – Залежності за критерієм мінімуму L_{Tmin} при накиданні навантаження суднової електромережі: а – $\alpha = \alpha(T)$, $\gamma = \gamma(T)$, б – $\gamma = \gamma(\alpha)$.
Криві: α_1 , γ_1 , 1 – навантаження незмінне, α_2 , γ_2 , 2 – навантаження накидається

Отже, скидання навантаження (табл. 4.9) не впливає на оптимальне управління. При накиданні навантаження в залежності від співвідношення сумарних потужностей (струмів) гребних електродвигунів та загальносуднових споживачів (табл. 4.10) ступінь погіршення цільової функції (для даного електрохода) приймає значення в діапазоні з 10 % до 26,8 %. Тобто, для даного електрохода, з $\sum I_M = 0,5 I_{Geq}$ при реверсі з оптимальними сигналами управління з початковою швидкістю $v_{prim} = 0,5$ і раптовому накиданні навантаження, яке складає 25% від сумарної потужності джерел електроенергії, гальмівний шлях (при довжині судна, наприклад, 130 м) – L_{Tmin} збільшиться з 55 м до 70 м.

У якості додаткового прикладу візьмемо електрохід з іншими значимими параметрами – $N_X = 0,165$; $C_{M18} = 72$; $C_{M20} = 0,97$ та проведемо розрахунки аналогічні тим, що представлені у табл. 4.9 – табл. 4.10. Ступінь погіршення цільової функції для даного електрохода (табл. 4.11) при різних співвідношеннях сумарних потужностей ГЕД та загальносуднових споживачів коливається: для скидання навантаження – до 2,7 %, накидання навантаження – до 7,2 %.

Таблиця 4.11 – Оптимальні рішення за критерієм мінімуму L_{Tmin} (при $v_{prim} = 0,5$) при зміні навантаження суднової мережі під час реверса

Характер зміни навант. суднових споживачів в	Доля струмів у в.о. від I_{Geq}		Оптимальне рішення						Ступінь погіршення, %
	$\sum I_M$	$\sum I_{SC}$	рівняння $\alpha = \alpha(T)$		рівняння $\gamma = \gamma(\alpha)$			L_{Tmin} , в.о.	
			K_1	K_5	K_2	K_3	K_4		
скидання	0,5	0,5	0,67	5,18	1,36	0,208	0,76	0,776	-0,4
	0,5	0,2	0,67	5,36	1,36	0,21	0,74	0,773	
накидання	0,5	0,2	0,64	4,2	1,45	0,18	0,652	0,64	7,2
	0,5	0,5	0,64	4,24	1,45	0,18	0,66	0,686	
скидання	0,6	0,4	0,67	6,44	1,1	0,58	0,92	0,775	2,7
	0,6	0,2	0,64	6,57	1,43	-0,117	0,94	0,796	
накидання	0,6	0,2	0,64	4,18	1,45	0,18	0,66	0,74	3,28
	0,6	0,4	0,65	4,56	1,42	0,19	0,69	0,764	

Для аналізу впливу оптимального управління на показники якості суднової мережі виконані розрахунки маневрів та оцінено показники якості електроенергії при пропорційному $\gamma / \alpha = \text{const}$ і знайденому оптимальному управлінні. Результати порівняні з вимогами ДСТУ, щодо показників, які характеризують якість електроенергії суднової мережі на перехідних режимах (табл. 4.12).

Таблиця 4.12 – Вплив пропорційного й оптимального управління на якість електроенергії суднової мережі

Параметр	Вимоги ДСТУ	Управління	
		пропорційне	оптимальне
Відносне відхилення частоти на виході генераторів при підвищенні навантаження δf_{dyn}^- , %	≤ -7	-4,9	-6,2
Відносне відхилення частоти на виході генераторів при зниженні навантаження δf_{dyn}^+ , %	≤ 10	1,8	1,93
Час відновлення частоти на виході генераторів при підвищенні потужності t_{fin} , с	≤ 3	0,55	1,08
Час відновлення частоти на виході генераторів при зниженні потужності t_{fde} , с	≤ 3	2,03	2,41
Відносне відхилення напруги на виході генераторів при підвищенні навантаження δU_{dyn}^- , %	≤ -15	-1,34	-2,8
Відносне відхилення напруги на виході генераторів при зниженні навантаження δU_{dyn}^+ , %	≤ 20	1,12	2,07
Час відновлення напруги на виході генераторів при підвищенні потужності t_{uin} , с	≤ 4	1,1	1,16
Час відновлення напруги на виході генераторів при зниженні потужності t_{ude} , с	≤ 4	2	2,7

Аналіз результатів дозволяє зробити наступний висновок: з переходом від традиційного пропорційного до оптимального управління показники якості електроенергії суднової мережі погіршуються. Цього слід було очікувати. Адже для підвищення маневреності електроходів гребні електродвигуни (при оптимальному управлінні) переводяться у більш напружений режим роботи. Але, ці показники знаходяться у допустимих межах. Тому перехід до запропонованого оптимального управління слід вважати доцільним.

4.8 Короткі висновки

1. Встановлено, що традиційні принципи побудови сигналів управління частотно-керованими асинхронними електродвигунами електроходів не дозволяють одержати максимальної віддачі від гребної електроенергетичної установки. Запропоновано новий спосіб формування сигналів управління, в основі якого закладений системний принцип.

2. Виявлено характер цільових функцій. Розроблений метод оптимізації.

3. Проведені оптимізаційні розрахунки та знайдені оптимальні параметри сигналів управління ГЕЕУ на маневрах. Оптимізація проведена за критеріями мінімуму гальмівного шляху й мінімуму витрат енергії на виконання маневру.

4. Проілюстровано ефективність використання запропонованого управління.

5. Скидання навантаження не впливає на оптимальне управління. При накиданні навантаження ступінь погіршення цільової функції залежить від співвідношення сумарних потужностей струмів системи електроруху та загальносуднових споживачів і коливається в діапазоні від 3 % до 27 %. Причому, більші значення відповідають варіантам, де сумарний струм суднових споживачів в процентному співвідношенні вище.

6. Оптимальне управління в порівнянні з класичним «пропорційним» управлінням дещо погіршує показники якості суднової мережі при маневруванні, але вони не виходять за межі, які встановлені міжнародними стандартами.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота розв'язує актуальну для транспортної галузі науково-практичну задачу – оптимізацію управління гребними електроенергетичними установками електроходів на маневрах. Створені умови для використання системного підходу до пошуку оптимального управління ГЕЕУ. Математична модель перехідних режимів і запропоновані методи аналізу дозволяють, як показали результати математичного моделювання, отримати оптимальні параметри сигналів управління ГЕЕУ, які забезпечують високі маневрені характеристики електроходів. Отримані результати охоплюють широкий клас суден з електрорухом. Практичні рекомендації призначені для використання в процесі експлуатації електроходів.

Найбільш істотними, науково обґрунтованими та експериментально підтвердженими результатами є наступні:

1. Обґрунтована доцільність використання системного підходу до пошуку оптимального управління ГЕЕУ електроходів з єдиною електроенергетичною системою на маневрах. В якості основних критеріїв оптимальності прийняті показники, які характеризують маневрені властивості суден. Одночасно контролюються динамічні показники гребної електроенергетичної установки та показники якості електроенергії суднової електричної мережі.

Уточнена математична модель перехідних режимів роботи гребних електроенергетичних установок у складі суднових пропульсивних комплексів на маневрах. Вона дозволяє враховувати динамічні режими роботи генераторних агрегатів, що суттєво підвищує точність результатів розрахунків. Модель універсальна. Вона охоплює великий клас ГЕЕУ електроходів з традиційним типом приводу гребних гвинтів. Математичний опис перехідних режимів роботи конкретних електроходів впливає як окремий випадок із розробленої моделі.

Розроблені алгоритми й пакет прикладних програм щодо розрахунку поточних значень основних режимних показників всіх складових частин

суднового пропульсивного комплексу та до кількісної оцінки показників якості виконання маневрів. Запропонований математичний опис дає можливість враховувати вплив перехідних режимів в гребних електроенергетичних установках на параметри електроенергії суднової мережі й уточнювати управління ГЕЕУ при змінах навантаження електричної мережі. Результати досліджень, які отримані за допомогою розробленого математичного апарату, виводи й рекомендації охоплюють всі електроходи з частотно-керованими гребними електродвигунами.

2. Сформовані критерії динамічної подібності й узагальнені безрозмірні параметри пропульсивних комплексів. Саме вони впливають на характер протікання перехідних процесів в комплексах та визначають показники якості маневрування електроходів. Електроходи з рівними значеннями безрозмірних параметрів мають рівні показники якості виконання маневрів.

Виявлені значущі параметри. Це ті параметри, які суттєво впливають на маневрені характеристики електроходів і на показники якості роботи гребних електроенергетичних установок при маневруванні. Аналітичні залежності, які отримані в роботі, цих показників від суттєвих параметрів комплексів показують характер та ступінь цього впливу. Вони висвітлюють можливі шляхи поліпшення якості маневрування електроходів з одночасним підтриманням вимог міжнародних стандартів до електроенергії суднової мережі.

3. Обґрунтовані недоліки «класичного» варіанту управління гребними електроенергетичними установками щодо показників якості маневрування електроходів. Запропоновано новий вид формування сигналів управління ГЕЕУ. Сформульована цільова функція й розроблена процедура оптимізації управління. В якості критеріїв оптимальності запропоновано використовувати показники якості маневрування судна, як старшої системи. Виявлені узагальнені безрозмірні параметри пропульсивних комплексів, які істотно впливають на оптимальне управління. Знайдені можливі діапазони зміни їх значень.

4. Отримав подальший розвиток метод пошуку оптимальних параметрів сигналів управління. Досліджена поведінка цільових функцій у процесі розв'язування оптимізаційних задач. Виявлено, що вони є мультимодальними й мають складну топографію. Вдосконалений метод пошуку глобального оптимуму й метод Нелдера-Міда, що використовується при пошуку локальних оптимумів. Відсутність у методі Нелдера-Міда прискорення в процедурі оптимізації й труднощі при проведенні пошуку на викривлених «ярах» і «хребтах» долаються за рахунок зміни форми багатогранника. Як показали тестові розрахунки, це дозволяє зменшити кількість обчислень цільової функції майже на порядок.

5. Вперше проаналізований і виявлений вплив на оптимальне управління зміни навантаження суднової мережі, та навпаки – вплив оптимального управління ГЕЕУ на показники якості електроенергії суднової мережі на маневрах.

Встановлено, що у електроходів з єдиною електроенергетичною системою скидання навантаження не впливає на оптимальне управління. При накиданні навантаження ступінь погіршення значення цільової функції залежить від співвідношення між потужністю системи електроруку й сумарною потужністю загальносуднових споживачів та коливається в діапазоні від 3 % до 27 %.

Оптимальне управління в порівнянні з класичним «пропорційним» управлінням дещо погіршує показники якості суднової мережі при маневруванні, але вони не виходять за межі, які встановлені міжнародними стандартами.

6. Вперше для широкого класу електроходів з єдиною електроенергетичною системою знайдені оптимальні параметри сигналів управління ГЕЕУ на маневрах. В якості критеріїв оптимальності при цьому використані показники, які характеризують маневрені характеристики судна, як старшої системи. Це – серії таблиць і діаграм із рекомендаціями з оптимального управління. Динамічні показники якості ГЕЕУ й показники якості

електроенергії суднової мережі входять у процедуру оптимізації як обмеження. Ефективність оптимізації становить від 2 % до 50 % у залежності від цільової функції й конкретних сполучень безрозмірних параметрів (від конкретного електрохода).

Результати оптимізації охоплюють всі електроходи з традиційним типом рушіїв із гребною електроенергетичною установкою на базі частотно-керованих гребних електродвигунів. Для кожного конкретного електрохода можливо вибрати із запропонованих таблиць необхідний (вже розрахований) результат.

7. Достовірність основних результатів дисертаційної роботи підтверджується відповідністю результатів математичного моделювання з експериментальними даними натурних випробувань.

Основні практичні результати дисертаційної роботи у вигляді рекомендацій по оцінці маневрених характеристик суднових пропульсивних комплексів, оптимізації параметрів управляючих сигналів ГЕЕУ в штатних і екстремальних ситуаціях впроваджені в Морському Інженерному Бюро. Пропозиції по вдосконаленню алгоритму управління гребними електродвигунами судна «Дунай» впроваджені в ТОВ «Компанія «Нові Технології-Україна». Теоретичні результати дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі Одеського національного морського університету.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] В.И. Небеснов, *Вопросы совместной работы двигателей, винтов и корпуса судна*. Ленинград, СССР: Судостроение, 1965.
- [2] В.И. Небеснов, *Динамика судовых комплексов*. Ленинград, СССР: Судостроение, 1967.
- [3] В.И. Небеснов, *Оптимальные режимы работы судовых комплексов*. Москва, СССР: Транспорт, 1974.
- [4] В.И. Небеснов, и В.А. Плотников, *Математические методы исследования режимов работы судовых комплексов*. Москва, СССР: Рекламбюро ММФ, 1977.
- [5] В.А. Яровенко, "Влияние параметров пропульсивных комплексов на показатели качества работы ГЭУ", *Придніпровський науковий вісник*, № 66. с. 79-83, 1998.
- [6] В.А. Яровенко, "Оптимальное управление силовыми установками электроходов с целью сокращения выбега судна при экстренном торможении", *Судовые энергетические установки: научн.-техн.сб. ОГМА*, № 4, с. 151-155, 1999.
- [7] В.А. Яровенко, "Оптимизация управления судовыми гребными электродвигателями при динамическом торможении", *Автоматизация судовых технических средств: научн.-техн.сб. ОГМА*, №. 4, с. 95-102, 1999.
- [8] В.А. Яровенко, "Оценка нагрузок на силовую установку электрохода при циркуляции", *Автоматизация судовых технических средств: научн.-тех.сб. ОГМА*, № 3,с. 160-165, 1999.
- [9] В.А. Яровенко, *Расчет и оптимизация переходных режимов пропульсивных комплексов электроходов*. Одесса, Украина: Маяк, 1999.
- [10] В.А. Яровенко, "Расчет показателей качества работы силовой установки пропульсивного комплекса электрохода на циркуляции", *Вісник Одеського державного морського університету*, № 3, с. 185-195, 1999.

- [11] В. А. Яровенко "Экстренное торможение электроходов в условиях ограниченной траектории", *ТЕМА*, № 3, с. 17-21, 1999.
- [12] В.В. Будашко, "Розробка трирівневої багатокритеріальної стратегії управління гібридною судновою енергетичною установкою комбінованого пропульсивного комплексу", *Електротехніка і електромеханіка*, № 2, с. 62-72, 2017. doi: 10.20998/2074-272X.2017.2.10.
- [13] V. Budashko, D. Ungarov, and O. Onishenko, "Modernization of hybrid electric-power system for combined propulsion complexes", *Electrotechnic and computer systems*, no. 23(99), pp. 17-22, 2016.
- [14] В.В. Будашко, та О.О. Оніщенко, "Удосконалення системи управління підрулюючим пристроєм комбінованого пропульсивного комплексу", *Вісник НТУ «ХП»*, № 38(1081), с. 45-51, 2014.
- [15] П.С. Суворов, *Эксплуатационные режимы нагружения главных судовых среднеоборотных дизелей*. Одесса, Украина: Моряк, 1995.
- [16] П.С. Суворов, Л.Н. Карпов, и Б.П. Мельников, "Идентификация режимов работы главных двигателей на мелководье", *Автоматизация судовых технических средств: научн.-тех. сб. ОГМА*, № 3, с. 143-154, 1999.
- [17] С.И. Горб. *Анализ систем автоматического регулирования частоты вращения судовых дизельных установок*. Москва, СССР: В/О "Мортехреклама", 1989.
- [18] С.И Горб, *Моделирование динамики работы дизельных пропульсивных установок на ЭВМ*. Москва, СССР: Мортехинформреклама, 1986.
- [19] Л.Н. Токарев, *Системы автоматического регулирования*. Санкт-Петербург, Россия: Нотабене, 2001.
- [20] Л.Н. Токарев, и Д.А. Хайров, "Мультилинейная структура электроэнергетической системы судов с электродвижением", *труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова*, № 77(361), с. 43-51, 2013.
- [21] J.F. Hansen, "Modeling and Control of Marine power System", PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway, Trondheim, 2008.

- [22] J.F. Hansen, A.K. Ådnanes, and T.I. Fossen, "Modelling, simulation and multivariable model-based predictive control of marine power generation system", *IFAC Proceedings*, no. 31(30), pp. 41-46, Oct. 1998. doi: 10.1016/S1474-6670(17)38415-X.
- [23] J.F. Hansen, A.K. Ådnanes, and T.I. Fossen, "Mathematical Modelling of Diesel-Electric Propulsion Systems for Marine Vessels", *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 1-33, Sept. 2001. doi: 10.1076/mcmd.7.3.323.3641.
- [24] A.K. Ådnanes, *Maritime electrical installations and diesel electric propulsion*, Oslo, Norway: ABB Marine AS, 2003.
- [25] D. Radan, *Power electronic converters for ship propulsion electric motors*. Trondheim, Norway: Department of Marine Technology NTNU, 2004.
- [26] D. Radan, "Integrated Control of Marine Electrical Power Systems", Doctoral, Norwegian University of Science and Technology, Norway, Trondheim, 2008.
- [27] ABB Marine. *ABB Marine Portal*. [Online]. Available: <https://new.abb.com/marine/>. Accessed on: Oct. 12, 2012.
- [28] Rolls-Royce Marine. *Rolls-Royce Marine Portal*. [Online]. <https://www.rolls-royce.com/products-and-services/marine.aspx>. Accessed on: Sep. 8, 2017.
- [29] Wartsila. *Wartsila Portal*. [Online]. Available: <https://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/power-systems/electric-propulsion/electric-propulsion-systems>. Accessed on: Apr. 11, 2016.
- [30] MAN, "Diesel-electric propulsion plants", [Online]. Available: <https://marine.mandieselturbo.com/docs/librariesprovider6/marine-broschures/diesel-electric-drives-guideline.pdf>. Accessed on: June 14, 2017.
- [31] MAN, *Hybrid Propulsion Flexibility and maximum efficiency optimally combined*. [Online]. Available: <https://marine.mandieselturbo.com/docs/default-source/shopwaredocumentsarchive/hybrid-propulsion.pdf?sfvrsn=4>. Accessed on: Sep. 9, 2017.

- [32] MAN, *EPROX Energy-saving electric propulsion system*. [Online]. Available: <https://marine.mandieselturbo.com/docs/librariesprovider6/marine-broschures/energy-saving-diesel-electric-propulsion-system---eprox-flyer.pdf?sfvrsn=0>
Accessed on: Sep. 9, 2017.
- [33] Siemens, *Integrtd propulsion technologies*. [Online]. Available: <https://www.industry.siemens.com/verticals/global/en/marine/commercial-ships/ship-propulsion/Pages/propulsion.aspx>. Accessed on: Aug. 5, 2015.
- [34] CruiseMapper, *Cruise ship engine power, propulsion, fuel*. [Online]. Available: <https://www.cruisemapper.com/wiki/752-cruise-ship-engine-propulsion-fuel>.
Accessed on: Sept. 27, 2018.
- [35] H. Numaguchi, T. Satoh, T. Ishida, S. Matsumoto, K. Hino, and T. Iwasaki, "Japan's First Dual-Fuel Diesel-Electric Propulsion Liquefied Natural Gas (LNG) Carrier", *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, vol. 46, no. 1, pp. 1-4, Mar. 2009.
- [36] J. Dvornik, and S. Dvornik, "Dual-Fuel-Electric Propulsion Machinery Concept on LNG Carriers", *Transactions on maritime science*, no. 2, pp. 137-148, Mar. 2009. doi: 10.7225/toms.v03.n02.005.
- [37] K. Janne, and L. Mika, "The DF Electric LNG Carrier Concept", in *24th Annu. Motorship Marin Propulsion Conf.*, Copenhagen, 2002.
- [38] J.F. Hansen, and R. Lysebo, "Electric propulsion for LNG Carriers", *LNG journal*, no. 5, pp. 11-12, Sept.-Oct. 2004.
- [39] D. Bruno, and J.F. Hansen, "Classification of electric propulsion systems for LNG carriers", in *5th International Symposium All-electric ship (AES) 2005*, Versailles, pp. 187-191, 13-14 Oct. 2005.
- [40] P.G. Noble, "The next generation of large LNG carriers for long distance and harsh environments", ConocoPhillips, 2007. [Online]. Available: <http://cmapsconverted.ihmc.us/rid=1HK99Y9SH-M4NHMY-15Q3/LNG%20Shipping.pdf>.
- [41] Я.Ф Хансен, и А.К. Аданес, "Большому кораблю – большое плавание" *АББ ревью*, № 1, с. 74-79, 2009.

- [42] А.Б. Хайкин, В.Н. Васильев, и В.И. Полонский. *Автоматизированные гребные электрические установки*. Москва, СССР: Транспорт, 1986.
- [43] Н.А. Кузнецов, П.В. Куропаткин, А.Б. Хайкин, и Н.М. Хомяков *Основы проектирования гребных электрических установок*. Ленинград, СССР: Судостроение, 1972.
- [44] Б.А. Горбунов, А.С. Савин, и В.В. Сержантов. *Современные и перспективные гребные электрические установки судов*. Ленинград, СССР: Судостроение, 1979.
- [45] Е.Б. Айзенштадт, Ю.М. Гилерович, Б.А. Горбунов, и В.В. Сержантов. *Гребные электрические установки: Справочник*. Ленинград, СССР: Судостроение, 1985.
- [46] Б.А. Тихменев, Н.Н. Горин, В.А. Кучумов, и В.А. Сенаторов, *Вентильные двигатели и их применение на подвижном составе*. Москва, СССР: Транспорт, 1976.
- [47] С.Н. Еремеев, и А.С. Сазонов, "Применение вентильного двигателя в гребной электрической установке ледокола", *Труды ЦНИИМФ. Судовые энергетические установки*, № 287, с. 75-81, 1984.
- [48] В.А. Малышев, и В.В. Романовский, "Особенности эксплуатации гребной установки атомного ледокола "Таймыр", *Судостроение*, № 11-12, с. 16-17, 1995.
- [49] R.L. Courtaу, "La propulsion diesel-electrique appliquee aux navires methaniers", *Techn.mod.*, vol. 87, № 1-2, pp. 7-12, 1995.
- [50] В.И. Вершинин, Н.А. Лазаревский, и В.В. Рудаков, "Расчет пусковых процессов с помощью динамической модели", *Судостроение*, № 1, с. 35-37, 1997.
- [51] Б.Е. Домровский, М.З. Желокова, А.Е. Кощерук, и П.А. Ровинский. "Гребная электрическая установка с асинхронным электродвигателем и статическим преобразователем частоты", в *Вопросы теории, проектирования и электродвижения судов*, В.Ф. Веревкина Ред. Ленинград, СССР: Судостроение, 1971, с. 201-210.

- [52] N. Mohan, T.M. Undeland, and W.P. Robbins, *Power Electronics Converters, Applications, and Design*. New York, USA: Wiley, 2003.
- [53] И.М. Васин, "Создание перспективных электротехнических и энергетических комплексов судовых единых электроэнергетических систем", дис. докт. наук, С-П гос. эл.-техн. ун-т "ЛЭТИ", Санкт-Петербург, 2011.
- [54] ДСТУ ISO 8528-5:2005, *Установки генераторные переменного тока с приводом от поршневых двигателей внутреннего сгорания. Часть 5. Генераторные установки*. Киев, Украина: Будстандарт, 2005.
- [55] И.М. Болвашенков, В.В. Романовский, и И.Л. Шегал, "Автоматизация процесса выбора энергетической установки судна ледового плавания на ЭЦВМ", *Автоматизация энергетических установок и систем судов: Сб. ЛВИМУ*, с. 93-97, 1988.
- [56] Н.В. Головня, "Оптимизация режимов совместной работы ядерной энергетической установки атомного ледокола", *Автоматизация судовых производственных процессов: ЦНИИМФ*, с. 67-69, 1987.
- [57] А.Н. Гузанов, А.А. Игнатов, И.А. Краснов, и А.В. Саушев, "Параметрическая оптимизация систем стабилизации напряжения судовых электростанций на максимум запаса работоспособности", *Судостроительная промышленность, серия судовая электротехника и связь*, № 3, с. 68-77, 1987.
- [58] В.С. Лейкин, и М.А. Семенов, "Некоторые особенности регулирования параметров гребной электроустановки (ГЭУ) по схеме синхронный генератор – выпрямитель – двигатель (СГ – В – Д)", *Судостроение*, № 9, с. 48-55, 1968.
- [59] Ю.А. Зубарев, А.Д. Собашников, В.А. Юхнович. *Расчет судовых автоматизированных систем методом активного планирования эксперимента*. Ленинград, СССР: Судостроение, 1976.

- [60] О.И. Аронов, и Ю.В. Неклюдов, "Математическое моделирование системы синхронный генератор – выпрямитель – двигатель в системах электродвижения судов", *Известия вузов. Электротехника*, № 8, с. 723-729, 1979.
- [61] Л.Е. Егоров. "Компьютерное моделирование единой высоковольтной судовой электроэнергетической системы с пропульсивными комплексами типа azipod в нормальных и аварийных режимах работы", дис. канд. наук, Санкт-Петербург, 2014.
- [62] Чан Вьет Хунг, "Исследование переходных процессов в аварийных режимах судовой электроэнергетической системы", дис. канд. наук, С-П гос. эл.-техн. ун-т "ЛЭТИ", Санкт-Петербург, 2007.
- [63] В.А. Яровенко и П.С. Черников, "Метод расчета переходных режимов гребных электроэнергетических установок электроходов", *Электротехніка і електромеханіка*, № 6, с. 32-41, 2017. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.05.
- [64] В.О. Яровенко, і П.С. Черніков, "Математична модель перехідних режимів гребних електричних установок у складі суднових пропульсивних комплексів", на *Міжн. симп. Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки (SIEMA '2017)*, Харків, 2017.
- [65] И.П. Копылов, *Электромеханические преобразователи энергии*. Москва, СССР: Энергия, 1973.
- [66] К.Г. Коноплев, *Импульсное регулирование синхронных генераторов*. Севастополь, Украина: СНТУ, 2008.
- [67] Г.В. Меркурьев, и Ю.М. Шаргин. *Устойчивость энергосистем*. Санкт-Петербург, Россия: НОУ "Центр подготовки кадров энергетики", 2005.
- [68] В.А. Яровенко, А.Е. Подлях, и П.С. Черников, "Моделирование переходных режимов работы синхронных генераторов судов с электродвижением", *Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал*, № 2, с. 49-57, 2011.

- [69] В.А. Яровенко, А.Е. Подлях, и П.С. Черников, "Математическая модель синхронного генератора в составе пропульсивного комплекса электрохода", *Вісник Одеського національного морського університету*, № 33, с. 134-143, 2011.
- [70] П.С. Черников, "Исследование переходных режимов генераторных агрегатов пропульсивных комплексов электроходов", *Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал*, №3, с. 40-49, 2011.
- [71] В.О. Яровенко і П.С. Черніков, "Математична модель синхронного генератора в складі пропульсивного комплексу електрохода", на *64-та наук.-техн. конф. проф.-викл. складу ОНМУ*, Одеса, 2011, с. 111-113.
- [72] П.С. Черніков, "Дослідження перехідних режимів генераторних агрегатів пропульсивних комплексів електроходів" на *65-та наук.-техн. конф. проф.-викл. складу ОНМУ*, Одеса, 2012, с. 77-78.
- [73] В.А. Яровенко, А.Е. Подлях, и П.С. Черников, "Математическая модель переходных режимов работы гребных электродвигателей", *Проблеми техніки: Науково-виробничий журнал*, № 1, с. 59-68, 2010.
- [74] В.А. Яровенко, А.Е. Подлях, и П.С. Черников, "Оптимальное управление гребными электродвигателями судов с электродвижением", на *IX Межд. науч.-техн. конф. Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах*, Севастополь, 2010.
- [75] В.О. Яровенко, і П.С. Черніков, "Оптимальне керування гребними електродвигунами суден з електрорухом", на *64-та наук.-техн. конф. проф.-викл. складу ОНМУ*, Одеса, 2011, с. 109-111.
- [76] А.А. Булгаков, *Частотное управление асинхронными двигателями*. Москва, СССР: Энергоиздат, 1982.
- [77] А.А. Усольцев, *Частотное управление асинхронными двигателями*. Санкт-Петербург, Россия: СПбГУ ИТМО, 2006.
- [78] Г.Г. Соколовский, *Электроприводы переменного тока с частотным регулированием*. Москва, Россия: Academia, 2006.

- [79] Р.Я. Першиц. *Управляемость и управление судном*. Ленинград, СССР: Судостроение, 1983.
- [80] Я.И. Войткунский, Р.Я. Першиц, и И.А. Титов. *Справочник по теории корабля*. Ленинград, СССР: Судостроение, 1973.
- [81] Л.Н. Баранов, и В.Е. Малишевский, "Результаты испытаний модернизированных регуляторов ГЭУ атомных ледоколов типа "Арктика", *Энергетические установки и оборудование морских судов*. с. 74-78, 1990.
- [82] В.А. Яровенко, "Исследование переходных режимов ГЭУ пропульсивных комплексов ледоколов при работе их в тяжелых льдах", дис. канд. наук, Одесское высшее инженерное морское училище, Одесса, 1981.
- [83] ГОСТ 10448-80, *Двигатели судовые, тепловозные и промышленные. Приемка. Методы испытаний (с Изменениями N 1-5)*.
- [84] А.Д. Дидык, В.Д. Усов, и Р.Ю. Титов, *Управление судном и его техническая эксплуатация*. Москва, СССР: Транспорт, 1990.
- [85] Г.Н. Шарлай, *Управление морским судном*. Владивосток, Россия: Мор. гос. ун-т, 2015.
- [86] Д.Н. Бусленко, *Маневрирование и управление судном*. Ростов-на-Дону, Россия: Ростовский-на-Дону морской колледж им. Г.Я. Седова, 2003.
- [87] А.С. Мальцев, В.В. Голиков, и И.В. Сафин. *Методологические основы маневрирования судов при сближении*. Одесса, Украина: ОНМА, 2013.
- [88] В.А. Яровенко, Е.И. Зарицкая и П.С. Черников, "Оценка маневренных характеристик электроходов на начальных стадиях их проектирования", *Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Електричні машини та електромеханічне перетворювання енергії», № 1 (1223), с. 57-63, 2017.*
- [89] П.С. Черников, В.А. Яровенко и Е.И. Зарицкая, "Влияние параметров электроходов на показатели качества работы электроэнергетических установок при маневрировании", *Вісник НТУ "ХПІ". Серія "Електричні машини та електромеханічне перетворювання енергії", № 5 (1281), с. 46-54, 2018.*

- [90] J.-F. Bonnans, J.C. Gilbert, C. Lemarechal, and C.A. Sagastizábal, *Numerical optimization: theoretical and practical aspects*. Berlin-Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2006. doi: 10.1007/978-3-662-05078-1.
- [91] R. Fletcher, *Practical Methods of Optimization*. Chichester, Great Britain: Wiley, 2000. doi: 10.1002/9781118723203.
- [92] A. Antoniou, and W.-S. Lu, *Practical optimization. Algorithms and engineering applications*. New York, USA: Springer, 2007.
- [93] Д. Химмельблау. *Прикладное нелинейное программирование*. Москва, СССР: Мир, 1975.
- [94] C.A. Floudas, and P.M. Pardalos, *Encyclopedia of optimization*. New York, USA: Springer, 2009. doi: 10.1007/978-0-387-74759-0.
- [95] А.В. Пантелеев, и Т.А. Летова. *Методы оптимизации в примерах и задачах*. Москва, Россия: Высшая школа, 2008.
- [96] А.Г. Сухарев, А.В. Тимохов, и В.В. Федоров. *Курс методов оптимизации*. Москва, Россия: Физматлит, 2005.
- [97] В.А. Яровенко, П.С. Черников, Р.А. Варбанец, и Е.И. Зарицкая, "Оптимальное управление гребными электродвигателями электроходов при реверсировании", *Електротехніка і електромеханіка*, № 6, с. 38-46, 2018. doi: 10.20998/2074-272X.2018.6.05.
- [98] В.А. Яровенко, и П.С. Черников, "Системный подход к поиску законов управления ГЭД судов с электродвижением", на *IV междунар. науч.-техн. конф. Новейшие технологии в электроэнергетике*, Харьков, 2012, с. 89-90.
- [99] В.А. Яровенко, и П.С. Черников, "Управление гребными электрическими установками электроходов при различных критериях оптимальности", на *XIII междунар. науч.-техн. конф. Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах*, Севастополь, 2013.

- [100] В.О. Яровенко, і П.С. Черніков, "Оптимальне управління гребною електричною установкою електрохода при маневруванні на прямому курсі", на *Міжн. симп. Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки (SIEMA'2018)*, Харків, 2018.
- [101] Ф.А. Васильев, *Численные методы решения экстремальных задач*. Ленинград, СССР: Судостроение, 1989.
- [102] Корабел.ру. *Korabel Portal*. [Online]. Available: <https://www.korabel.ru/fleet/index2.html>. Accessed on: Feb. 14, 2017.