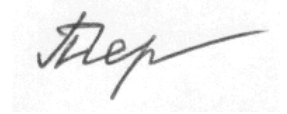


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ



ЧЕРНІКОВ ПАВЛО СЕРГІЙОВИЧ

УДК 629.12:629.12.037

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

Спеціальність 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики» Одеського національного морського університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
ЯРОВЕНКО Володимир Олексійович,
Одеський національний морський університет,
завідувач кафедри «Експлуатація суднового
електрообладнання і засобів автоматики»

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
БУДАШКО Віталій Віталійович,
Національний університет «Одеська морська академія»,
декан факультету «Електромеханіка і радіоелектроніка»

кандидат технічних наук, доцент
ДОЛГОПОЛОВ Петро Віталійович,
Український державний університет залізничного
транспорту, м. Харків,
доцент кафедри «Управління експлуатаційною роботою»

Захист дисертації відбудеться 28 лютого 2019 р. о 11⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д41.060.01 в Одеському національному морському університеті за адресою: 65029, Україна, м. Одеса, вул. Мечникова, 34.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці імені проф. Г.К. Сулова Одеського національного морського університету за адресою: 65029, Україна, м. Одеса, вул. Мечникова, 34.

Автореферат розісланий 26 січня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д41.060.01
кандидат технічних наук, доцент



О.В. Акімова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

В останні десятиліття у світовому суднобудуванні істотно зріс інтерес до застосування електроруху на суднах. 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 гребню електричну установку (ГЕУ), і загальносуднові споживачі електроенергії, має істотні переваги 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. 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 ГЕЕУ на маневрах порівнянні з тривалістю перехідних процесів руху самого судна. Тому, при аналізі маневрених режимів гребню 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 й удосконалення методів оптимізації управління гребними електроенергетичними установками електроходів 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 в складі пропульсивних комплексів для широкого класу електроходів.

2. Розрахунки перехідних режимів роботи виконані чисельними розв'язуваннями системи диференціальних та алгебраїчних рівнянь в системі – `qb64`; 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 оптимізації, 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

суднах 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 параметрів сигналів 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 в 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 [1, 9, 10] здобувач брав участь у розробці математичної моделі асинхронного гребного електродвигуна, формуванні висновків. У статті [2] здобувачем розроблена математична модель синхронного генератора на основі рівнянь Парка-Горєва як складова єдиної математичної моделі суднового пропульсивного комплексу. У спільній роботі [3] внесок дисертанта – розробка уточненої математичної моделі синхронного генератора, розрахунок (за допомогою моделі) перехідних процесів синхронних генераторів реального електрохода й формування висновків. У роботах [4, 11, 12] здобувачем сформована мета, розроблена математична модель генераторних агрегатів пропульсивних комплексів електроходів, експериментально проаналізовано використання розробленої моделі, сформовані висновки.

У статті [5] дисертант брав участь у побудові аналітичних моделей показників якості, проведенні експерименту по оцінці показників якості маневрування й формуванні висновків. У роботах [6, 15] 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 [7] здобувач розробив аналітичні моделі показників якості маневрування електроходів і електроенергії суднової мережі, експериментально оцінив вплив параметрів на показники якості маневрування. У роботах [8, 13, 14, 16] 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми й розглянуто її зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Сформульовано мету й окреслені задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет та методи дослідження. Показано наукову новизну й практичне значення отриманих результатів. Представлено апробацію результатів дослідження й надано інформацію про структуру роботи.

У **першому розділі** 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 (ГЕУ), 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 ГЕУ на параметри електроенергії суднової мережі. Потрібен математичний апарат, який дасть змогу знайти оптимальне управління гребними електроенергетичними установками на маневрах з забезпеченням при цьому роботи силової установки в припустимих режимах і підтримкою якості електроенергії суднової мережі на необхідному рівні.

У **другому розділі** розроблена математична модель і метод розрахунку на її основі маневрених режимів роботи гребних електроенергетичних установок у складі пропульсивних комплексів електроходів з єдиною електроенергетичною системою.

Рішення поставленої задачі проведено стосовно до найпоширенішої системи електроруку – на базі частотно-керованих асинхронних гребних електродвигунів.

Структурна схема пропульсивного комплексу електрохода представлена на рис. 1. До складу кожного «силового» контуру входять: тепловий двигун – D , синхронний генератор (СГ) – G , частотний перетворювач електроенергії – SE , асинхронний гребний електродвигун (ГЕД) – M , гребний гвинт – P . Пропульсивний комплекс також включає в себе кермо – H і корпус судна.

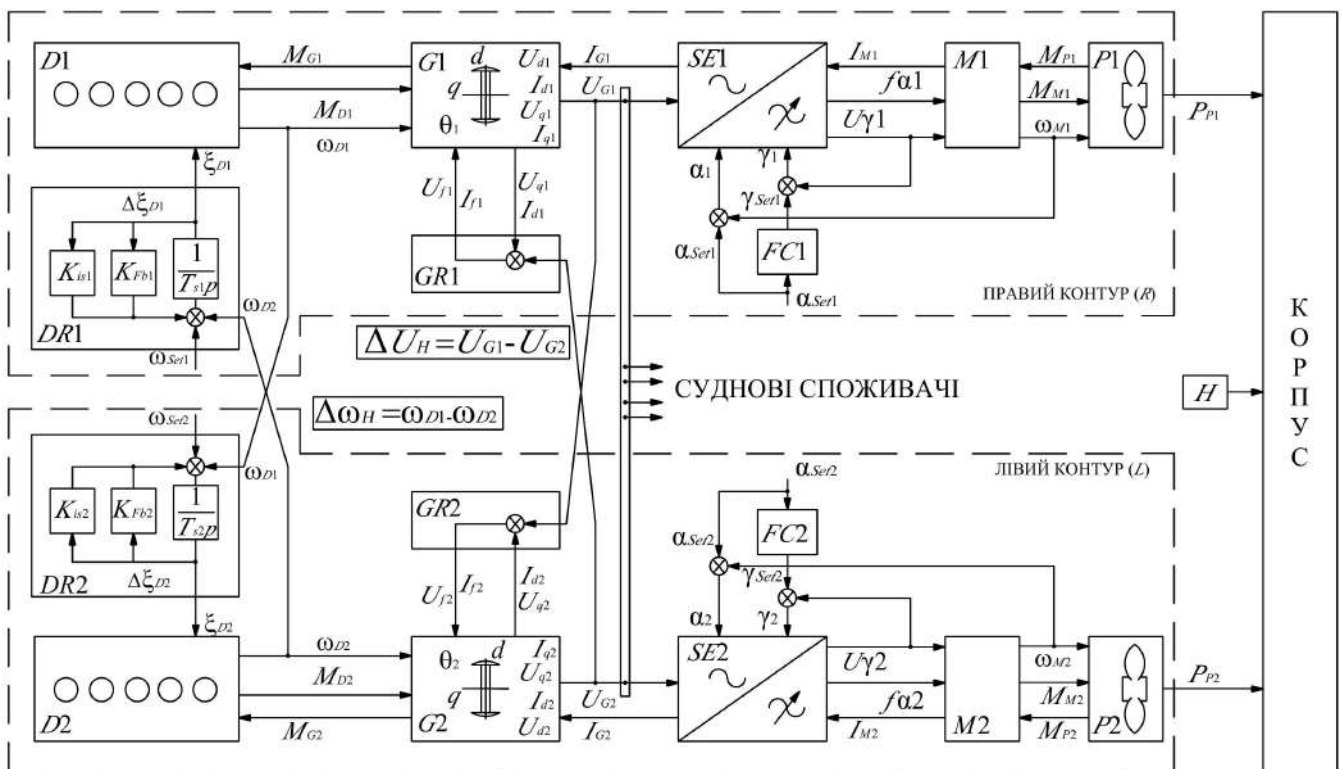


Рисунок 1 – Структурна схема пропульсивного комплексу електрохода

Елементи системи автоматичного регулювання й основні параметри, що зв'язують силові блоки та управляючі сигнали: регулятор частоти обертання теплового двигуна – DR ; автоматичний регулятор напруги генератора – GR ; M_D і ω_D – обертаючий момент і кутова швидкість обертання теплового двигуна; M_G – момент опору генератора; U_d і U_q – напруги генератора по поздовжній і поперечній осях (внутрішні координати); I_d і I_q – струми генератора по поздовжній і поперечній осях (внутрішні координати); 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; $1/T_{sp}$ – ланка сервомотора; K_{Fb} і K_{is} – коефіцієнти підсилення ланок жорсткого та гнучкого (ізодромного) зворотних зв'язків; U_f і I_f – напруга і струм збудження синхронного генератора; I_G , I_M – струми СГ і ГЕД; α_{Set} і γ_{Set} – відносні частота та напруга перетворювача (значення, що задаються); α і γ – відносні частота та напруга на виході перетворювача (з урахуванням зворотних зв'язків); FC – функціональний перетворювач, який формує відносну напругу $\gamma = f(\alpha)$; M_P і P_P – момент і упор гребних гвинтів; M_M і ω_M – обертаючий момент і кутова швидкість обертання ГЕД.

На базі структурної схеми розроблено узагальнену математичну модель перехідних режимів роботи пропульсивних комплексів на маневрах. Для охоплення широкого класу електроходів з ЄЕЕС і можливості проведення далі широких узагальнень отриманих результатів модель приведена до відносних одиниць. Відносні значення режимних показників будуть позначатися символом з рисою. (Індекс «0» відповідає значенням режимних показників в усталеному (базовому) режимі).

Узагальнена математична модель перехідних режимів роботи пропульсивного комплексу електрохода (основні її рівняння) представлена нижче.

Рівняння руху теплового двигуна

$$\frac{d\overline{\omega}_D}{dT} = N_D (\overline{M}_D - \overline{M}_G), \quad (1)$$

де $N_D = \frac{M_{D0}L}{J_D\omega_{D0}v_0}$ – критерій динамічної подібності, $T = \frac{v_0}{L}t$; v_0 і L – швидкість судна та його довжина, t – поточний час; J_D – наведений момент інерції.

Обертаючий момент теплового двигуна у відносних одиницях можна представити як відносне переміщення рейки паливного насоса

$$\overline{M}_D = \overline{\xi}_D. \quad (2)$$

Рівняння перехідних процесів у регуляторі швидкості обертання теплового двигуна, з урахуванням жорсткого і гнучкого зворотних зв'язків та роботи системи розподілу активної потужності можуть бути представлені як:

$$\frac{d\overline{\xi}_D}{dT} = K_P (1 - (\overline{\omega}_D - \Delta\overline{\omega}_H)) - K_{Fb} \overline{\Delta\xi}_D - K_{is} \frac{d\overline{\Delta\xi}_D}{dT}, \quad (3)$$

де K_P , K_{Fb} , K_{is} – коефіцієнти підсилення по величині, яка регулюється – ω_D , жорсткого і гнучкого (ізодромного) зворотнього зв'язку відповідно; $\Delta\omega_H$ – різниця кутових частот обертання генераторів.

В математичній моделі синхронного генератора й системи автоматичного регулювання напруги не враховуються процеси, які непорівнянні з постійними часу основних складових частин пропульсивного комплексу. У зв'язку з малістю, зневажаємо активним опором якоря, взаємною індуктивністю й потокозчепленнями демпферних обмоток. До складу системи автоматичного регулювання напруги генераторів включений контур регулювання розподілу реактивної потужності.

Кути зсуву фаз між векторами \overline{I}_G і \overline{U}_G , між векторами електрорушійної сили \overline{E}_G і \overline{I}_G та кут навантаження (між векторами \overline{E}_G і \overline{U}_G)

$$\varphi_G = \frac{\gamma_G}{2}, \quad \psi_G = \arctg\left(\frac{\sin \varphi_G}{\cos \varphi_G} + \frac{x_q \overline{I}_G}{\overline{U}_G \cos \varphi_G}\right), \quad \theta_G = \psi_G - \varphi_G, \quad (4)$$

де γ_G – кут комутації; x_q – синхронний індуктивний опір по осі q .

Струми генератора (внутрішні координати d - q)

$$\overline{I}_d = -\overline{I}_G \sin \psi_G, \quad \overline{I}_q = \overline{I}_G \cos \psi_G. \quad (5)$$

Напруги генератора (внутрішні координати d - q)

$$\overline{U}_d = -K_{d1} \overline{I}_G \cos \psi_G, \quad \overline{U}_q = -K_{q1} \overline{I}_G \sin \psi_G + K_{q2} \overline{I}_f, \quad (6)$$

де \overline{I}_f – струм обмотки збудження генератора.

Приріст струму збудження

$$\frac{d\overline{I}_f}{dT} = N_f \left(K_{f1} K_{Uq} \overline{U}_q + K_{f2} K_{Id} \overline{I}_d - K_{f3} K_U \left(\overline{U}_G - (1 - \Delta \overline{U}_{H1}) \right) - \overline{I}_f \right), \quad (7)$$

де $\Delta \overline{U}_{H1} = \frac{\overline{I}_{re1} - \overline{I}_{re2}}{k_{re1}}$ – різниця напруг генераторів; $\overline{I}_{re1} = \overline{U}_{q1} \overline{I}_{d1} - \overline{U}_{d1} \overline{I}_{q1}$ – реактивна

складова струму СГ; K_{d1} , K_{q1} , K_{q2} , K_{Uq} , K_{Id} , K_U – безрозмірні параметри;

$N_f = \frac{L U_{f0}}{L_f I_{f0} v_0}$ – критерій динамічної подібності; L_f – індуктивність самоіндукції

обмотки збудження; U_f і I_f – напруга і струм обмотки збудження; K_{f1} , K_{f2} , K_{f3} – коефіцієнти підсилення по основному сигналу, по впливу, що обурює й по відхиленню величини, що регулюється відповідно; k_{re1} – коефіцієнт підсилення контуру автоматичного регулювання системи розподілу реактивного навантаження.

Момент опору генератора

$$\overline{M}_G = -K_{G1} \overline{I}_G^2 \sin \psi_G \cos \psi_G + K_{G2} \overline{I}_f \overline{I}_G \cos \psi_G, \quad (8)$$

де K_{G1} , K_{G2} – безрозмірні параметри.

Напруга на виході генератора й активна потужність генератора

$$\overline{U}_G = \sqrt{\overline{U}_d^2 + \overline{U}_q^2}, \quad \overline{P}_G = \overline{U}_G \overline{I}_G \cos \varphi_G. \quad (9)$$

У математичній моделі гребного електродвигуна наведено його узагальнений математичний опис. В якості окремого випадку з нього, впливає математична модель асинхронного електродвигуна (АД) при частотному керуванні. У її основі закладена точна класична схема заміщення АД, що й визначає необхідні припущення та спрощення.

Рівняння руху гребного електродвигуна

$$\frac{d\overline{\omega}_M}{dT} = N_M (\overline{M}_M - \overline{M}_P), \quad (10)$$

де $N_M = \frac{M_{M0}L}{J_M \omega_{M0} v_0}$ – критерій динамічної подібності.

Момент на валу гребного електродвигуна

$$\overline{M}_M = K_M \overline{I}_M \overline{\Phi}_M \cos \varphi_M. \quad (11)$$

Струм гребного електродвигуна

$$\overline{I}_M = C_{M24} \gamma \frac{1}{\sqrt{C_{M17} + C_{M18} \alpha^2 + \frac{C_{M21} + C_{M22} \alpha^2}{(C_{M19} \alpha - C_{M20} \overline{\omega}_M)^2} + \frac{C_{M23} \alpha}{C_{M19} \alpha - C_{M20} \overline{\omega}_M}}}. \quad (12)$$

Магнітний потік гребного електродвигуна

$$\overline{\Phi}_M = C_{M25} \gamma \frac{x'_{2M} (C_{M19} \alpha - C_{M20} \overline{\omega}_M)^2 + r_{2M}'^2}{\sqrt{(b_M^2 + c_M^2 \alpha^2) (C_{M19} \alpha - C_{M20} \overline{\omega}_M)^2 + (d_M^2 + e_M^2 \alpha^2) r_{2M}'^2 + 2r_{1M} r_{2M}' \alpha (C_{M19} \alpha - C_{M20} \overline{\omega}_M)}}}. \quad (13)$$

Коефіцієнт потужності гребного електродвигуна

$$\cos \varphi_M = \frac{1}{\sqrt{1 + C_{M26} (C_{M19} \alpha - C_{M20} \overline{\omega}_M)^2}}. \quad (14)$$

Тут $C_{M17} - C_{M26}$ – безрозмірні параметри пропульсивного комплексу; J_M – наведений момент інерції; K_M – конструктивний коефіцієнт; ω_{1Mn} – частота обертання магнітного поля статора; r_{1M} і x_{1M} – активний та індуктивний опір статора АД; r_{2M}' і x'_{2M} – активний та індуктивний опір ротора (приведені до обмотці статора) АД; x_{0M} – індуктивний опір намагнічування; b_M, c_M, e_M, d_M – постійні коефіцієнти асинхронного частотно-керованого ГЕД.

Управління електроенергетичною установкою здійснюється з поста управління на містку. Управління кожним силовим контуром здійснюється окремо. На гребні електродвигуни формуються два сигнали управління: перший – по частоті обертання ГЕД (залежить від відносної частоти α), другий – по відносній напрузі живлення двигуна γ .

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

$$\alpha = \alpha_{Set} - K_{\alpha P} \alpha_P - K_{\alpha \omega} \alpha_\omega - K_{\alpha f} (\alpha_f - \alpha_{fmax}) - K_{\alpha M} (\alpha_M - \alpha_{Mmax}) - K_{\alpha I} (\alpha_I - \alpha_{Imax}) - K_{\alpha PD} (\alpha_{PD} - \alpha_{PDmax}), \quad (15)$$

де α_{Set} – задане значення відносної частоти (задане значення частоти обертання електродвигуна); $K_{\alpha P}, K_{\alpha \omega}, K_{\alpha f}, K_{\alpha M}, K_{\alpha I}, K_{\alpha PD}$ – коефіцієнти підсилення коригувальних зв'язків по потужності ГЕД, по кутовій швидкості його обертання, відсічення по вихідній частоті перетворювача SE , по обертаючому моменту й струму ГЕД, по потужності теплового двигуна.

Другий сигнал управління – відносна напруга живлення гребних електродвигунів

$$\gamma = \gamma_{Set} - K_{\gamma I} (\gamma_I - \gamma_{I_{max}}) - K_{\gamma U} \gamma_U, \quad (16)$$

де γ_{Set} – задане значення відносної напруги – сигнал управління, який є функцією відносної частоти α й прийнятого сигналу управління напругою; γ_U – коригувальний зв'язок по нарузі ГЕД; γ_I – відсічення по струму статора ГЕД; $K_{\gamma I}$ і $K_{\gamma U}$ – коефіцієнти підсилення по струму й по нарузі ГЕД.

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

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.

З урахуванням руху по криволінійній траєкторії, представимо їх у вигляді поліномів

$$\overline{M_P} = a_{21} \overline{\omega_M^2} + b_{21} \overline{\omega_M v_e} + c_{21} \overline{v_e^2} + a_M \overline{v}^2 \text{tg}^2 \alpha_{Bev}, \quad (17)$$

$$\overline{P_P} = a_{11} \overline{\omega_M^2} + b_{11} \overline{\omega_M v_e} + c_{11} \overline{v_e^2} + a_P \overline{v}^2 \text{tg}^2 \alpha_{Bev}, \quad (18)$$

де a_{21} , b_{21} , c_{21} , a_M , a_{11} , b_{11} , c_{11} , a_P – коефіцієнти універсальної гідродинамічної характеристики гвинта; α_{Bev} – кут скосу потоку води.

Корпус електрохода. Розглядається рух судна по вільній поверхні води в пов'язаній з ним системі координат $GXYZ$, початок якої збігається із центром ваги. Складові швидкості руху уздовж осей X , Y і швидкість обертання навколо осі Z

$$\frac{d\overline{v_X}}{dT} = C_{\lambda 2} \overline{v_Y \Omega_Z} + N_X \left\{ \sum_J K_{Pj} \overline{P_{ej}} - C_{RX} \beta_{RP} \overline{v^2} - \overline{R_X} \right\}, \quad (19)$$

$$\frac{d\overline{v_Y}}{dT} = -\frac{1}{C_{\lambda 2}} \overline{v_X \Omega_Z} + \frac{N_X}{C_{\lambda 2}} \left\{ \sum_J K_{Pj} \alpha_{jz} \overline{P_{ej}} - C_{RY} \beta_{RP} \overline{v^2} - \overline{R_Y} \right\}, \quad (20)$$

$$\frac{d\overline{\Omega_Z}}{dT} = -\frac{N_\Omega}{N_X} C_{\lambda 21} \overline{v_X v_Y} + N_\Omega \left\{ \sum_J K_{Pj} h_{Pj} \overline{P_{ej}} + (\overline{M_{PZ}} - \overline{M_{DZ}}) + C_{RY} \overline{X_R} \beta_{RP} \overline{v^2} \right\}, \quad (21)$$

де $N_X = \frac{L \sum K_{Pj} P_{ej0}}{(m + \lambda_{11})v_0^2}$, $N_\Omega = \frac{L^3 \sum K_{Pj} P_{ej0}}{2(J_Z + \lambda_{66})v_0^2}$ – критерії динамічної подібності; R_X і R_Y –

поздовжня й поперечна сили керма; $C_{\lambda 2}$, $C_{\lambda 21}$, C_{RX} , C_{RY} – безрозмірні параметри; α_{jz} – кут нахилу лінії гребного гвинта до осі X ; X_R і h_{Pj} – відстань від центра системи координат до керма й j -го гвинта відповідно; P_{ej} і K_{Pj} – корисний упор гребного гвинта і його частка в сумарному упорі відповідно; m – маса судна; λ_{11} – приєднана маса води уздовж осі X ; λ_{66} – приєднаний момент інерції води; M_{PZ} – позиційний момент опору; M_{DZ} – демпфуючий момент опору; β_{RP} – кут дрейфу; J_Z – момент інерції судна при обертанні його навколо осі Z .

Узагальнена математична модель дозволяє всебічно аналізувати перехідні процеси пропульсивних комплексів електроходів на маневрах. В процесі її розробки виявлені безрозмірні параметри пропульсивних комплексів «теплові двигуни – гребна електрична установка – рушії – корпус судна». Саме ці параметри й

визначають поточні значення відносних режимних показників комплексу та чисельні значення основних показників якості маневрів. Знайдено діапазони зміни значень цих параметрів. Вони охоплюють більшість серій електроходів із традиційним приводом гребних гвинтів. Такий підхід дозволяє надати спільність одержуваним результатам – електроходи з рівними значеннями безрозмірних параметрів будуть мати відповідно однакові значення (у відносних одиницях) показників якості маневрування.

Для аналізу маневрених режимів розроблено пакет прикладних програм. Базовою є програма, що дозволяє розраховувати поточні значення режимних показників при виконанні електроходами різноманітних маневрів. Результати розрахунків представляються в числовому й у графічному вигляді.

У **третьому розділі** наведені результати дослідження впливу параметрів пропульсивних комплексів електроходів на основні показники якості маневрів, якими є:

- максимальне збільшення потужності первинних двигунів $P_{Dm} = P_{Dmax} / P_{Dstd}$;
- відхилення кутової швидкості обертання первинних двигунів

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

- кидки струму генераторів при розгоні $I_{Gacc} = I_{Gacc\ max} / I_{Gacc\ std}$;
- кидки струму генераторів при реверсі $I_{Grev} = I_{Grev\ max} / I_{Grev\ std}$;
- кидки обертаючого моменту ГЕД при розгоні $M_{Macc} = M_{Macc\ max} / M_{Macc\ std}$;
- кидки обертаючого моменту ГЕД при реверсі $M_{Mrev} = M_{Mrev\ max} / M_{Mrev\ std}$;
- кидки струму ГЕД при розгоні $I_{Macc} = I_{Macc\ max} / I_{Macc\ std}$;
- кидки струму ГЕД при реверсі $I_{Mrev} = I_{Mrev\ max} / I_{Mrev\ std}$;
- максимальна швидкість судна в кінці маневру – v_{max} ;
- тривалість виконання маневру – T_M ;
- пройдений судном шлях по закінченню маневру – X_1 ;
- відносні витрати енергії на виконання маневру – W .

Розроблена математична модель дає можливість враховувати при маневруванні вплив перехідних режимів у ГЕУ на параметри електроенергії суднової електричної мережі, що віддзеркалюється на роботі загальносуднових споживачів електроенергії. Для цього, до складу основних показників якості маневрування, включені основні критерії, що характеризують динамічні параметри напруги й частоти суднової мережі (відповідно до стандарту ISO 8528-5):

- відносне відхилення частоти суднової мережі при підвищенні і зниженні навантаження

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

- відносне відхилення напруги суднової мережі при підвищенні і зниженні навантаження

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

- час відновлення частоти при підвищенні – t_{fin} і зниженні – t_{fde} потужності;
- час відновлення напруги при підвищенні – t_{uin} і зниженні – t_{ude} потужності.

В основі пошуку параметрів, які суттєво впливають на показники якості і кількісної оцінки ступеня їх впливу лежать результати розрахунків поточних значень режимних показників при виконанні електроходом маневрених операцій.

На рис. 2, як приклад, наведені поточні значення основних режимних показників 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.

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

На першому етапі аналізу були виявлені параметри, які суттєво впливають на запропоновані показники якості й оцінено ступінь цього впливу. В основі аналізу закладено метод випадкового балансу. За його результатами виявлені показники з внеском більше 2 %. Це безрозмірні параметри: $N_D, N_X, N_M, C_{M17}, C_{M18}, C_{M20}, C_{M23}$.

$$C_{M17} = \frac{b_M^2}{r_{2M}^2}, C_{M18} = \frac{c_M^2}{r_{2M}^2} \alpha_0^2, C_{M20} = \frac{\omega_{M0}}{\omega_{1Mn}}, C_{M23} = 2 \frac{r_{1M}}{r_{2M}} \alpha_0.$$

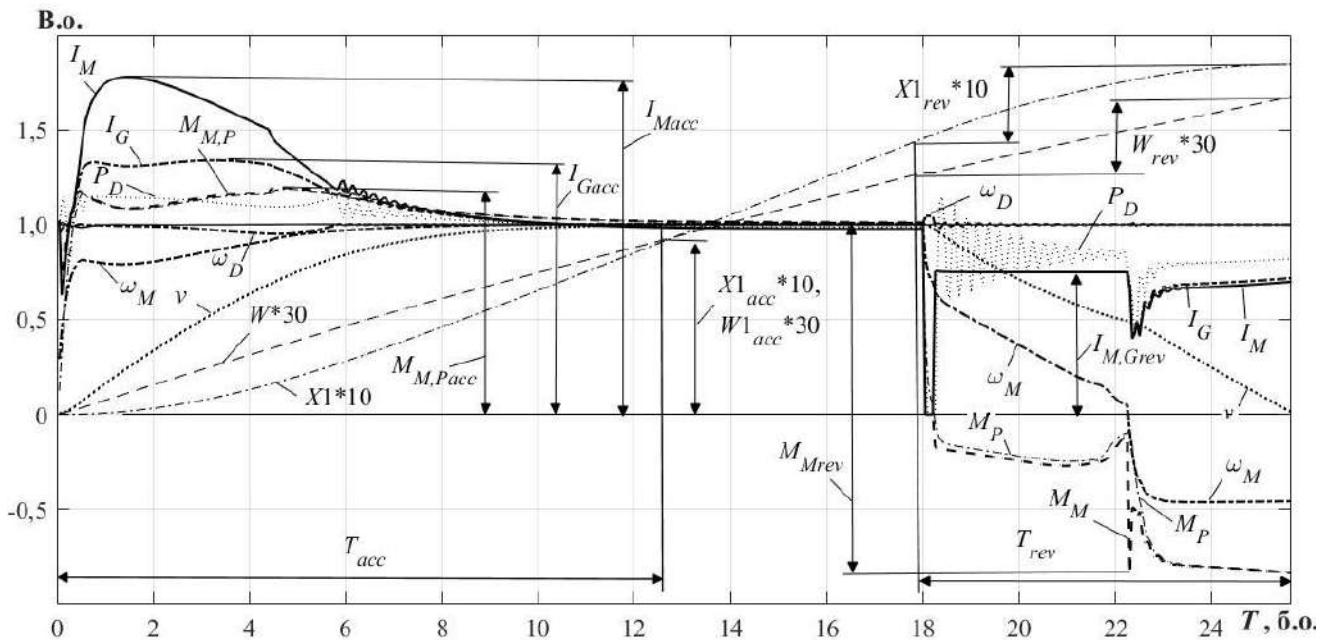


Рисунок 2 – Поточні значення режимних показників при виконанні комбінації маневрів «розгін ГЕЕУ – реверс ГЕЕУ до зупинки електрохода»

Їх внески в основні показники якості маневрування наведені в таблиці 1. Вплив інших параметрів незначний, їх можна надалі приймати не варійованими.

На другому етапі побудовані аналітичні моделі показників якості – наближені їх залежності від параметрів, які впливають суттєво.

При встановленні зв'язків показників якості J з параметрами пропульсивного комплексу q_i використовується прийом адекватного уявлення показника $J = J(q_1, q_2, \dots, q_n)$ деякою наближеною аналітичною моделлю

$$J^* = J^*(q_1, q_2, \dots, q_n). \quad (22)$$

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

Для аналізу суднових електромеханічних систем найчастіше досить обмежитися поданням показників J^* у вигляді поліномів першого порядку

$$J^* = \sum_{i=0}^n b_i q_i + \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} q_i q_j, i \neq j. \quad (23)$$

Таблиця 1 – Внески безрозмірних параметрів в показники якості роботи електроходів на маневрах

Показник якості маневрування	Внески безрозмірних параметрів								
	N_D	N_X	N_M	C_{M17}	C_{M18}	C_{M20}	C_{M23}	$\frac{N_X}{C_{M23}}$	$\frac{C_{M20}}{C_{M23}}$
Тривал. 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
Максимальне збільшення потужності P_{Dm}	19,1	66	–	–	6,8	6,7	52,8	2,3	1,17
Кидки струму генераторів I_{Grev}	–	21,6	–	–	13	–	12,4	–	–
Кидки обертаючого моменту ГЕД 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 δf_{dyn}^-	4,9	4,1	–	–	–	–	2,7	–	–
Відносне відхилення напруги δU_{dyn}^-	0,5	4,3	–	–	0,5	0,5	2	–	–
Час відновлення напруги $t_{u in}$, с	13,7	86,4	–	–	50	18,2	31,8	–	–
Час відновлення частоти $t_{f in}$, с	54,6	363,6	–	–	–	–	127,3	–	–

За результатами розрахунків, виконаних методом повного факторного експерименту, отримані рівняння внесків безрозмірних параметрів у відповідний показник якості (наданих у табл. 1):

– тривалість маневру

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

– вибіг судна

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

– витрати енергії

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

– максимальне збільшення потужності теплових двигунів

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

– кидки струму генераторів при реверсі

$$I_{Grev} = 1,3 + 21,6N_X - 13C_{M18} - 12,4C_{M23};$$

– кидки обертаючого моменту ГЕД при реверсі

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

– кидки струму ГЕД при реверсі

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

– відносне відхилення частоти генераторів при підвищенні навантаження

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

– відносне відхилення напруги генераторів при підвищенні навантаження

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

– час відновлення напруги на виході генераторів при підвищенні потужності

$$t_{u in} = 1,1 + 13,7N_D - 86,4N_X - 50C_{M18} + 18,2C_{M20} - 31,8C_{M23};$$

– час відновлення частоти на виході генераторів при підвищенні потужності

$$t_{f in} = 0,55 + 54,6N_D - 363,6N_X - 127,3C_{M23}.$$

Отримані аналітичні залежності показують характер і ступінь впливу значимих параметрів на показники якості роботи пропульсивних комплексів електроходів на маневрах. Вони дозволяють у першому наближенні обчислювати основні показники та оцінювати маневрені характеристики електроходів без необхідності розрахунку маневрів по повній математичній моделі.

У **четвертому розділі** отримані оптимальні параметри сигналів управління гребними електроенергетичними установками на маневрах.

Сигнал управління γ сумісно з сигналом α та моментом навантаження на валу $M_p(\omega)$ гребного гвинта повністю визначають поведінку асинхронного гребного електродвигуна і відповідно всього пропульсивного комплексу електрохода на маневрах. Звідси й випливає актуальність виявлення оптимальних параметрів цих сигналів управління.

При частотному управлінні ГЕД звичайно рекомендується пропорційна залежність відносної напруги γ від відносної частоти α : $\gamma/\alpha = \text{const}$. Але, цей класичний варіант частотного управління пропонується стосовно до «електричних» показників якості роботи гребних електродвигунів. При системному підході до оптимального управління гребними електроенергетичними установками виникає необхідність у пошуках таких сигналів управління, які забезпечать у першу чергу найкращі значення показників якості маневрування електрохода, з контрольованими

при цьому показниками роботи ГЕЕУ й контрольованими параметрами електроенергії суднової мережі.

Пропонується формувати сигнали управління у вигляді:

$$\alpha = \alpha_{prim} + K_1(1 - \exp(-K_5 T)), \quad (24)$$

$$\gamma = K_2 \alpha + K_3 \alpha^2 + K_4 \alpha^3 + (1 - K_2 - K_3 - K_4) \alpha^4 \quad (25)$$

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.

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.

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

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

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 $g_j(\mathbf{K}) \geq 0, j = 1, 2, \dots, p$, визначаються припусками з діапазону змін режимних показників ГЕЕУ.

Методи пошуку оптимальних рішень будувалися виходячи з виявленого характеру цільових функцій. Вони є багатоекстремальними, з невідомою кількістю локальних мінімумів, і мають явно виражений яружний характер. В основу пошуку оптимальних рішень покладено комбінацію одного з пасивних методів покриттів – методу випадкової сітки з модифікованим методом тунельного алгоритму.

Склад та послідовність операцій щодо пошуку глобального оптимуму надані на рис. 3.

Алгоритми пошуку локальних оптимумів створювалися на базі комбінації методів локального спуску й способів яружного пошуку. Локальні спуски здійснювались за допомогою методів Пауелла й Нелдера-Міда. Відсутність прискорення й труднощі пошуку на викривлених «ярах» і «хребтах» долаються за рахунок зміни форми багатогранника.

Кожен крок «Обчислити $L_T^{(m)}(K_{j1}^{(m)})$ » рис. 3, це – розрахунок поточних значень всіх режимних показників при виконанні електроходом відповідних маневрів і визначення за його результатом гальмівного шляху судна – L_T (або витрат енергії на виконання маневру – W).

Для кожного конкретного електрохода при виконанні маневрених операцій оптимальні рішення будуть різними. Запропонований математичний апарат дає можливість знайти оптимальні параметри сигналів управління для досить великого класу суден. Для цього необхідно, по-перше, виявити ті безрозмірні параметри комплексу, які суттєво впливають на параметри сигналів управління. По-друге, для різних варіантів сполучення їх значень (по суті справи – для широкого класу електроходів) знайти оптимальні параметри сигналів управління, які забезпечать мінімальний гальмівний шлях електроходів L_{Tmin} , або мінімум витрат енергії на виконання маневру W_{min} .

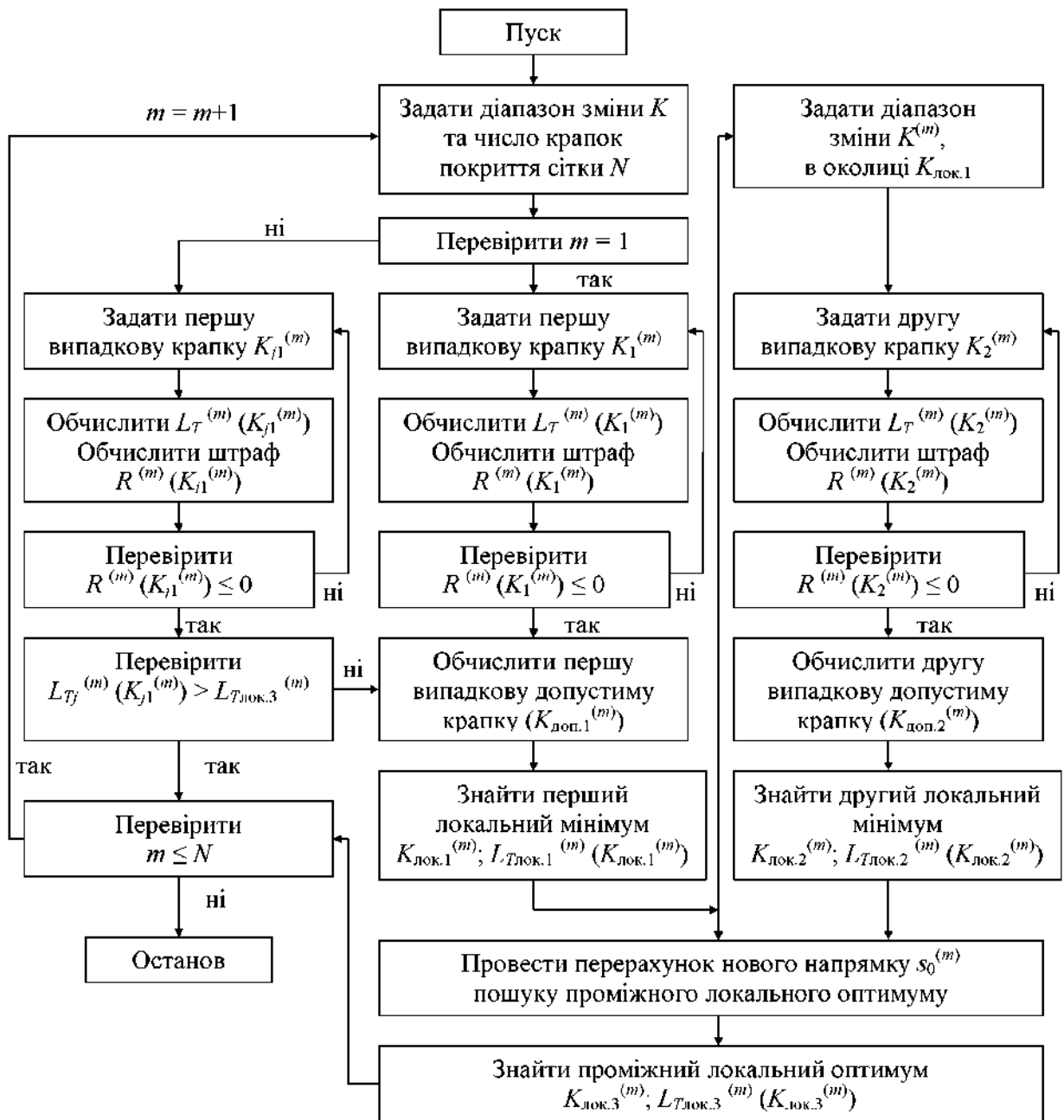


Рисунок 3 – Склад та послідовність операцій щодо пошуку глобального оптимуму

Нижче наведені результати оптимізації сигналів управління ГЕУ електроходів при реверсі. У табл. 1 були наведені безрозмірні параметри комплексу, які суттєво впливають на гальмівний шлях електрохода й вказаний їх внесок. У табл. 2 наведена невелика частина (для приклада) можливих сполучень найбільш значимих параметрів – N_X , C_{M18} , C_{M20} та швидкості руху судна v . Різні сполучення параметрів – це, по суті справи, різні електроходи. Проведені серії оптимізаційних розрахунків. У табл. 2 наведені їх результати.

Таблиця 2 – 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
...
27	0,21	72	0,97	0,332	0,656	5,886	1,365	0,192	0,745	0,258	22,3

Оптимальні рішення – це оптимальні значення параметрів K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 при початковій швидкості електрохода $v_{prim} = 0,3$ й відповідні значення гальмівного шляху електрохода. (Мінімальний гальмівний шлях сприяє безпеці маневрених операцій).

Тут же, у табл. 2, для оцінки ефективності проведених оптимізаційних розрахунків, наведені значення критерію L_{Tmin} , які були б отримані при управлінні по «класичному» варіанту, який традиційно рекомендується для гребних електроприводів – $\gamma / \alpha = const$. Ці значення наведені у стовбці $L_{Tclassic}$. Порівняння отриманих результатів (див. останню графу табл. 2) наочно демонструє ефективність використання оптимального управління. Результати оптимізації зручно представити в графічному вигляді. Як приклад, на рис. 4 наведені залежності $\alpha = \alpha(T)$, $\gamma = \gamma(T)$ і $\gamma = \gamma(\alpha)$ для перших трьох варіантів сполучення параметрів (для трьох електроходів) з табл. 2.

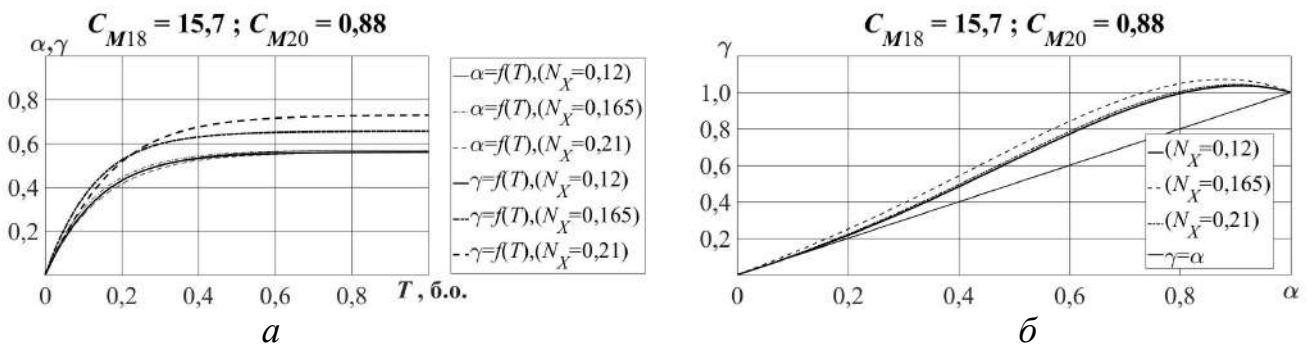


Рисунок 4 – Залежності за критерієм мінімуму L_{Tmin} при $v_{prim} = 0,3$:
 $a - \alpha = \alpha(T), \gamma = \gamma(T)$; $б - \gamma = \gamma(\alpha)$

Аналіз результатів розрахунків показує, що перехід до оптимального (по L_{Tmin}) управління дозволяє істотно скоротити гальмівний шлях електрохода. Залежно від конкретного судна (від конкретних сполучень параметрів комплексу) це скорочення перебуває в діапазоні від 15 % до 27 %.

Отримані результати (в аналітичному вигляді – оптимальні параметри сигналів управління $\alpha = \alpha(T)$ і $\gamma = \gamma(\alpha)$, які надані у табл. 2, і в графічній їх інтерпретації – рис. 4) дозволяють для будь-якого електрохода розглянутого класу призначити параметри сигналів управління гребними електричними установками, які забезпечують виконання маневру «реверс» з мінімальним гальмівним шляхом. Аналогічні результати отримані й для інших значень початкової швидкості руху електрохода v_{prim} та для іншого критерію оптимальності W_{min} .

Циркуляція. При спільному маневруванні кермом і гвинтами суттєво поліпшується поворотність судна. Але з іншого боку – істотно змінюються навантаження на ГЕЕУ. При правильній організації управління можна домогтися найкращих значень показників якості виконання маневру й одночасно з цим забезпечити роботу всіх елементів ГЕЕУ в припустимих режимах.

Розглядався початковий її етап – відворот, коли кут курсу судна стає рівним 90° від початкового. У якості критерію оптимальності обраний мінімум витрат енергії при відвороті – W_{Cmin} . Управління здійснювалося перекладкою керма на один з бортів з одночасним підгальмовуванням одного з гребних електродвигунів (наприклад – правого). Із двох рівнянь (24), (25) 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 α_R теж постійна, але зменшується на початку маневру і визначається новим положенням рукоятки ПУ (ступенем підгальмовування). На критерій 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 перекладки пера керма.

У табл. 3, в якості приклада, наведена невелика кількість сполучень α_L , α_R , N_X , β_R й оптимальні рішення, щодо забезпечення мінімуму витрат енергії для виконання маневру при початковій швидкості судна $v_{prim} = 1,0$ та $v_{prim} = 0,8$.

Таблиця 3 – Поєднання значимих параметрів комплексу й оптимальні рішення за критерієм мінімуму витрат енергії W_{Cmin} при виході судна на циркуляцію (етап відвороту)

Вар-т	Значення значимих параметрів, в.о.					$W_{Cclassic}$, 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	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	9,35	28,94
...
14	0,8	0,8	0,65	0,16	0,4	11,0	3,47	-0,089	1,34	7,93	27,91
15	0,8	0,8	0,55	0,16	0,4	9,7	3,27	-2,67	1,21	6,88	29,07
...
27	0,8	0,8	0,55	0,21	0,576	8,02	3,2	-2,57	1,26	5,71	28,8

На рис. 5 показані графічні інтерпретації сигналів управління виду (25) з оптимальними параметрами. В останньому стовпці таблиці показана ефективність оптимізації. Вона коливається від 3 % до 29 %. Менша ефективність відповідає руху судна з більшою, а вища – з меншою швидкістю й максимальним підгальмовуванням. Як видно з табл.3 (останній стовпець), перехід до оптимального управління суттєво знижує витрати енергії W_C на виконання маневру, що підтверджує його доцільність.

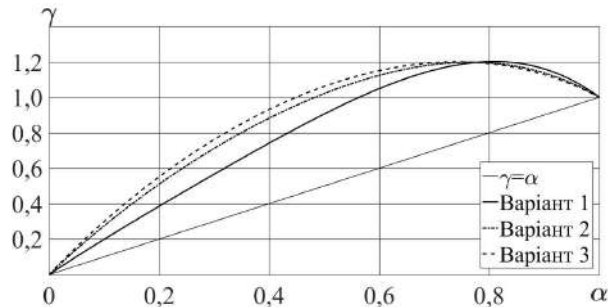


Рисунок 5 – Залежність $\gamma = \gamma(\alpha)$ за критерієм мінімуму W_{Cmin} для варіантів № 1 – № 3 з табл. 3

Оптимізація управління проведена також і для інших маневрів. Для них виявлені безрозмірні параметри, які суттєво впливають на показники якості маневрування та для різних сполучень їх значень знайдені оптимальні рішення.

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 перевищують 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 (ДСТУ ISO 8528-5: 2005) під час маневрів.

Для аналізу взаємного впливу системи електроруку й загальносуднових споживачів, генераторні агрегати представлені одним «еквівалентним» генераторним агрегатом. Встановлено, що доля потужності (і відповідно струму) пропульсивних електродвигунів у більшості електроходів складає 50 % – 83 % від сумарної потужності джерел електроенергії. Сумарний струм «еквівалентного» генератора

$$I_{Geq} = K_{IM} (I_{M1} + I_{M2}) + K_{Isc} \sum I_{SC} = K_{IM} \sum I_M + K_{Isc} \sum I_{SC}, \quad (26)$$

де K_{IM} і K_{Isc} – коефіцієнти, які встановлюють долю струму системи електроруку та долю сумарного струму суднових споживачів у загальному струмі «еквівалентного» генератора; I_{M1} і I_{M2} – струми ГЕД правого та лівого контуру відповідно; $\sum I_{SC}$ – сумарний струм суднових споживачів.

Розглядався найбільш важкий режим – реверс електрохода до повної його зупинки. В момент переходу у частотно-керований етап реверса стрибкоподібно змінювалося сумарне навантаження суднових споживачів: скидалося й накидалося.

Аналіз результатів розрахунків показав: скидання навантаження практично не впливає на оптимальні рішення, при накиданні навантаження ступінь погіршення значення цільової функції залежить від співвідношення сумарних потужностей системи електроруху та загальносуднових споживачів і коливається в діапазоні від 3 % до 27 %. Причому, більші значення погіршень відповідають варіантам, де сумарний струм суднових споживачів у процентному співвідношенні вище.

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).

Таблиця 4 – 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_{de} , 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.

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 електроруху 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 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 «ХПИ». 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 «ХПИ». 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 межд. 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 *XII межд. 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.

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.

АННОТАЦИЯ

Черников П.С. Оптимальное управление гребными электроэнергетическими установками электроходов на маневрах. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.20 – Эксплуатация и ремонт средств транспорта. – Одесский национальный морской университет. – Одесса, 2019.

Диссертация посвящена поиску оптимальных параметров сигналов управления гребными электроэнергетическими установками (ГЭЭУ), которые обеспечивают наилучшие маневренные качества электроходов с единой судовой электроэнергетической системой.

Разработана математическая модель и метод расчета переходных режимов работы ГЭЭУ в составе судового пропульсивного комплекса. Найденны обобщенные безразмерные параметры комплекса. Вывявлены значимые параметры, которые существенно влияют на маневренные характеристики электроходов и на показатели качества работы ГЭЭУ при маневрировании. Предложен новый вид сигналов управления ГЭЭУ. Проанализировано и выявлено влияние на оптимальное управление изменения нагрузки судовой сети, и наоборот. Проведены оптимизационные расчеты и найдены оптимальные параметры сигналов управления ГЭЭУ на маневрах.

Достоверность основных результатов диссертационной работы подтверждается соответствием результатов математического моделирования с экспериментальными данными натурных испытаний.

Разработанные практические рекомендации по оптимальному управлению охватывают широкий класс судов с электродвижением. Они предназначены для использования в процессе эксплуатации электроходов.

Ключевые слова: гребные электроэнергетические установки; маневренные качества электроходов; оптимальное управление по показателям судна.

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.

Підписано до друку 17.01.19. Формат 60/84 1/16.
Папір офсетний. Ум. друк. арк. 0,9.
Замовл. № 8.Тираж 100 прим.

Надруковано у видавництві ОНМУ
65029, м. Одеса, вул. Мечникова, 34
тел. 728 31 14

Свідоцтво
про внесення суб'єкта видавничої справи
до державного реєстру видавців, виготівників
та розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 4242 від 26.12.11 р.