

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Чернікова Павла Сергійовича
«Оптимальне управління гребними електроенергетичними установками
електроходів на маневрах»

подану до захисту у спеціалізовану вчену раду Д 41.060.01
Одеського національного морського університету
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю

05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту

Актуальність теми дисертації, її зв'язок з державними науковими програмами

Тема дисертації актуальна. Історія розвитку суднової електроенергетики нерозривно пов'язана з удосконалюванням і впровадженням електроруху в теорію й практику передачі енергії від джерел (теплових двигунів) до гребних гвинтів. Початок цьому було покладено ще в 1838 р. Із цього часу частка електроходів у загальному обсязі суден, що перебувають в експлуатації, незмінно росте. Поряд з тими суднами, для яких електрорух традиційно є переважним, з'являється ряд інших, для яких він є перспективним.

Головним аргументом на користь електроруху виступає можливість максимального використання енергетичної установки для забезпечення руху судна та підвищення його маневреності. Саме маневреність електроходів є однією з основних якостей, що обумовила причину настільки високого інтересу до застосування сучасних систем електроруху на суднах. При цьому особлива увага приділяється питанням надійності й безпеки виконання маневрених операцій, що прямо сприяє підвищенню безпеки мореплавання.

Одним з сучасних варіантів побудови гребних електроенергетичних установок є система електроруху на базі асинхронних частотно-керованих гребних електродвигунів. У зв'язку із цим, досить актуальними є питання вдосконалення управління гребними електроенергетичними установками й асинхронними електродвигунами на маневрах. Причому, потреба в підвищенні ефективності сигналів управління й необхідність в оцінці маневрених властивостей електроходів виникає як на стадіях їх проектування, так і в процесі експлуатації суден.

На рішення важливої для морського флоту задачі – удосконалення способів управління гребними електроенергетичними установками суден з електрорухом на маневрах і спрямована розглянута робота. Дослідження 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

08 179 / К 02 19

інфраструктури України від 26 червня 2013 року № 426; “Морської доктрини України на період до 2035 року”, затвердженою постановою Кабінету Міністрів України від 7 жовтня 2009 року № 1307 (у редакції постанови Кабінету Міністрів України від 18 грудня 2018 року № 1108); схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність”, що затверджено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 року № 605-р.

Ступінь обґрунтованості наукових результатів, висновків і рекомендацій, їх вірогідність і новизна

1. Відповідно до поставленої мети, в основу своєї роботи автор цілком обґрунтовано закладає системний підхід. Тільки на його основі – розглядаючи гребну електроенергетичну установку як основне навантаження єдиної суднової електроенергетичної системи – можна оцінити вплив якості управління гребною електроенергетичною установкою на маневрені характеристики судна й знайти шляхи поліпшення маневреності електроходів. При цьому враховано, що у суден з єдиною електроенергетичною системою і загальносуднові споживачі електроенергії, і система електроруку отримують живлення від одних джерел електроенергії. Перехідні режими роботи в системі електроруку на маневрах впливають на параметри електроенергії суднової мережі, тобто на роботу загальносуднових споживачів. З урахуванням поставлених задач, ступенем їх складності і наявних протиріч, автором побудована структурна схема пропульсивного комплексу електрохода й розроблені математичні моделі перехідних режимів його роботи. Коректне, відповідно до розв'язуваних задач, застосування математичного апарату при дослідженні перехідних режимів і об'єктивне врахування взаємозв'язків всіх складових частин комплексу забезпечило авторові можливість проведення достовірної оцінки:

- впливу гребної електроенергетичної установки на маневрені якості електроходів і на параметри електроенергії суднової мережі;
- впливу параметрів руху судна на режимні показники електроенергетичної установки на маневрах.

2. Стосовно до електроходів з єдиною судною електроенергетичною системою раніше такий підхід не застосовувався, тому це положення дисертаційної роботи є новим.

3. Основні результати наукових досліджень проведені на базі розробленої в дисертації уточнених узагальнених математичних моделей перехідних режимів гребних електроенергетичних установок у складі пропульсивних комплексів електроходів. Маневрені режими роботи комплексів описані єдиною системою рівнянь, що охоплює більшість електроходів із традиційним приводом гребних гвинтів. Прийняті при побудові математичних моделей допущення й уточнення обґрунтовані. Розроблені моделі мають достатні наукову цінність і значущість. Обґрунтованість і вірогідність математичних моделей й, відповідно, отриманих результатів забезпечуються коректним математичним описом перехідних режимів і збігом результатів чисельного

моделювання з опублікованими даними натурних випробувань, виконаних іншими дослідниками.

4. З метою проведення широких наукових узагальнень, для можливості здійснення порівняльного аналізу маневрених властивостей електроходів з різними типами гребних електроенергетичних установок, автор розробив узагальнений метод розрахунку перехідних режимів роботи й спосіб оцінки показників якості маневрування електроходів. Обраний підхід цілком обґрунтований. Математичні моделі представлені в безрозмірних одиницях, виявлені узагальнені безрозмірні параметри пропульсивних комплексів електроходів, знайдені критерії їх динамічної подібності. Лише маючи уніфіковані методи аналізу, оперуючи єдиними критеріями якості оцінки перехідних режимів, тими самими безрозмірними параметрами пропульсивних комплексів і єдиних критеріїв динамічної подібності, можна проводити порівняльні оцінки маневрених характеристик різних типів електроходів і знаходити при цьому найкращі рішення.

5. Відмінною рисою математичних моделей є те, що рівняння, що їх описують, ставляться до категорії жорстких, що вносить відчутні труднощі в їх рішення. Автор обґрунтовано знайшов метод рішення системи рівнянь, що забезпечує потрібну точність при мінімальній тривалості розрахунків.

6. Для пропульсивних комплексів з єдиними електроенергетичними установками таких способів рішення раніше не існувало. Отримані результати є новими й важливими. Їх вірогідність забезпечена коректним використанням індуктивно-дедуктивного підходу при побудові математичних моделей й методів розрахунку, і підтверджена натурними випробуваннями.

7. Отримані автором критерії динамічної подібності є новими. Їх вірогідність забезпечена самими математичними моделями. Автор пропонує при аналізі маневрених режимів роботи оперувати саме цими безрозмірними параметрами й критеріями динамічної подібності. Комплекси з рівними значеннями параметрів мають однакові значення (у відносних одиницях) відповідних показників якості виконання маневрів. Такий підхід до аналізу маневрених властивостей електроходів цілком обґрунтований.

8. Досить трудомістким у роботі виявилось виявлення значущих параметрів пропульсивних комплексів електроходів. Це ті параметри, які істотно впливають на показники якості маневрування, роботи гребної електроенергетичної установки та електроенергії суднової мережі (Розділ 3). Не можна не погодитися з тим, що при багатофакторному аналізі (судновий пропульсивний комплекс – типовий приклад такого об'єкта) – це необхідний етап розрахунків. Такі завдання не стільки складні по своїй постановці, скільки наповнені не сприяючими формалізації етапами рішення й вимагають великої кількості допоміжних розрахунків. При рішенні кожного конкретного завдання, істотними, як правило, виявляються різні параметри. Від отриманих рішень багато в чому залежать майбутні витрати машинного часу і результати наступного аналізу. Вірогідність виявлених автором значущих параметрів і значимих ефектів їх взаємодій забезпечена обґрунтованим і коректним застосуванням методів відсіюючих експериментів, регресійного й дисперсійного аналізів. Отримані

результати обґрунтовано виділяють на фоні шумового поля істотні параметри й ефекти, окреслюючи тим самим коло параметрів, на яких варто зосередити увагу. Результати є новими.

9. Найбільш важким математичним завданням була розробка методів пошуку оптимальних рішень. Автором сформовані цільові функції оптимізаційних розрахунків. Чисельні значення цих цільових функцій відшукуються за результатами повного розрахунку виконуваного електроходом маневру. Це – розрахунки чисельних значень режимних показників комплексу по ходу виконання маневру. Мультимодальний характер цільових функцій безсумнівна. Стосовно до таких складних об'єктів, яким є судновий пропульсивний комплекс, практично всі реальні оптимізаційні задачі, будуть мати мультимодальний характер цільових функцій. У результаті детального дослідження їх характеру автором обґрунтована необхідність використання методів глобальної оптимізації, визначені раціональна структура й внутрішні процедури оптимізаційних розрахунків. Розроблено метод пошуку оптимальних рішень. Під час його розробці був уточнений метод пошуку глобальних оптимумів (введення процедури руху уздовж «ярів») і внесені доповнення в метод Нелдера-Міда, що дозволили істотно скоротити процедури пошуку оптимальних рішень за рахунок зміни форми багатогранника. Результати оригінальні й нові.

Доцільність і вірогідність запропонованих удосконалень у процедурах оптимізаційних розрахунків підтверджена в дисертації рішенням задач пошуку оптимального управління гребними електроенергетичними установками електроходів на маневрах.

10. У роботі запропонований новий принцип формування сигналів управління гребними електроенергетичними установками із частотно-керованими електродвигунами. Автор обґрунтував той факт, що управління по загальноприйнятому класичному «пропорційному» закону не дозволяє повною мірою використовувати можливості гребної електроенергетичної установки для забезпечення високих маневрених властивостей електроходів. Із цим не можна погодитися. Адже дійсно, «пропорційне» управління використовується з метою забезпечення найкращих робочих параметрів електродвигунів. При системному принципі підходу до оцінки якості роботи електроенергетичних установок на маневрах, як критерії оцінки, варто вибирати в першу чергу показники судна. Інші показники якості повинні виступати в ролі обмежень. Автор підтвердив це відповідними розрахунками. Таким чином, доцільність переходу до нового способу управління обґрунтована.

Запропоновано відшукувати оптимальні параметри сигналів управління для кожного маневру окремо відповідно до цільових функцій. Доцільність переходу до такого управління проілюстрована порівняльним аналізом маневрених властивостей електроходів при управлінні гребними електроенергетичними установками за допомогою існуючого «класичного» і оптимального управління. Наведені результати достовірні й переконливі.

Аналіз впливу оптимального управління на основні показники якості електроенергії суднової мережі й впливу роботи суднових споживачів на оптимальні параметри сигналів управління показав, що для електроходів

розглянутого типу ці впливи перебувають у припустимих границях. Висновки достовірні.

11. Автор провів серії оптимізаційних розрахунків і знайшов оптимальні параметри сигналів управління при виконанні електроходами основних маневрів. Серії таблиць із оптимальними параметрами сигналів управління й графічних їх інтерпретацій отримані вперше. Вірогідність цих результатів підтверджена вірогідністю математичних моделей, методів розрахунку перехідних режимів роботи й методів пошуку оптимальних рішень. Ефективність оптимізації істотна. Результати охоплюють широкий клас електроходів і представляють наукову й практичну цінність.

Значимість роботи для науки й практики

Розроблені методи розрахунку й оптимізації можна кваліфікувати як нове значне досягнення в напрямку розвитку теоретичних основ аналізу режимів роботи й підвищення ефективності експлуатації суднових електроенергетичних систем. Вони сприяють побудові науково-обґрунтованих методів аналізу маневрених режимів роботи пропульсивних комплексів електроходів із гребними електроенергетичними установками на базі частотно-керованих електродвигунів. Використання системного підходу до оцінки маневрених властивостей електроходів дозволяє знаходити такі режими експлуатації електроенергетичних установок, які можуть забезпечити електроходам найкращі маневрені характеристики.

Отримані результати мають спільність. Вони прийнятні для великого класу суден із частотно-керованими гребними електродвигунами.

У роботі представлені практичні рекомендації з пошуку оптимального управління гребними електроенергетичними установками на маневрах. Для широкого класу суден знайдені оптимальні параметри сигналів управління. Ці результати призначені для використання в процесі експлуатації електроходів. Вони можуть представляти інтерес і на початкових стадіях проектування електроенергетичних установок. Цінність результатів висока.

Повнота викладу основних результатів дисертації, відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації

Основні результати роботи відображено в 8 публікаціях у спеціалізованих збірниках наукових праць і наукових журналах, що входять до переліку рекомендованих ВАК України (у тому числі, 4 – у наукових виданнях, які входять до переліку міжнародних наукометричних баз, з їх 2 – у наукових виданнях, які входять до наукометричної бази Web of Science); в 8 доповідях, що опубліковані як тези праць міжнародних наукових конференцій. У цих працях представлені наукова новизна й практична значимість роботи.

Загальна кількість наукових праць, представлених у «Списку публікацій здобувача» – 16.

Всі основні результати, отримані в роботі, досить повно викладені в публікаціях.

Автореферат відповідає основному змісту дисертації. У ньому немає

положень, висновків, рекомендацій, відсутніх у дисертаційній роботі.

Зауваження по дисертаційній роботі

З основних зауважень слід зазначити наступні:

1. Математичний опис перетворювача електроенергії надано автором з рядом припущень, не обґрунтувавши їх належним чином, що спрощують опис. У результаті залежність між вхідною й вихідною напругами вийшла занадто спрощеною.

2. Рівняння перехідних процесів у частотно-керованих гребних двигунах (2.39) – (2.42) (стор. 45) представлені в незвичайній формі. Настільки ж незвичайно й необґрунтовано представлені безрозмірні коефіцієнти $C_{M17} - C_{M25}$. Яка необхідність введення цих коефіцієнтів, якщо в їх склад входять відомі параметри частотно-керованих електродвигунів, такі як b_M, c_M, d_M, e_M ? Крім того, до складу коефіцієнтів C_{M24} і C_{M25} входять все ті ж параметри $C_{M17} - C_{M23}$. Автору слід було привести досить вагомі аргументи для цієї підстави.

3. Момент опору й упор гребного гвинта описуються поліномами (2.62) і (2.63) (стор. 48). Незрозуміло яким чином у них врахована взаємодія гребних гвинтів з корпусом судна.

4. Вибір показників якості $P_{Dm}, I_{Gacc}, M_{Macc}, I_{Macc}, I_{Mrev}$ (стор. 62 – 63) невдалий, оскільки кидки потужності, струму й крутного моменту оцінені щодо сталих значень відповідних показників. Доцільно було оцінювати динамічні показники якості роботи гребної електроенергетичної установки щодо номінальних їх значень. Це дало б більш наочну картину перехідних процесів на маневрах.

5. У розділі 3 запропоновано оцінювати показники якості за допомогою поліноміальних моделей (3.34) – (3.48) (стор.78), що представляють залежності показників від безрозмірних параметрів комплексів. Виникають серйозні незручності у визначенні значень цих параметрів. По-перше, це не конкретні конструктивні параметри комплексу, а деякі умовні їх з'єднання. По-друге, вони повинні бути піддані нормуванню. Для практичного застосування моделей їх варто було б спростити.

6. При побудові алгоритмів оптимізаційних розрахунків автор керувався тим, що цільові функції, як він сам це затверджує, мають вигляд крутих «ярів». Крім того, у процедуру оптимізаційних розрахунків він включив метод штрафних функцій. Однак відомо, що в таких випадках штрафні функції поблизу оптимумів самі починають здобувати «яружний» характер. Залишається питання, яким чином відшукувалися оптимальні рішення, якщо штрафні функції поблизу оптимумів погано обумовлені?

7. У дисертації знайдені оптимальні параметри сигналів управління гребними електроенергетичними установками під час реверсу й при виході електрохода на циркуляцію. Однак це аж ніяк не все, що виконують електроходи в процесі маневрених операцій. Залишається незрозумілим, якою мірою знайдені сигнали оптимального управління можуть бути застосовані до інших маневрів, наприклад під час роботи на упорі, або, як кажуть – «на стінку».

8. У розділі 4 автор знайшов оптимальні параметри сигналів управління,

які забезпечують мінімальний гальмівний шлях електрохода й оптимальні параметри, що забезпечують мінімальні витрати енергії на виконання маневру. Враховуючи наведену оцінку ефективності оптимізації, це, безсумнівно, важливий результат. Але із практичної точки зору куди важливіше був би якийсь компромісний варіант управління. В експлуатаційних умовах мало часу, щоб вибирати критерій якості й переходити від одного закону оптимального управління до іншого.

9. Дослідженню впливу зміни навантаження суднової мережі на оптимальне управління й впливу оптимального управління на параметри електроенергії суднової мережі приділена недостатня увага. Отримані результати тільки підтверджують необхідність врахування впливу зміни навантаження на пошук оптимальних рішень і дають механізм їх відшукування. Варто було б розробити конкретні практичні рекомендації з управління гребною електроенергетичною установкою в таких умовах.

10. Перелік умовних позначень, з одного боку, недостатньо повний, а з іншого має позначення, які є дублюючими, наприклад: ГЕУ і ГЕЕУ – по суті, є одним й тим самим. В тексті дисертації (стор. 24) автор вводить поняття статичного перетворювача частоти (СПЧ), який далі у тексті ніде більш не згадується, а на рис. 2.1 (стор. 35) застосовує скорочення *SE* – частотні перетворювачі електроенергії, хоча на сьогодні існує більш відоме міжнародне позначення подібних елементів – *Frequency Converter (FC)*. Не зрозуміло, чому автор не приділив уваги перетворювачам частоти з автономними інверторами струму (AIC) і безпосередні перетворювачі частоти, або – циклоконвертори?

11. Фраза «гвинто-кермовими гідродинамічними комплексами типу *Azipod*» (стор. 23) є товтологічною, оскільки назва *Azipod* є брендом фірми *ABB* для позначення саме «гвинто-кермових гідродинамічних комплексів».

12. Деякі графічні матеріали занадто перевантажені кривими низької якості, що описують зміну режимних показників у часі. Це, зокрема, ставиться до рис. 2.5 (стор. 56), рис. 3.1 (стор. 65). Те ж саме стосується й рис. 2 автореферату. Таке накопичення кривих ускладнює роботу з ілюстративним матеріалом. Інформацію, наведену на них варто було б рознести по декількох рисунках.

13. В тексті дисертації не зайвим був би рисунок у 3-мірному просторі, який наочно демонструє характер цільових функцій.

14. Таблицю 1 автореферату слід було назвати «Внески безрозмірних параметрів й ефектів їх взаємодії», а легенду рисунка 4 автореферату слід було зробити більш чіткою, а сам рисунок збільшити.

15. У тексті подекуди присутні орфографічні помилка, наприклад, при описі початкового етапу циркуляції на сторінці 18 автореферату: замість «... в началі», слід писати «...на початку».

Загальний висновок по дисертаційній роботі

Незважаючи на наведені зауваження, загальна оцінка роботи – позитивна.

Аналізуючи зміст дисертаційної роботи в цілому, можливо відзначити наступне:

1. Розроблені методи розрахунку й оптимізації маневрених режимів роботи гребних електроенергетичних установок електроходів підпорядковані системному

принципу й охоплюють більшу частину електроходів із традиційним типом привода гребних гвинтів. Отримані результати можна кваліфікувати як істотне досягнення в розвитку суднової електроенергетики.

2. Дисертація являє собою самостійну роботу, що має чітку кінцеву практичну мету, характеризується внутрішньою єдністю й логічною послідовністю рішення задач. У ній вирішена важлива для морського флоту прикладна задача.

3. Основні положення дисертації опубліковані в 16 наукових працях у спеціальних виданнях.

4. Постановка мети й задач дослідження, вибір шляхів їх рішення, аналіз і узагальнення отриманих результатів, висновки й рекомендації належать авторові.

5. Публікації й апробації роботи на науково-технічних конференціях різного рівня свідчать про істотний особистий внесок автора в технічні науки за спеціальністю 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту.

6. Результати є новими. Цінність результатів висока.

7. Робота **відповідає** вимогам до кандидатських дисертацій за спеціальністю 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту, а її автор – Черніков Павло Сергійович, у відповідності до п.п. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук.

Офіційний опонент:

декан Факультету електромеханіки
і радіоелектроніки Національного університету
«Одеська морська академія»,
доктор технічних наук, доцент



Будашко В. В.

Підпис Будашко В. В. засвідчую
Вчений секретар Щабельська І.О.

