

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет “Одеська морська академія”

Будашко Віталій Віталійович



УДК 629.56.064.5+620.9+629.5

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ
СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК
КОМБІНОВАНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ**

Спеціальність 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

Галузь знань 0701 – транспорт і транспортна інфраструктура

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Одеса – 2017

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті "Одеська морська академія" Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: Онищенко Олег Анатолійович,
доктор технічних наук, професор,
Національний університет «Одеська морська академія»,
професор кафедри технічної експлуатації флоту.

Офіційні опоненти: Вичужанін Володимир Вікторович,
доктор технічних наук, професор,
Одеський національний морський університет,
завідувач кафедри інформаційних технологій;

Мойсеєнко Валентин Іванович,
доктор технічних наук, професор,
Український державний університет залізничного
транспорту,
завідувач кафедри спеціалізованих комп'ютерних
систем;

Рожков Сергій Олександрович,
доктор технічних наук, професор,
Херсонська державна морська академія,
завідувач кафедри експлуатації суднового
електрообладнання і засобів автоматики.

Захист відбудеться 21 грудня 2017 р. о 10-й годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.106.01 в Національному університеті "Одеська морська академія" за адресою: 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона 8, корп. 1, зал засідань Вченої ради.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету "Одеська морська академія" за адресою: м. Одеса, вул. Дідріхсона 8, корп. 2, та за електронною адресою:

<http://onma.edu.ua/spetsializovana-vchena-rada-d-41-106-01>

Автореферат розісланий 20 листопада 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
д.т.н., професор



Нікольський В. В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розробка прибережного шельфу (добуток природних копалин, будівництво вітряних та приливних електростанцій, пелагічне рибальство тощо) передбачає розвиток високотехнологічних наукомістких галузей морської індустрії, які передбачають будівництво та експлуатацію суден для забезпечення розвідувально-бурових, підйомно-транспортних та вантажно-розвантажувальних робіт в різних експлуатаційних умовах (так званий **офшорний флот**). Подібні судна обладнаються інноваційними комбінованими пропульсивними комплексами (КПК) із судновими енергетичними установками (СЕУ), які будуються за принципом **єдиних електроенергетичних систем**.

Проблеми підвищення енергоефективності, викликані дефіцитом енергоресурсів і прагненням до поліпшення екологічних показників СЕУ КПК, лежать в основі вимог, встановлених Міжнародною морською організацією (*International Maritime Organization*) в **Додатку VI** до Міжнародної конвенції по запобіганню забруднення з суден (МАРПОЛ) щодо конструктивного коефіцієнту енергоефективності (ККЕЕ) (англ. *Energy Efficiency Design Index – EEDI*) та експлуатаційного коефіцієнту енергоефективності (ЕКЕЕ) (англ. *Energy Efficiency Operational Index – EEOI*) у рамках розробки і виконання плану управління енергоефективністю судна (ПУЕЕС) (англ. *Ship Energy Efficiency Management Plan – SEEMP*) в процесі підвищення ефективності функціонування та експлуатації.

Таким чином, можна сформулювати **актуальну науково-технічну проблему** у галузі розвитку транспорту, транспортних технологій і відповідної інфраструктури: дослідження, розробка і прогнозування методів удосконалення експлуатаційних характеристик СЕУ КПК, які б забезпечували підвищення ефективності їх функціонування **неможливо** без встановлення закономірностей змінювання параметрів та впровадження методів і засобів діагностування та прогнозування технічного стану СЕУ КПК в процесі експлуатації.

З іншого боку, розробка стратегій, методів і засобів підвищення ефективності функціонування СЕУ КПК обмежені істотним комплексом **суперечливих, конфліктних**, а іноді і **взаємовиключних** факторів і ситуацій: необхідністю аналізу експлуатації СЕУ КПК під час розвідувально-бурових, підйомно-транспортних та вантажно-розвантажувальних робіт в різних експлуатаційних умовах; потребою у аналізі процесів на перетинах енергетичних потоків у СЕУ і КПК з підрулюючими пристроями (ПП) та відсутністю методів реєстрації деградаційних ефектів, які суттєво впливають на ці процеси; необхідністю удосконалення методів обчислювальної гідродинаміки для відстежування деградаційних ефектів на лініях потоків гребних гвинтів та відсутністю фізичних моделей реєстраційних компонентів системи моніторингу деградаційних ефектів на лініях валопроводів; необхідністю синтезу математичних моделей всережимних регуляторів оборотів ПП із одночасним удосконаленням математичного апарату при моделюванні енергетичних процесів в СЕУ КПК в різних експлуатацій-

них режимах; формулюванням і об'єднанням критеріїв вибору рішень, заснованих на множині як самих СЕУ КПК так і експлуатаційних режимів у яких вони працюють та відсутністю формалізованих фізичних моделей багатофункціональних КПК з урахуванням ситуаційних факторів довкілля і ідентифікаційних чинників експлуатаційних режимів; затребуваністю у стратегіях управління розподілом потужності в СЕУ КПК та відсутністю методології створення математичних моделей суднових електроенергетичних систем (СЕЕС) з багатоштинними конструкціями, що враховують гідродинамічні властивості судна з можливістю оцінки їх впливу на енергетичні процеси; розробкою технології реалізації СППР СЕУ КПК та наявністю інтелектуальних, поведінкових і когнітивних обмежень людини, що приймає рішення (ЛПР).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота спрямована на реалізацію [Транспортної стратегії](#) України до 2020 року (розпорядження Кабінету Міністрів України №2174-р від 20 жовтня 2010 року) та проводилася у рамках держбюджетних науково-дослідницьких робіт (НДР) Національного університету «Одеська морська академія». Автор був керівником НДР «Концепції, технології та напрямки удосконалення суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів», державний реєстраційний номер 0114U000340 (2014 – 2017 рр.), виконавцем розділу «Концептуалізація розвитку науково-прикладних досліджень у галузі суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів» НДР «Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології», державний реєстраційний номер 0114U000346 (2014 – 2017 рр.) та є виконавцем розділу «Розробка алгоритмів та програмування моделей технологічно-організаційних процесів системи моніторингу ефекту відхилення потоку рідини» НДР «Автоматизація технологічних та адміністративних процесів на транспорті», державний реєстраційний номер 0115U003577 (2015 – 2018 рр.).

Мета та завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розвиток теорії, методології та технології у галузі підвищення ефективності функціонування суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів. Для досягнення визначеної мети у дисертаційній роботі сформульована комплексна задача розробки системи підтримки прийняття рішень ([СППР](#)) для проектування, дослідження і удосконалення СЕУ [КПК](#), яка складається з трьох головних задач: розробки системи моніторингу деградаційних ефектів на лініях гребних потоків рушіїв із ідентифікацією відповідних маркерів, розробки стратегії всережимних регуляторів потужністю, моментом та частотою обертання електродвигунами [ПП](#) КПК і розробки методології побудови багатокритеріальних стратегій управління розподілом потужності СЕУ КПК.

Для вирішення комплексної та головних задач у роботі сформульовано та вирішено наступні завдання: провести аналіз ресурсозберігаючих екологічно чистих технологій проектування та будівництва сучасних СЕУ [КПК](#) та визначення факторів, пов'язаних з енергоефективністю, як основними показниками

якості функціонування СЕУ КПК; визначити шляхи удосконалення проектних рішень гнучких багатофункціональних електроенергетичні систем, які інтегруються у гібридні СЕУ КПК в якості невід'ємної складової із проведенням параметризації пропульсивних і енергетичних характеристик СЕУ КПК в залежності від зміни експлуатаційних режимів, гідродинамічних характеристик і умов довкілля; визначення ймовірно-статистичних параметрів розподілів навантажень у СЕУ КПК для забезпечення підвищення ефективності передачі потужності, надійності та міцності їх елементів; формалізація принципу декомпозиції енергетичних процесів у експлуатаційному режимі по ситуаційним чинникам; визначення принципів систематизації рівнянь технологічних процесів в систему диференціальних рівнянь з коефіцієнтами, залежними від коливань КПК; визначення принципів формування управління інваріантного до збурення по моменту ПП СЕУ КПК з урахуванням ситуаційних чинників експлуатаційного режиму; визначення показників якості багатоконтурних систем управління активними засобами утримання суден у заданому експлуатаційному режимі; удосконалення системи контролю та управління енергетичними процесами у СЕУ КПК із застосуванням альтернативних джерел енергії; обґрунтування типу і характеристик СЕУ КПК у проектах модернізації суден з декількома експлуатаційними режимами; дослідження ефективності функціонування СЕУ КПК при різних режимах управління ПП; об'єднання експертних систем при проектуванні СЕУ КПК; постановка і декомпозиція задач при зазначенні граничних умов і критеріїв; підтримка функціональної відповідності процесів задачам проектування.

Об'єктом дослідження є процеси передачі потужностей в СЕУ КПК у рамках створення СППР, призначених для їх проектування, дослідження і експлуатації.

Предметом дослідження є сукупність теоретико-методологічних, проектних і прикладних положень створення систем підтримки прийняття рішень, призначених для підвищення ефективності функціонування СЕУ КПК.

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

Дані, отримані в результаті експериментальних досліджень, і теоретичні результати зіставлені з чисельними рішеннями. Це зіставлення підтвердило до-

стовірність результатів, одержаного за допомогою створеної системи підтримки прийняття рішень.

Інформаційну базу дослідження становлять наукові праці вітчизняних і зарубіжних вчених у галузі експлуатації та ремонту засобів транспорту, підвищення показників енергоефективності тощо; нормативні документи міжнародної морської організації; технічні матеріали сесій Міжнародної конференції опитових басейнів (МКОБ); рейсові випробувальні протоколи; статистичні дані науково-дослідних установ; періодичні видання; інтернет-ресурси.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що компенсація впливу гідропротупливних деградаційних ефектів на процеси передачі потужності від енергетичної установки до рушіїв комбінованих протупливних комплексів призводить до збільшення експлуатаційних коефіцієнтів енергоефективності, що свідчить про мінімізацію невідворотних втрат на перетинах енергетичних потоків і підвищення ефективності функціонування СЕУ КПК. При цьому, в результаті вирішення головних і допоміжних задач, сформульовано наступні наукові положення:

- компенсація деградаційних ефектів від взаємодії потоків гребних гвинтів між собою і корпусом КПК досягається застосуванням п'єзоелектричних датчиків на лініях валопроводів азимутальних ПП із подальшим та розрахунком силових потоків від азимутальних рушіїв у вигляді диска силового приводу, що дозволяє ідентифікувати турбулентні області із відносними коефіцієнтами вихрової в'язкості μ_t/μ_w , складових x -швидкостей на перетині потоку гвинта вздовж осі обертання із розмірами в одиницях діаметра гвинта D_p , що дозволяє реалізувати метод обчислювальної гідродинаміки поверхнево-орієнтованого усереднення рівняння Рейнольдса Нав'є–Стокса для масообміну на кордоні розділу фаз;

- обмеження за потужністю і моментом на валу ПП СЕУ КПК суден, що динамічно позиціонують, забезпечується перерозподілом упорів між ПП або зменшенням граничного навантаження у складі алгоритму розподілу тяги системи DP за рахунок застосування стратегії всережимних регуляторів оборотів залежно від експлуатаційних умов;

- ефективний розподіл потужностей між альтернативними генеруючими елементами (АГЕ), системою накопичення енергії (СНЕ), судновою електроенергетичною системою (СЕЕС) та іншими складовими СЕУ під час зміни експлуатаційних режимів забезпечується удосконаленням стратегії керування гібридними СЕУ КПК за критерієм мінімуму споживання електроенергії або за критерієм максимуму отримання альтернативної енергії із регулюванням ступеню заряду батарей СНЕ;

- когнітивний (у синергізмі з інженерним) науково-дослідницький процес розробки системи підтримки прийняття рішень (СППР) досягається шляхом удосконалення плану управління енергоефективністю судна (ПУЕЕС) методом взаємної імплементації характеристичних просторових векторів енергетичних процесів у СЕУ і гідродинамічних у КПК із імплементацією ідентифікаційних

маркерів взаємно-впливаючих суднових технологій та застосуванням інтегрального критерію ефективності, що забезпечує підвищення ефективності функціонування СЕУ КПК при варіюванні будь-яких істотних параметрів останніх.

Також були отримані наступні наукові результати, вперше:

- синтезовано трирівневу багатокритеріальну стратегію управління розподілом енергії у гібридній СЕУ КПК шляхом інтеграції класичної стратегії управління розподілом потужності зі стратегією із контролем за станом СОДГ і ступенем заряду АГЕ СНЕ, яка відрізняється від існуючих вищою швидкістю виявлення ризику знеструмлення СЕЕС, більшою надійністю і точністю визначення необхідності зниження навантаження та є повністю інтегрованою із все-режимними регуляторами частоти обертання ПП і системою електроживлення;

- розроблено СППР для автоматизації і комп'ютеризації процесів проектування, дослідження і експлуатації СЕУ КПК, яка заснована на теоретичних, розрахункових і експериментальних результатах та дозволяє впроваджувати всебічне обґрунтовування, перевірку і самотестування розроблених складових методологічного і математичного апарату;

- побудовано фізичну модель багато-функціонального КПК, яка відрізняється змінною структурою, що дозволяє у синергізмі із розробленою СППР багаторазовий аналіз структур СЕУ і КПК при мінімальних вихідних даних;

- встановлено закон пульсацій упорів на лініях валів гребних гвинтів протилежного обертання (ГПО, CRP) в умовах їх взаємодії між собою і корпусом КПК, що дозволило виявити наступне: 1) поворот корпусу ПП призводить до появи характерних рециркуляційних зон та зміни полів швидкості у її диску та відрізняється підвищеним ступенем неоднорідності потоку; 2) характеристики упору і моменту ПП істотно відрізняються в залежності від напрямку повороту; 3) пульсації упору гребного гвинта азимутального ПП різко збільшуються при його повороті, при чому найбільш істотно зростання пульсацій відбувається на резонансних частотах взаємодії потоків гвинта азимутального ПП і нерухомого;

- розроблено принцип формування інваріантного до збурення керування моментом ПП СЕУ КПК з урахуванням ситуаційних чинників експлуатаційного режиму, який відрізняється від відомих врахуванням обмежень по потужності і моменту на валу, що дозволило удосконалити стратегію управління ПП та експериментальні методи дослідження ефективності функціонування СЕУ КПК;

- розроблено спрощену напівемпіричну методику ітераційної прогресивно-регресивної параметризації СЕУ КПК на непроектних режимах експлуатації, яка узагальнює відомі раніше співвідношення для упорів і моментів співвісних гребних ГПО в однорідному потоці зі співвідношеннями, що відомі із теорії турбомашин для випадку взаємодії потоків нерухомого гвинта і гвинта азимутального ПП;

- розроблено розрахунковий метод, що дозволяє із достатньою точністю оцінювати значення упорів і моментів рушіїв азимутального ПП в широкому

діапазоні експлуатаційних режимів і кутів відхилення потоків внаслідок дії деградаційних ефектів, істотно відмінних від проектних.

Набули подальшого розвитку:

- теоретичні методи підвищення ефективності експлуатації СЕУ КПК, застосування яких, на підставі розроблених математичних моделей, передавальних функцій і блок-схем замкнених систем регулювання частоти обертання, моменту і потужності ПП, дозволило системно знизити динамічні навантаження на виконавчі механізми і обладнання взаємо-впливаючих технологічних процесів на судні, яке перебуває в умовах нестабільності роботи гвинта і впливу довкілля;

- теорія нестационарної взаємодії кількох гребних гвинтів між собою, що дозволило встановити такі факти: 1) поворот ПП призводить до зростання аксіальних і тангенціальних складових упорів і моментів; 2) експлуатація **азимутального ПП** при великих кутах по відношенню до нерухомого гвинта призводить до виникнення на балері ПП значних навантажень, які можуть бути визначальними з точки зору міцності конструкційних складових ПП, наявність деформацій яких експериментально встановлено і підтверджено розрахунковим шляхом;

- теоретичні та експериментальні методи визначення залежностей упорів і моментів азимутального ПП в результаті взаємодії потоку гребного гвинта з корпусом і балером, які відрізняються застосуванням п'єзоелектричних датчиків, що дозволило ідентифікувати деградаційні ефекти на лініях гребних потоків;

- методологія розрахунку проектних і експлуатаційних коефіцієнтів енергоефективності за рахунок введення коефіцієнту доступності компенсації деградаційних ефектів, що дозволяє закладати у проектні рішення енергозаощаджувальні технології.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблені розрахункові методи дозволяють обирати конструкцію азимутального ПП з урахуванням можливих ризиків виникнення деградаційних ефектів, а зіставлення з експериментом дозволяє детально узгоджувати розрахунки з експериментальними даними;

- удосконалений метод обчислювальної гідродинаміки дозволив враховувати реальну форму азимутального ПП, збільшити кількість перетинів вимірювань та повноцінно проаналізувати ефективність запропонованих методів боротьби з вищевказаними деградаційними ефектами;

- встановлені явища і факти дозволяють удосконалювати тактико-технічні та експлуатаційні характеристики СЕУ **КПК**, а також підвищувати ефективність контролю їх технічного стану;

- отримані загальні співвідношення для частот пульсацій упорів внаслідок виникнення деградаційних ефектів у випадку довільно розташованих гідродинамічно взаємодіючих між собою азимутальних ПП в умовах неоднорідного потоку, що набігає, дозволяють проведення попереднього проектувального роз-

рахунку параметрів СЕУ КПК з подальшим удосконаленням в залежності від певного експлуатаційного режиму;

– запропонована стратегія всережимного регулятору після новітніх технічних доробок механічних частин ПП дозволила мінімізувати вплив деградаційних ефектів на лініях валів, таких як поперечне поєднання потоків та послаблення останніх у наслідок, наприклад, ефекту Коанда. Отримані результати стали продовженням розробок у галузі створення інтелектуальних систем управління електроприводами ПП СЕУ КПК, які забезпечують стабілізацію їх параметрів у різних експлуатаційних умовах, зокрема у режимі *DP*, для досягнення мінімізації втрат енергії з одночасним поліпшенням гармонійного складу напруги суднової електроенергетичної системи;

– розроблена *СППР* дозволяє проектувати гнучкі багатофункціональні електроенергетичні системи, які інтегруються у гібридні СЕУ КПК в якості невід'ємної складової, а також проводити параметризацію пропульсивних і енергетичних характеристик СЕУ КПК в залежності від зміни експлуатаційних режимів, гідродинамічних характеристик і умов довкілля. Важливим є можливість ітераційної оптимізації параметрів СЕУ КПК, що дозволяє використовувати розроблений метод як засіб інтелектуального проектування, результатом застосування якого є вдосконалені експлуатаційні характеристики СЕУ КПК;

– розроблена *СППР* дозволяє поліпшувати енергетичну ефективність СЕУ КПК в експлуатаційних режимах та інтегрувати отримані результати у базу даних інших подібних *СППР* для забезпечення розробників і дослідників необхідною інформацією для створення нових концепцій СЕУ КПК або для модифікації існуючих;

– розроблена фізична модель багатофункціонального КПК дозволяє: 1) передбачати загальну кількість та тип ПП і гребних гвинтів, систему живлення електродвигунів із можливістю багаторазової зміни конструкції навіть при наявності мінімальних даних про існуючий проект; 2) проводити модернізацію різноманітних типів суден для їхньої адаптації до режиму динамічного позиціонування та синтезувати рекомендації розробникам ПП, контролерів керування та систем живлення для суден, працюючих у режимі динамічного позиціонування; 3) верифікацію налаштувань ПП, зокрема значень крокових відношень, коефіцієнтів упорів і розташування осей основних і допоміжних гребних гвинтів; 4) синтез *DMI*-моделей суден для заданих швидкостей обертання гребних гвинтів, тяги, крутного моменту і крокового відношення; 5) розрахунок коефіцієнтів тяги (упору) зі зміною взаємного розташування ПП відносно один одного та діаметральної площини судна; 6) кореляцію коефіцієнтів упорів до коефіцієнтів потужності та крокових коефіцієнтів гвинтів; 7) досліджування якісних та надійнісних показників СЕУ *КПК*, їх агрегатів на стадіях проектування конструкцій та технологій, виробництва і експлуатації, встановлювати закономірності змінювання параметрів технічного стану в процесі експлуатації; 8) впровадження методів і засобів діагностування та прогнозування технічного стану СЕУ КПК.

Обґрунтованість та достовірність результатів дослідження забезпечується:

– використанням сучасних положень теорії нестационарної взаємодії гребних гвинтів із використанням спеціалізованих методів граничних інтегральних рівнянь високого порядку, які забезпечують високу точність розрахунку обтікання корпусів ПП і КПК як асиметричних тіл потоками ідеальної рідини; розрахунку форми рециркуляційних зон за корпусом **азимутальних ПП**, що працюють у складі концепції **CRP Azipod®**, які враховують деградаційні ефекти на лініях гребних гвинтів;

– напівемпіричним способом оцінки характеристик гребних гвинтів і елементів КПК на непроекtnих експлуатаційних режимах, а також методами розрахунку взаємодії азимутального ПП із стаціонарним гребним гвинтом, що включають а) використання принципу послідовних наближень, б) облік взаємовпливу елементів азимутального ПП через поля викликаних ними рециркуляційних зон;

– застосуванням положень теорії генерації електроенергії та електродинамічних процесів, як інструмента розширення предметної області модельних та експериментальних досліджень, що дозволяє розширювати можливості вирішення складних аналітичних завдань;

розробкою, плануванням та відповідною обробкою аналітичних, імітаційних та натурних експериментів;

– якісною та кількісною оцінкою відповідності розрахункових та експериментальних даних;

– узгодженням та використанням результатів досліджень на об'єктах, що експлуатуються і в документах наглядових органів.

Особистий внесок здобувача. У дисертаційній роботі викладено авторський підхід до вирішення важливої наукової проблеми – розробки теоретичних концепцій та надання практичних рекомендацій з підвищення ефективності функціонування суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів. Наукові положення, теоретичні визначення й науково-практичні рекомендації, подані в роботі та виносяться на захист, одержані автором особисто й викладені у його наукових працях. Із наукових праць, що написані у співавторстві, в дисертації використано тільки ідеї та концепції, які є результатом самостійного дослідження здобувача. Особистий внесок автора у колективних наукових працях конкретизовано у переліку опублікованих праць.

Апробація результатів дисертації. Основні результати наукових досліджень неодноразово доповідалися на ряді міжнародних та Всеукраїнських наукових з'їздах, конференціях, симпозиумах, нарадах, зокрема: на Всеукраїнській науково-технічній конференції з міжнародною участю “Проблеми автоматизації та електрообладнання транспортних засобів (ПАЕТЗ–2007) 21 – 23 травня 2007 р. у м. Миколаїв (НУК), на другій Міжнародній конференції «*Inductive modeling*» (ICIM 2008) 15 – 19 вересня 2008 р. у м. Київ, на XV міжнародній конференції по автоматичному управлінню (Автоматика–2008), 23 – 26 вересня

2008 р. у м. Одеса (ОНМА), на Науковій конференції професорсько-викладацького складу та курсантів «Сучасні проблеми суднової енергетики», 23 – 26 березня 2008 року у м. Одеса (ОНМА), на Міжнародній науковій конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту – *ISDMCI'2008*: Аналіз і моделювання складних систем і процесів 19 – 23 травня 2008 р. у м. Євпаторія (ХНТУ), на Міжнародній конференції «*Engine room simulators (ICERS12)* 19 – 20 листопада 2015 р. у м. Стамбул (*Istanbul Technical University, Maritime Faculty*), на Науково-методичній конференції «Актуальні питання суднової електротехніки і радіотехніки» 11 – 12 грудня 2013 р. у м. Одеса (ОНМА), на Міжнародній науковій конференції «Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта (*ISDMCI'2014*)» 28 – 31 травня 2014 р. у м. Херсон (ХНТУ), на III Всеукраїнській студентській науковій конференції «Сучасні проблеми морського транспорту та безпека мореплавства», 21 листопада 2013 р. у м. Херсон (ХДМА), на четвертій Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (*MINTT-2012*)» 29 – 31 травня 2012 р. у м. Херсон (ХДМА), на Першій науково-технічній конференції, присвяченої 90-річчю НУК ім. адмірала Макарова «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» 15 – 17 жовтня 2010 р. у м. Миколаїв (НУК), на другій Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (*MINTT-2010*)» 25 – 27 травня 2010 р. у м. Херсон (ХДМА), на IX Міжнародній науково-практичній конференції «Наука в информационном пространстве» 10 – 11 жовтня 2013 р. у м. Дніпропетровськ, на Науково-технічній конференції «Енергетика судна: експлуатація та ремонт» 26 – 28 березня 2014 р. у м. Одеса (ОНМА), на Міжнародній науково-технічній конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми» 13 – 14 листопада 2013 р. у м. Миколаїв (НУК), на восьмій Міжнародній конференції «*European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences*» 22 липня 2015 р. у м. Відень (Австрія), на Науково-технічній конференції «Енергетика судна: експлуатація та ремонт» 26 – 28 березня 2014 р. у м. Одеса (ОНМА), на Міжнародній науковій конференції «Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта (*ISDMCI'2014*)» 28 – 31 травня 2014 р. у м. Херсон (ХНТУ), на Науково-методичній конференції «Актуальні питання суднової електротехніки і радіоелектроніки», 15 – 16 грудня 2015 р. у м. Одеса (НУ ОМА), на Науково-методичній конференції «Актуальні питання суднової електротехніки і радіоелектроніки», 12 – 13 грудня 2016 р. у м. Одеса (НУ ОМА), на Науково-технічній конференції «Енергетика судна: експлуатація та ремонт» 26 – 28 березня 2017 р. у м. Одеса (НУ ОМА), на XV Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених і спеціалістів «Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації» 11 – 12 квітня 2017 р. у місті Кременчук (КрНУ).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 46 наукових праць (з яких 12 – одноосібні) загальним обсягом 44,4 друк. арк. (особи-

сто автору належить 26,17 друк. арк.), у тому числі одна колективна монографія загальним обсягом 18 друк. арк., 24 статті, в яких опубліковані основні наукові результати (з них 16 – у наукових періодичних виданнях інших держав та у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз) загальним обсягом 21,24 друк. арк., 21 праця апробаційного характеру загальним обсягом 11,25 друк. арк.

Обсяг і структура роботи. Дисертація складається з переліку умовних скорочень, списків рисунків і таблиць, анотації, вступу, шістьох розділів, висновків, предметного покажчика, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг роботи становить 422 сторінки, вона містить 15 таблиць на 13 сторінках і 107 рисунків на 83 сторінках. Список використаних джерел має 268 найменувань і викладений на 41 сторінці. Дисертація містить 12 додатків на 95 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У першому розділі «**Суднові енергетичні установки комбінованих пропульсивних комплексів: актуальні проблеми і стан розвитку науково-прикладних досліджень**» на підставі застосування дедуктивного методу інформаційного пошуку встановлено, що при проектуванні та будівництві сучасних СЕУ **КПК** ми маємо рахуватися з факторами, які пов'язані з енергоефективністю, як основними показниками якості функціонування СЕУ **КПК**.

На початковому етапі, в залежності від того рухається судно із якою швидкістю або працює у режимі динамічного позиціонування (**DP**) із кутом нищпорення визначено приблизну **схему** розрахунку коефіцієнтів енергоефективності.

З іншого боку, зазначено, що для СЕУ **КПК**, як системи із складними функціональними зв'язками, на сьогоднішній день у галузі **транспортної стратегії** існують наступні запити практики: забезпечення мінімізації невідворотних втрат під час передачі потужностей від СЕУ до рушіїв **КПК**; необхідність удосконалення процесів контролю передачі потужностей в СЕУ **КПК** з динамічними принципами утримання; підвищення експлуатаційної надійності і міцності СЕУ **КПК**; створення нових і удосконалення існуючих систем підтримки прийняття рішень під час експлуатації, досліджень і проектування СЕУ **КПК**.

Коригування коефіцієнту елементів конструкції судна та коефіцієнту доступності інноваційних технологій енергоефективності є найбільш ефективним у разі побудови СЕУ **КПК** за технологією **єдиних електроенергетичних систем** та екстраполяції аналітичних показників рядів динаміки цих коефіцієнтів з подальшим прогнозуванням змін та оцінки прогнозів, що неможливо виконати без: дотримання систем **DP** вимогам менеджменту якості, з якими стикаються на етапі експлуатації; уніфікації **PMS** у комбінації функцій по відношенню до інших подібних; незалежності складових систем **PMS** одна від одної навіть до рівня датчиків; не тільки зменшення потужності в розрахунку на загальне роз-

рахункове навантаження, але також і навантаження окремого СОДГ; відповідності системи умовам збільшення навантаження з точки зору достатності для забезпечення нормальної роботи в залежності від будь-якого ненормального режиму і не перевантажування суднової електроенергетичної системи взагалі.

На підставі вивчення існуючого стану розвитку СЕУ КПК, рухаючись від загального до часткового, в залежності від систем живлення двигунів ПП та розподілу потужності класифіковано топології СЕУ КПК за механічними, електричними або гібридними типами двигунів, і топологією живлення (теплові, електрохімічні і гібридні). Визначено наявність деградаційних ефектів та зумовленими цим невирішених проблем на лініях рушіїв, які можна характеризувати наступним чином: зменшення тяги гвинта і крутного моменту в наслідок надходження води перпендикулярно до осі гребного гвинта, викликане течією від потоків з інших двигунів з силою в напрямку припливу через відхилення потоку гвинта. Це часто називають крос-поєднанням опорів; наявність кавітації для важких навантажень на гвинти, що веде до зменшення тиску на лопаті гвинта; раптові падіння тяги й крутного моменту з ефектом гістерезису внаслідок великих амплітуд руху судна перпендикулярно поверхні води; одночасне зниження тяги і зміна напрямку тяги через взаємодію потоку від ПП з корпусом (ефект Коанда, Рис. 1); втрата упору ПП та зниження тяги викликані впливом гребного потоку від одного двигуна на сусідні двигуни; обмеження наростання обертаючого моменту індуктивністю двигуна із запобіганням пошкодження механічної частини електроприводу; обмеження максимальної потужності ПП, що враховується при визначенні перевантажувальної спроможності електродвигуна і ПЧ; відсутність стратегії управління ПЧ, заснованій на всережимних регуляторах, які б забезпечували перехід ПП, що працюють на гіперболі постійної потужності, у режим регулювання моменту або частоти обертання.

Визначені проблеми і окремі задачі у напрямку підвищення енергоефективності СЕУ КПК мають деякі локальні несистемні рішення, що дозволило констатувати необхідність більш детального дослідження саме енергетичних потоків на усіх перетинах від СОДГ до рушіїв з урахуванням не тільки стану довкілля, але і ситуаційних чинників та зміни експлуатаційних режимів.

Вирішення завдання удосконалення функціонування ДР із забезпеченням необхідної, технологічно обумовленої, точності позиціонування з урахуванням дії зовнішніх збурень у відкритому морі є таким, що має підвищити енергетичну ефективність СЕУ КПК і впливаючим на якість прогнозу щодо зміни коефіцієнтів енергоефективності, корегування якого неможливо без застосування коефіцієнту доступності технології компенсації деградаційних ефектів, що дозволить вплинути на конструктивний коефіцієнт енергоефективності технології ДР.

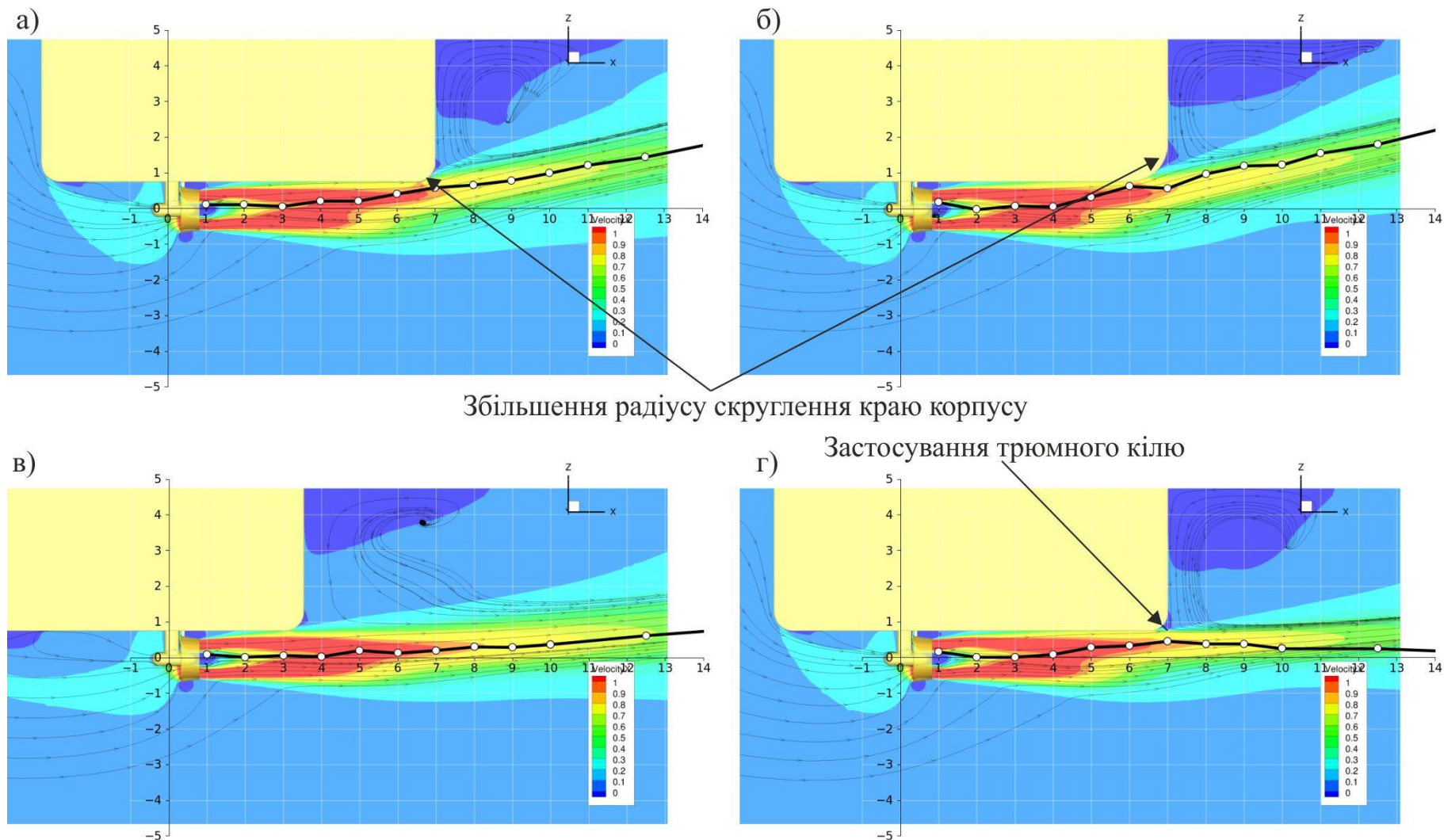


Рис. 1 Порівняльний аналіз траєкторій складових x -швидкостей потоку гвинта ПП: виникнення ефекту Коанда із стандартним (а) і збільшеним (б) радіусом скруглення корпусу трюму; в) зменшення прилипання потоку за рахунок переміщення точки закріплення балеру ПП ближче до краю корпусу; г) застосування трюмного кілю на огинаючий корпус

Підвищення продуктивності СЕУ КПК з різними архітектурними рішеннями структур можливо за рахунок кореляції коефіцієнту коригування елементів конструкції судна із плечем сили, яка визначається місцем прикладення упору даного ПП до проекції вектору зусилля на площину руху судна, та довжиною судна поміж перпендикулярами. Подібні кореляції передбачають у перспективі застосовування інтелектуальних стратегій управління ПП і судном у цілому.

Значення коефіцієнту доступності інноваційних технологій енергоефективності залежить від застосування у СЕУ КПК поновлюваних джерел енергії, особливо сонячної, енергії вітру, які все більше проникають у сектор суднобудування.

Оскільки проблеми, які характерні для СЕУ КПК, що експлуатуються у режимах *DP*, носять системний характер, то вони потребують відповідного застосування науково-дослідницького апарату, такого як системи підтримки прийняття рішень (СППР). Застосування СППР повинно забезпечити ґрунтовний та об'єктивний аналіз предметної області при прийнятті рішень в умовах постійного розвитку та ускладнення СЕУ КПК. За підтримки обчислювальних засобів і різноманітних підходів СППР повинна надати можливість безпосередньо проектувати, обирати та порівнювати альтернативні варіанти рішень.

У другому розділі **«Структуризація технології досліджень суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів»** обґрунтовано тематику дисертаційних досліджень. На підставі того, що системність заходів щодо реалізації **Транспортної стратегії** України до 2020 року (**розпорядження** Кабінету Міністрів України №2174–р від 20 жовтня 2010 року) обмежується, з одного боку, необхідністю розглядати проектування СЕУ КПК частиною **системи підтримки прийняття рішень** більш високого рівня і в той же час як самостійну частину, яка виступає єдиним цілим у взаємодії з середовищем. У свою чергу кожен елемент СЕУ КПК має власну структуру і також може розглядатися як окрема система.

Вибір теми ґрунтувався на експертній оцінці факторів експлуатаційних потреб виконання та отримання рішень розглянутих у першому розділі і на перевірці глибин знання кожної проблеми, визначеної в результаті інформаційного пошуку, здійсненого за наступними показниками: актуальність формованої проблеми; передбачувана наукова новизна; економічна ефективність планового дослідження; відповідність дослідження основним напрямкам певної наукової спеціальності та наукової школи; можливість реалізації дослідження.

У якості експертів виступали: Наукова рада НАН України з комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики», Військова академія, м. Одеса; комісія ПрАТ «Українське Дунайське пароплавство»; технічна рада Національного університету «Одеська морська академія»; комісії «Інституту післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр», ТОВ Одеського торгівельного порту «МОР-АВТО» та суден іноземних компаній «*Vancouver express*» та «*Allegro*».

Встановлено, для СЕУ КПК, як системи із складними функціональними зв'язками, мінімізація невідворотних втрат під час передачі потужностей від СЕУ до рушіїв КПК із удосконаленням процесів контролю передачі потужностей в СЕУ КПК з динамічними принципами утримання, підвищення експлуатаційної надійності і міцності СЕУ КПК та створення нових і удосконалення існуючих СППР під час експлуатації, досліджень і проектування СЕУ КПК на сьогоднішній день є актуальними аспектами для вибору теми дисертаційних досліджень у відповідності до транспортної стратегії та [паспорту спеціальності](#) (пп. 2, 4, 7, 8, 10, 11, 12).

На підставі системної структуризації процесу дослідження розроблено структурну схему процесу визначення тематики та встановлено, що розробку теоретичних положень методів розрахунків енергетичних процесів на лініях гребних гвинтів СЕУ [КПК](#) необхідно виконувати на основі рішення граничних інтегральних рівнянь, що використовують спеціальні закони розподілу ситуаційних чинників і ідентифікаційних параметрів експлуатаційних режимів.

Цільовою функцією у нашому випадку буде функція розрахунку коефіцієнтів енергоефективності ККЕЕ і ЕКЕЕ СЕУ КПК, які визначаються як відношення маси виробленого парникового газу до величини роботи судна за певний період часу в залежності від експлуатаційного режиму. На початковому етапі, в залежності від того рухається судно із якоюсь швидкістю v_s або працює у режимі [Dynamic Positioning \(DP\)](#) із кутом нищпорення ψ_J , модифікація схеми розрахунку коефіцієнтів енергоефективності проводилася [наступним чином](#):

$$\begin{aligned}
 K_{KKEE(tr)} = & \overbrace{\left(\left(\prod_{j=1}^n f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + \left(P_{AE} \cdot C_{FAE(i)} \cdot SFC_{AE(i)} \right)^* \right)}^{\text{Емісія CO}_2 \text{ головних двигунів}} + \\
 & + \overbrace{\left(\left(\prod_{j=1}^n f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff} \cdot P_{AEeff(i)} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right)}^{\text{Емісія CO}_2 \text{ СОДГ}} \\
 & - \overbrace{\left(\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff} \cdot P_{MEeff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right)^{**}}^{\text{Зменшення емісії CO}_2 \text{ ГД у наслідок застосування паливних елементів}} - \overbrace{\left(\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff} \cdot P_{AEeff(i)} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right)^{***}}^{\text{Зменшення емісії CO}_2 \text{ СОДГ у наслідок застосування АДЕ}} \times \\
 & \times \frac{1}{\underbrace{f_{\Delta} \cdot f_c \cdot \Delta_s \cdot f_w \cdot v_s}_{\text{Транспортна технологія}}};
 \end{aligned} \tag{1}$$

де: v_s – швидкість судна; Δ_s – водотоннажність; ψ_J – кут нищпорення судна; P_{ME} , P_{AE} , P_{eff} , P_{PTO} , P_{PTI} – потужності, відповідно, головних двигунів, [СОДГ](#), ви-

роблена в наслідок застосування інноваційних технологій, валогенераторів та **бустерного електродвигуна** або електродвигуна у гібридній судновій установці з гвинтами протилежного обертання (**CRP**); **SFC** – питома витрата палива; $C_F, f_j, f_w, f_{eff}, f_{degr}, f_{\Delta}, f_c$ – коефіцієнти, відповідно, перерахунку між споживанням палива та викидом CO_2 ; коригування конструкції судна, фактору погоди, доступності інноваційних технологій енергоефективності, доступності технології компенсації деградаційних ефектів, водотоннажності судна, коригування коефіцієнту водотоннажності судна; L_{PP} – довжина судна поміж перпендикулярами;

$$\begin{aligned}
 K_{KKEE(DP)} = & \left(\overbrace{\left(\left(\prod_{j=1}^n f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff} \cdot P_{AEff(i)} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right)}^{\text{Емісія CO}_2 \text{ СОДГ}} + \right. \\
 & \left. - \left(\overbrace{\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff} \cdot P_{AEff(i)} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}}^{\text{Зменшення емісії CO}_2 \text{ СОДГ у наслідок застосування паливних елементів}}^{**} - \overbrace{\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff} \cdot P_{AEff(i)} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}}^{\text{Зменшення емісії CO}_2 \text{ СОДГ у наслідок застосування АДЕ}}^{***} \right) \times \quad (2) \\
 & \times \frac{1}{\underbrace{f_{\Delta} \cdot f_c \cdot f_{degr} \times \Delta_s \cdot f_w \cdot \Psi_J}_{\text{Технологія DP}}}; \\
 K_{EKEE} = & \frac{K_{KKEE(tr)} \cdot t_{tr} + K_{KKEE(DP)} \cdot t_{DP}}{\underbrace{t_{total}}_{\text{Експлуатаційні чинники транспортної стратегії}}}, \quad (3)
 \end{aligned}$$

Базою досліджень в області обчислення гідродинамічних процесів на лініях гвинтів **ГЕД ПП** СЕУ КПК є рівняння Нав'є-Стокса (англ. **Reynolds-averaged Navier-Stokes** – RANS), що використовується для опису турбулентних течій. Можна припустити, що для турбулентних потоків води від гребних гвинтів **ГЕД ПП** СЕУ КПК узагальнено спирається на рівняння Нав'є-Стокса, яке справедливо як при ламінарному, так і при турбулентному руху рідини. В ньому вхідні миттєві значення швидкості і тиску потоку є пульсуючими величинами, тому для турбулентного режиму ставиться завдання відшукування усереднених у часі швидкостей і тисків. Для цього використовуються рівняння **Рейнольдса**, отримані на підставі рівняння Нав'є-Стокса, всі члени якого піддаються операції усереднення у часі.

Для отримання адекватних реальному режиму результатів, в залежності від певних ідентифікаційних параметрів і ситуаційних факторів, залежності на рівні потоків від гребних гвинтів повинні пройти операції осереднення, засно-

вані на припущенні про існування для будь-якого турбулентного руху такого інтервалу усереднення, що виконані по ньому, дають величину незмінних при повторному усередненні. Пульсуючі складові змінних характеризуються частотою і амплітудою, а середні амплітуди пульсації характеризуються відповідними коефіцієнтами пульсацій. Наприклад, для рівняння Рейнольдса, що використовується для опису турбулентних течій, метод усереднення Рейнольдса полягає в заміні характеристик потоку (швидкість, тиск, щільність) сумами усереднених і пульсуючих складових, що випадково змінюються.

Для оцінки і дослідження подібних фізичних явищ використовується поряд з експериментальними даними результати обчислень методами обчислювальної гідродинаміки (англ. *Computational Fluid Dynamics* – *CFD*). Констатовано за необхідне ґрунтуватися на двох подібних методах, заснованих на обчислювальній гідродинаміці: методі розрахунку обтікання довільних 3-х мірних тіл, який використовується для розрахунку обтікання систем крил і спеціалізованому методі розрахунку обтікання системи симетричних тіл і кільцевих крил неоднорідним і нестационарним потоком. В цьому випадку вдасться уникнути ряду труднощів пов'язаних з нелінійністю методу і враховувати в розрахунку реальну форму ПП без будь-яких апроксимацій.

Інформаційне наповнення запропонованих методів і способів виступає підґрунтям для розробки всережимних регуляторів управління ПП та їх експлуатації. Отримані результати лягають в основу розробок та створення інтелектуальних суднових систем управління, які забезпечують в складних експлуатаційних умовах стабілізацію в цілому параметрів ПП, СЕУ та КПК при мінімізації втрат енергії у СЕУ КПК під час розвідувально-бурових, підйомно-транспортних та вантажно-розвантажувальних робіт.

Під експлуатаційним режимом розуміється деяка узагальнена характеристика поточного режиму роботи СЕУ КПК. Режим може визначатися сукупністю значень координат стану СЕУ КПК, склад їх елементів, які змінили свої координати, величини і знаки даних змін, ступінь дотримання діючих обмежень та ін. Задача розпізнавання поточного експлуатаційного режиму, яку ототожнюють із завданням координації, сформулюється таким чином:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ x, \delta, y \end{pmatrix} \xrightarrow{R_F} i, \bar{C}_i, \quad (4)$$

де $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ x, \delta, y \end{pmatrix}$ – конкретні значення вектору збурюючих впливів $x(t)$ на об'єкт дослідження (СЕУ КПК), вектору керуючих впливів $\delta(t)$ і вектору координат динамічної моделі СЕУ КПК $y(t)$; i – ідентифікатор експлуатаційного режиму; $\bar{C}_i$ – множина змінних управляючих координатних завдань (4), що враховуються у i -му експлуатаційному режимі; $\bar{C}_i \subset \bar{C} = X_F \cup U_F \cup Y_F$; X_F , U_F ; Y_F – множини змінних x , δ , y відповідно, R_F – оператор відображення вектору стану $\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ x, \delta, y \end{pmatrix}$ у відповідності до $i, \bar{C}_i$. Сенс сформульованої задачі полягає в тому, що вектор поточних значень змінних x , δ , y в момент прийняття керуючого рішення ім-

лементується за допомогою оператора $\mathbf{R}_F$ у відповідності до ідентифікатору експлуатаційного режиму i у множину $\bar{C}_i$ змінних завдань (4), ефективних для даного експлуатаційного режиму. Значення цільової функції, а також функцій g і ε , не приймаються в розрахунок, оскільки однозначно визначаються значеннями своїх аргументів x, δ, y . Часткові або локальні задачі сформулюється у вигляді:

$$F_{i(obj_seu_cpc)}(x_i, \delta_i, y_i) \rightarrow \max_{\delta_i(t) \in U_i \subset U}$$

$$U_{i(F)} = \left\{ \delta_i : \begin{cases} g_i(x_i, \delta_i, y_i) = 0 \\ \varepsilon_i(x_i, \delta_i, y_i) \geq 0 \end{cases} \right\} \cup U_{i(F)} = U \quad i = 1, 2, \dots, N_F. \quad (5)$$

Тут i – ідентифікатор експлуатаційного режиму, N_F – число можливих експлуатаційних режимів, x_i, δ_i, y_i – модифіковані вектори відповідних впливів і координат об'єкта дослідження, $F_{i(obj_seu_cpc)}$ – модифікована цільова функція, $U_{i(F)}$ – модифікована множина допустимих рішень задачі визначення управляючих впливів, зумовлена модифікованими векторно-значними функціями g_i та ε_i , U – множина допустимих рішень вихідної задачі визначення управляючих впливів.

Підвищення ефективності функціонування гібридних із компенсацією пульсацій потоків гребних гвинтів [ДЕПК](#) можливо за рахунок використання сучасних систем накопичення енергії із застосуванням [СГЕ](#) і [СНЕ](#) оптимальної ємкості. Динамічні характеристики параметрів передачі потужностей на різних ділянках гібридного ДЕПК дозволять відпрацьовувати принципи налагодження СК розподіленням електроенергії для різних експлуатаційних режимів в умовах недетермінованих навантажень. Наприклад, аналізуючи дані у [Таблиця 1](#), можна зробити висновок, що при застосуванні класичного *PI* управління з регулюванням ступеню заряду батарей ([SOC](#)) СНЕ можливі зменшення споживання потужності споживачами, підключеними до ланки постійного струму ([DC-link](#)) і компенсація реактивної потужності. У випадку застосовувати управління за критерієм мінімуму споживання електроенергії відбувається підвищення коефіцієнту пульсацій вихідної напруги, що неможливо компенсувати без підтримки ступеню зарядки батарей СНЕ.

Моделювання енергетичних процесів у гібридних ДЕПК із [АДЕ](#) в різних експлуатаційних режимах роботи судна, з одного боку, забезпечить обґрунтований вибір вольт-амперних характеристик СГЕ і батарей СНЕ з точки зору оптимальних циклів заряджання/розряджання, а з іншого боку, дозволить виконати параметризацію основних джерел електроенергії і визначити граничні умови їх безаварійної роботи.

На підставі зробленого експертного аналізу та визначення початкових умов та обмежень складено технологічну карту досліджень із декомпозицією комплексної та головних задач.

Таблиця 1

Результати моделювання енергетичних процесів при передачі потужності у гібридному **ДЕПК**

Найменування елемента	Вихідні дані						DP					Заощаджування енергії					
	Кількість	Встановлена потужність, кВт	Ефективність	Коефіцієнт потужності	Споживана потужність, кВт		Коефіцієнт одночасності	Коефіцієнт завантаження	Коефіцієнт потужності	Споживана потужність		Коефіцієнт одночасності	Коефіцієнт завантаження	Коефіцієнт потужності	По відношенню до споживаної потужності		
					Одиночна	Загальна				Активна, кВт	Реактивна, кВАр				Активна, кВт	Реактивна, кВАр	
PVGS	16	11,5	0,94	1,00	12,2	122,3				122,34	0,00				97,87	0,00	
ESS	2	100,0	0,93	1,00	107,5	215,1	1,0	1,0	1,00	215,05	0,00	1,0	0,9	1,00	193,55	0,00	
DC/DC converters	5	200,0	0,88	1,00	227,3	454,5	1,0	1,0	1,00	454,55	0,00	0,5	0,8	1,00	181,82	0,00	
VSI	5	400,0	0,80	0,69	500,0	1000,0	1,0	1,0	0,69	1000,00	723,81	0,5	0,9	0,69	450,00	325,71	
DC-link	7	300,0	0,80	0,69	375,0	375,0	1,0	1,0	0,69	375,00	271,43	1,0	0,8	0,69	281,25	203,57	
HVSB	3	611,5	0,88	0,43	694,9	1389,8	1,0	1,0	0,43	1389,77	1254,73	0,5	0,8	0,43	583,70	526,99	
LVSБ	2	1311,5	0,89	0,44	1473,6	2947,2	1,0	1,0	0,44	2947,19	2646,57	0,5	1,0	0,44	1414,65	1270,35	
Load	2	1923,0	0,95	0,80	2024,2	4048,4	1,0	1,0	0,80	4048,42	2429,05	0,5	1,0	0,80	2024,21	1214,53	
Контроль за станом СОДГ							0,70			10552,3	7325,6	0,70			4022,6	3011,9	
PI управління (класичне) із регулюванням ступеню заряду батарей CHE (SOC)							0,75			21104,6	14651,2	0,75			4847,9	3337,6	
Контроль частоти і стану СОДГ та регулювання ступеню заряду батарей CHE (SOC)							0,80			16883,7	11720,9	0,85			4120,7	2836,9	
Управління за критерієм мінімуму споживання електроенергії							0,85			17727,9	12307,0	0,90			4326,8	2978,8	
Управління за критерієм отримання максимуму альтернативної енергії та регулюванням ступеню заряду батарей CHE (SOC)							0,90			18614,3	12922,3	0,95			4543,1	3127,7	
							Регулювання SOC			Так	Ні	Регулювання SOC			Так	Ні	

У третьому розділі «Розробка системи моніторингу деградаційних ефектів на лініях гребних потоків рушіїв із ідентифікацією відповідних маркерів» спочатку розширено масив даних щодо досвіду експлуатації СЕУ КПК в різних експлуатаційних умовах та встановлено, що втрати гребних гвинтів, викликані осьовим припливом води, залежать від проблем на лініях рушіїв, які сприятимуть зменшенню тяги гвинта і крутного моменту (Рис. 2).

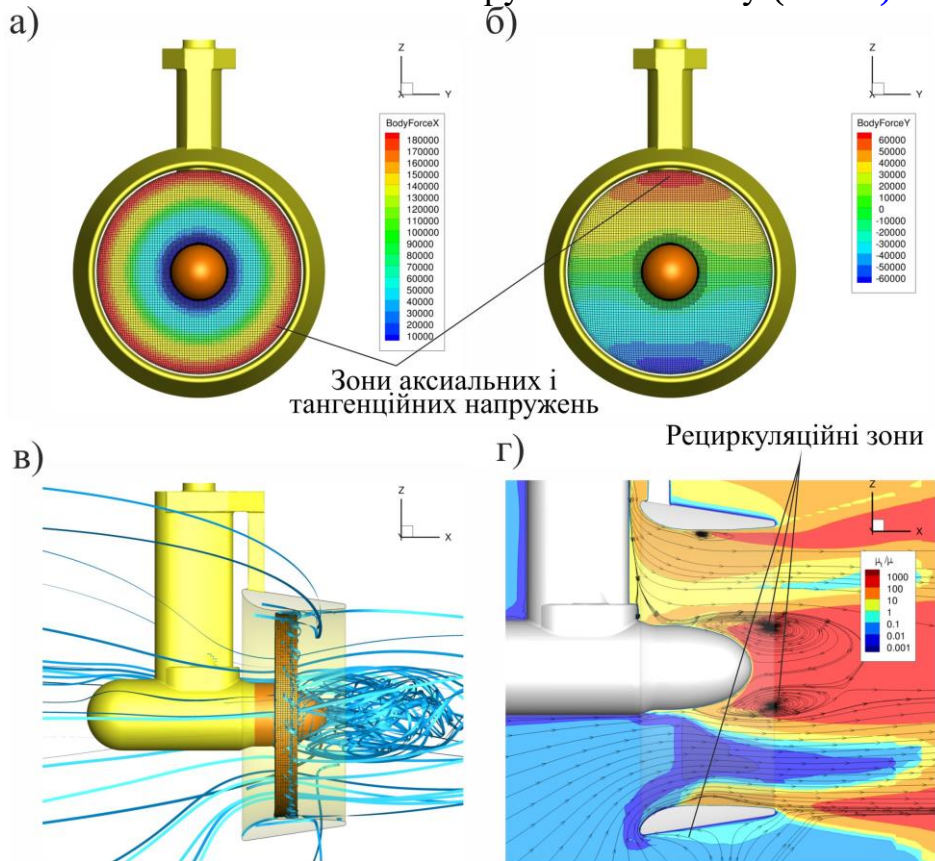


Рис. 2 Візуалізація потоку від азимутального рушія ПП СЕУ КПК: а) осьові і б) тангенціальні складові силових потоків з ідентифікованими зонами напружень; в) захоплення вихідного потоку до ліній рециркуляційної зони на обертових направляючих, що призводить до появи г) рециркуляційних зон у у-площині та турбулентних областей із відносними коефіцієнтами вихрової в'язкості μ_t/μ_w

Реєстрація поєднання зусиль на лініях валів у СЕУ КПК дає підстави стверджувати, що сенсори, як деякі узагальнені елементи, повинні мати більш значні діапазони виміру вхідних величин. Тому основна мета побудови або вибору математичної моделі сенсору – це знаходження таких аналітичних описів фізичних процесів, що протікають в процесі перетворення енергії в них, які б дозволяли використовувати види механічних впливів, які найбільш часто зустрічаються.

Згідно принципу електромеханічних аналогій сенсор, що реєструє механічний вплив, можна представити у вигляді механічної системи, де m_{cS} – маса контактної області сенсора; m_{ncS} – маса неконтактної області сенсора; v_C – коефіцієнт кінематичної пружності матеріалу підкладки; μ_S – коефіцієнт внутріш-

нього тертя матеріалу сенсора; $F_s(t)$ – сила, що діє на сенсор. При такому монтажі сенсор, що реєструє механічний вплив, буде відчувати поздовжні деформації, тобто має одну ступінь свободи. Для такої системи можна записати наступне рівняння відповідності діючої сили:

$$(m_{cs} + m_{ncs}) \cdot \frac{d\bar{v}_s(t)}{dt} + \mu_s \bar{v}_s(t) + \mu_R \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon} \bar{v}_s(t) dt = F_s(t), \quad (6)$$

де $m = \gamma_s \times S_s \times d_s / g$ [кг] – маса сенсору; $\bar{v}_s(t)$ – швидкість, з якою рухається система, що коливається у зоні прикладення сили $F_s(t)$ [м/с]; $\gamma_s = 7 \cdot 10^4$ [Н/м³] – питома вага; S_s – площа поперечного перетину, [м²]; d_s [м] – товщина контактного шару; g – сила тяжіння [м/с²] або прискорення вільного падіння; $\mu_s \times 10^{-2}$ [кг/м×с] – коефіцієнт внутрішнього тертя матеріалу сенсора; μ_R – коефіцієнт в'язкості середовища, або коефіцієнт грузлого тертя, $\times 10^{-2}$ [кг/м×с]; ε = діелектрична проникність середовища, [Ф/м]; ε_0 – електротехнічна постійна, $8,8 \times 10^{-12}$ [Ф/м]; $F_s(t)$ [Н] – сила, що діє на контактну зону.

Спираючись на це будь-який сенсор, що знаходиться під впливом збурюючої сили, можна представити у вигляді чотириполюсника, де $U_s(t)$ і $I_s(t)$ характеризують електричну сторону сенсору, а $F_s(t)$ і $x(t)$ – механічну. Загальним рішенням для такої системи рівнянь буде знаходження коефіцієнтів поліному для сталого режиму дії збурюючих сил на певний датчик (сенсор) за умови незмінності експлуатаційного режиму СЕУ КПК продовж інтервалу часу розрахунку.

$$\begin{cases} \bar{U}_s(Z) = \bar{I}_s(t) \cdot Z_{SE} + t_{EM} \cdot \bar{v}_s(t), \\ \bar{F}_s(Z) = \bar{I}_s(t) \cdot t_{ME} + Z_{SM} \cdot \bar{v}_s(t), \\ (m_{cs} + m_{ncs}) \cdot \frac{d\bar{v}_s(t)}{dt} + \mu_s \bar{v}_s(t) + \mu_R \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon} \bar{v}_s(t) dt = \bar{F}_s(Z), \end{cases} \quad (7)$$

де $F_s(Z) = (F_{s1}(Z^1), F_{s2}(Z^2), F_{s3}(Z^3), F_{s4}(Z^4), \dots, F_{si}(Z^m))^{Tmatrix(i)}$; комплексний імпеданс визначається матрицями активної та індуктивної складових схеми заміщення комплексного навантаження $Z^m = R^m + p_{ij}L^m$; $T_{matrix(i)}$ – матриця конфігураційних параметрів підрулюючих пристроїв, де $(i = 0 \dots k)$ – номер відповідної конфігурації.

Після узагальнюючих висновків щодо впливу певного деградаційного ефекту на систему СОДГ–комплексне навантаження, були визначені ймовірнісно-статистичні параметри розподілів навантажень та аналіз етапів застосування методів обчислювальної гідродинаміки.

На підготовчому етапі сформовано геометрію моделі, сформульовані необхідні фізичні умови із відповідною дискретизацією (створення сітки), задані початкові і граничні умови диференціальних рівнянь.

При візуалізації потоку від азимутального рушія **ПП СЕУ КПК** була прийнята модель, при якій гвинт представлений у вигляді диска силового при-

воду (англ. *Actuator Disk* – AD). Модель AD замінює лопаті гвинта еквівалентним розподілом сили по всьому об'єму гвинта. Така модель – це застосування RANS-рівнянь на модель гвинта із можливістю отримати результати моделювання потоку від рушія у відкритій воді, під корпусом і на закінченні корпусу судна.

Згідно з аналізом відомостей про судна, типи гвинтів, модифікації ПП, схеми розташування СОДГ СЕУ та їх структури, як багато-шинних конструкцій з нерівномірним розподілом імпедансу, які будуються за технологією гнучких систем змінного струму і являють собою єдині електроенергетичні системи, застосуванню методів обчислювальної гідродинаміки для відстежування деградаційних ефектів на лініях потоків гребних гвинтів передувала систематизація необхідних ідентифікаційних параметрів і ситуаційних чинників та формалізація фізичної моделі підрулюючого пристрою у рамках створення моделі багатофункціонального пропульсивного комплексу. Для цього, коефіцієнти упору гвинтів K_T і моменту гвинтів K_F для кута нищпорення ψ_J визначалися за умови заздалегідь рівними відповідним коефіцієнтами для абсолютної швидкості судна і швидкості притоку води, які повинні бути формалізованими згідно з рівняннями подібності для визначених чисел Рейнольдса і Фруда і коефіцієнтом попутного потоку w_s : $v_a = (1 - w_s)v_s$, де, як правило $0 < w_s < 0,4$.

Відповідну силу поштовху гвинта ПП розраховували, опираючись на значення двох радіусів (радіусу по кромці гвинта R_p та радіусу перетину лопаті гвинта r_p і товщиною лопаті гвинта b_p , які можуть бути однозначно визначені як осьові характеристики лопатей з їх перетину. Осьові і тангенціальні сили відповідно до упору і крутного моменту гвинта, що моделюється, визначалися виходячи з наступних міркувань: осьові сили F_x, F_y, F_z як алгебраїчне розподілення, що масштабується та інтегрується до необхідної тяги, а тангенціальна співвідноситься до властивостей гребних гвинтів, таких як крокове відношення гвинта $p_D (H_p/D_p)$ і визначається діючим значенням упору гребного гвинта T_d :

$$\frac{F_x(\hat{r}), F_y(\hat{r})}{F} = \left(\frac{a + \hat{r}}{a + 1} \right)^m \left(\frac{b + 1 - \hat{r}}{b + 1} \right)^n, \text{ де}$$

$$\hat{r} = \frac{r - r_p}{R_p - r_p}, \quad (r_p \leq r \leq R_p) \quad (8)$$

$$T_p = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^1 F_x(\hat{r}), F_y(\hat{r}) d\hat{r} d\theta. \quad (9)$$

Розподіл осьових сил параметризувалися відповідно до значень ідентифікаційних коефіцієнтів a, b, m, n , або, так званих характеристичних маркерів енергетичного потоку (ситуаційні чинники), які характеризують певний експлуатаційний режим. Ненульовий розподіл осьової складової сили встановлювався у всьому діапазоні ($r_p \leq r \leq R_p$) шляхом ретельного підбору параметрів a і b . Тоді, значення інтегральних складових відповідає вибраному напрямку упору

гвинта, T_p . В свою чергу тангенціальні складові упорів і моментів розраховувалися наступним чином:

$$\frac{F_\theta}{F_x, F_y}(\hat{r}) = \frac{H_p / D_p \times R_p}{\pi \times r}, \quad (10)$$

$$M_p = \int_{-\pi}^{\pi} \int_{r_p}^{R_p} r \times F_\theta(\hat{r}) d\hat{r} d\theta. \quad (11)$$

Початковий вибір параметрів осьових сил моделі відбувалося згідно рівняння (8), а потім, враховуючи дані, отримані для моделі АД ПП, ці початкові припущення були покращені (12). Аналізуючи результати для відкритої води, для фізичної моделі ПП на 100% швидкості обертання для максимального упору, встановлено наступний набір параметрів:

$$(a, b, n, m)^* = (0; 0; 1,45; 0,06). \quad (12)$$

Після формалізації фізичної моделі ПП, виконано ітераційну координацію оцінювання експлуатаційних режимів, на підставі формування керуючих впливів g_i та ε_i відповідного експлуатаційного режиму КПК судна з урахуванням найбільш значущих обмежень.

Наприклад, при вирішенні задачі сталого експлуатаційного режиму підсистеми споживач (СП) СЕУ КПК відомим оператором відображення, що зв'язує залежності зміни напруги U від струму I навантаження, є $R_{(\Psi)F}$:

$(x_i, \delta_i, y_i) \xrightarrow{U, U, U, R_{(\Psi)F}} i, \bar{I}_i$, керуючі впливи g_i та ε_i були сформовані з метою надання СОДГ, як джерелу енергії, властивостей одиничного оператора E_F : $I = E_F \times I$ і $\varphi = E_F \times \varphi$. Покомпонентний склад векторів змінних x_i, δ_i, y_i (4) може бути різним і, якщо властивості СП представлені графіками у вигляді реалізації будь-якого стохастичного процесу зміни навантаження СОДГ під час зміни експлуатаційного режиму КПК $I_i(t)$ та $\varphi_i(t)$ при $i = 1, 2, \dots$, то функціональний аналог одиничного оператора E_F повинен бути з двома керованими координатами $I^m(t)$ та $\varphi^m(t)$, значення яких відповідають:

$$\dot{I}^m(t) = [-R_{(\Psi)F}^m \cdot I^m(t) + E_F^m(t) + \beta_x \cdot X_F(t) + \beta_\delta \cdot \delta_F(t) + \beta_\varphi \cdot Y_F(t)] / L_{(\Psi)F}^m \quad (13)$$

та

$$\dot{\varphi}^m(t) = c_I \cdot I_F^m(t) + c_U E_F^m(t) + c_{\varphi(U)} \cdot \delta_{(\varphi)F}(t) + c_{\varphi(I)} \varphi_F(t), \quad (14)$$

де: R^m и L^m – матриці активної і реактивної складових еквівалентних електричних схем заміщення СП; $\beta_x, \beta_\delta, \beta_\varphi$ – середньозважені постійні конструктивні коефіцієнти системи самозбудження СОДГ, давачів збуджуючих впливів та трансформатору амплітудно фазового компаундування; $c_I, c_U, c_{\varphi(U)}, c_{\varphi(I)}$ – середньозважені постійні конструктивні коефіцієнти давачів струму, напруги та зворотнього зв'язку по струму і напрузі відповідно.

І нарешті, для підтвердження адекватності фізичної моделі проведено моніторинг енергетичних процесів при застосування альтернативних джерел живлення, що дав позитивний результат.

У четвертому розділі «Розробка стратегії всережимних регуляторів потужністю, моментом та частотою обертання електродвигунами підрулюючих пристроїв комбінованих пропульсивних комплексів» на підставі удосконалення математичного апарату при моделюванні енергетичних процесів в різних експлуатаційних режимах та систематизації рівнянь різних технологічних процесів у СЕУ та КПК, формалізовано принцип декомпозиції енергетичних процесів у експлуатаційному режимі по ситуаційним чинникам.

Якщо $\bar{C}_i$ – множину ситуаційних чинників експлуатаційного режиму СЕУ КПК судна, кожному з яких відповідає свій склад ефективних змінних, то дана множина $\bar{C}_i$ допускає розбиття на L підмножин $\bar{C}_{ik}$, $k = 1, 2, \dots, L$, відповідних типовим ситуаційним чинникам. Всі поточні ситуації оцінюються на приналежність до множини $\bar{C}_{ik}$, $k = 1, 2, \dots, L$, а завдання замінюється еквівалентно завданням для типової ситуації $\bar{C}_{ik}$:

$$\bar{C}_{ik} \cap \bar{C}_{ij} = \emptyset, k = 1, 2, \dots, L; j = 1, 2, \dots, L; k \neq j. \quad (15)$$

Припустимо, що для i ідентифікаторів експлуатаційного режиму споживачі і перетворювачі енергії функціонального аналога енергетичного процесу СЕЕС, працюючої на гіперболі постійної потужності, СЕУ КПК, що знаходиться у режимі **DP** описуються лінійними диференціальними рівняннями виду:

$$\dot{I}(t) = [-R_{(\Psi)F} \cdot I(t) + E_F(t)] / L_{(\Psi)F} \quad (16)$$

$$\dot{I}^m(t) = [-R_{(\Psi)F}^m \cdot I^m(t) + E_F^m(t) + \beta_x \cdot X_F^i(t) + \beta_\delta \cdot \delta_F^i(t) + \beta_\varphi \cdot Y_F^i(t)] / L_{(\Psi)F}^m \quad (17)$$

З урахуванням обставини завдання координатії для найбільш загального випадку, первинна задача, яка ототожнює у даному випадку пріоритети (16) і (17), може бути сформульована як задача визначення характерних ознак поточних ситуаційних чинників, що належать різним експлуатаційним режимам, з наступним об'єднанням пересічних ситуацій:

$$\begin{aligned} d_i = 0; a_{ij} = 0; j = 0; j = 1, 2, \dots, L; \\ \exists k = 1, 2, \dots, L; p_{is} \in P_{ik}, s = 1, 2, \dots, S \Rightarrow \\ \Rightarrow d_i = 1; b_{ks} = 1; a_{ik} = 1; \\ \bar{C}_{ik} \cup \bar{C}_{ij}, j = 1, 2, \dots, L; \end{aligned} \quad (18)$$

де d_i , b_s і a_j – допоміжні індикаторні змінні ітераційного процесу; p_{is} – s -та ознака ситуаційного чинника; P_{ik} – множина характерних ознак k -того типового ситуаційного чинника для i -го ідентифікатору експлуатаційного режиму; $\bar{C}_{ik}$ – множина змінних, що враховані у модифікованій задачі; $\bar{C}_{ij}$ – пересічна множина типових ситуаційних чинників, для яких $a_{ij} \neq 0$.

Приймаємо, що для енергетичного процесу СЕЕС, працюючої на гіперболі постійної потужності СЕУ КПК, що знаходиться у режимі **DP**, управління може бути переведено у лінійні стаціонарні координати із $\varphi = const$, і організо-

вано по модулю струму навантаження $I(t)$. Тоді завдання зводиться до послідовного перебору системних ознак типових ситуаційних чинників P_{ik} з метою відшукування таких, які повністю збігаються з ознаками k -того типового ситуаційного чинника для i -го ідентифікатору експлуатаційного режиму. Спільне рішення (16), (17), (18) виглядає наступним чином:

$$\begin{bmatrix} I(s) \\ E_F(s) \\ C_{ik}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_I^i(s) & W_E^i(s) & W_k^C(s) \\ k & 1/s & 0 \\ 0 & i & 1/s \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_k^C(0) \\ E_{k(F)}^C(0) \\ C_{ik}(1) \end{bmatrix}, k \neq i; \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} I(s) \\ E_F(s) \\ X_F^i(s) \\ Y_F^i(s) \\ \delta_F^i(s) \\ C_{ik}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_I^i(s) & W_E^i(s) & W_X^i(s) & W_Y^i(s) & W_\delta^i(s) & W_k^C(s) \\ k & 1/s & i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k & 1/s & i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k & 1/s & i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k & 1/s & i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k & 1/s \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_k^C(0) \\ E_{k(F)}^C(0) \\ X_F^C(0) \\ Y_F^C(0) \\ \delta_F^i(0) \\ C_{ik}(1) \end{bmatrix}; \quad (20)$$

де s – оператор диференціювання, $W^I(s)$; $W^E(s)$; $W^X(s)$; $W^Y(s)$; $W^\delta(s)$; $W^C(s)$ – передавальні функції, відповідно за складовими впливів I , E , X , Y , δ , C .

Керуючі впливи δ_i , що забезпечують адекватність процесів і для котрих сума значущих ознак типових ситуаційних чинників b_{ks} максимальна, і, відповідно, множина, що враховує змінні модифікованого завдання управління, а також, коли $I = E_F \times I$ і $\varphi = E_F \times \varphi$ виконується, формуються згідно співвідношень (30), (31) у результаті спільного рішення (19), (20), (21) з урахуванням всережимності регуляторів оборотів ПП.

$$d_i = 1 \Rightarrow \sum_{s=1}^S b_{ks} \rightarrow \max_k k = 1, 2, \dots, L; \quad \bar{C}_j = \bar{C}_k, j = 1, 2, \dots, L. \quad (21)$$

Так як наведені описи СОДГ і СП є ідеалізованими математичними моделями, то при будь-якому методі формування керуючого сигналу організовується управління по відхиленню координат $I^m(t)$ і $\varphi^m(t)$ від заданих значень $I(t)$ і $\varphi(t)$. Стан ПП задається вектором тяги $u = (u_x, u_y)$, і тому електродвигуни можуть бути змодельовані, наприклад, в прямокутній системі координат засобів *Matlab/Simulink*. Враховуючи цей факт, синтезовано математичні моделі всережимних регуляторів ПП СЕУ КПК.

Спираючись на графіки залежності параметрів гребного гвинта ПП від відносного кроку гвинта та аналізуючи взаємодію між моментом гвинта M_p , який зумовлюється силою поштовху F_p , упором T_p і потужністю P_p гвинта, на підставі діаграми вільної води, рівнянь динаміки щодо частоти обертання валу і діаметра гвинта, а також загального пропульсивного ККД комплексу судно-двигун-гребний гвинт були розраховані діючі значення упору і моменту гвинта:

$$T_d = h_T(n, x, \theta)(1-t)T_p = f_T(n, x, \theta), M_d = h_F(n, x, \theta)F_p = f_F(n, x, \theta), \quad (22)$$

де x – динамічні параметри судна, що рухається під впливом занурення гвинта і умов навколишнього середовища; θ – залежні параметри гвинта.

Потім, аналізуючи різні експлуатаційні режими роботи ПП і СЕУ КПК, з урахуванням ситуаційних чинників, отримано вирази для розрахунку упору гвинта в залежності від потужності на його валу:

$$T_d = \operatorname{sgn}(n) \frac{\rho^{1/3} \cdot D_p^{2/3} \cdot K_T \cdot h_T(1-t_s)}{(2\pi \cdot K_F \cdot h_F)^{2/3}} P_d^{2/3}, \quad T_d = \frac{K_T}{K_F D_p} \cdot M_d. \quad (23)$$

Далі, аналізуючи різноманітні блок-схеми замкнутих систем регулювання моментом асинхронного (АД) або синхронного (СД) двигунів ПП розроблено блок-схему регулятора швидкості, та виведено рівняння для частоти обертання гвинта n_p :

$$n_p = g_{n0}(T_p) = \operatorname{sgn}(T_p) \sqrt{\frac{T_p}{\rho \cdot D_p^4 \cdot K_{T0}}}, \quad (24)$$

яка є зворотною відносно вентиляторної характеристики для $K_{T0} = K_T (J_s = 0)$.

В свою чергу, стратегія управління моментом полягає в заміні зовнішнього контуру зворотного зв'язку за швидкістю петлею контролю крутного моменту за допомогою функції розрахунку моменту (Рис. 3) з уставкою F_p , яка розраховується як похідна від стандартної функції:

$$F_p = g_{T0}(T_p). \quad (25)$$

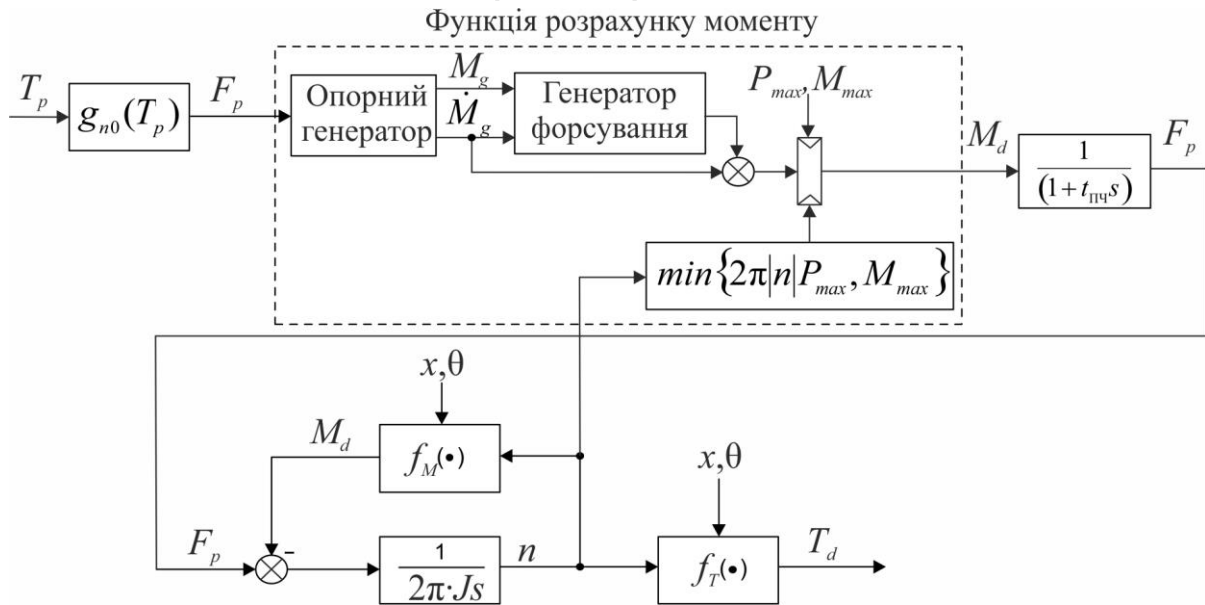


Рис. 3 Блок-схема регулятора моменту гвинта

Скориговані значення обертаючого моменту M_g і $\dot{M}_g$ (Рис. 3), визначаються на підставі функції розрахунку моменту гвинта і характеристик опорного генератора і генератора форсування при заданому T_p . Залежність моменту від оборотів гвинта накладає обмеження на максимальну потужність, що враховується при визначенні перевантажувальної спроможності електродвигуна і

ПЧ. Тобто, обмеження потужності електроприводу ПП дозволяє уникнути знеструмлення СЕЕС.

Альтернативною стратегією управління ПП є управління на основі регулювання потужності. При заданому контурі управління моментом величина упору замінюється відповідно до значення потужності P_p (Рис. 4). Використовуючи (24), знаходимо співвідношення між заданим осьовим упором і потужністю:

$$P_p = g_p(T_p) = \text{sgn}(T_p) \frac{2\pi \cdot K_{F0}}{\sqrt{\rho} \cdot D_p \cdot K_{T0}^{3/2}} |T_p|. \quad (26)$$

Таким чином, на підставі функції розрахунку потужності при заданому P_p з урахуванням характеристик опорного генератора і генератора форсування визначаються обмежені по максимуму значення $Q_{\max}$ і $P_{\max}$, тобто скориговані задані значення P_g і $\dot{P}_g$.

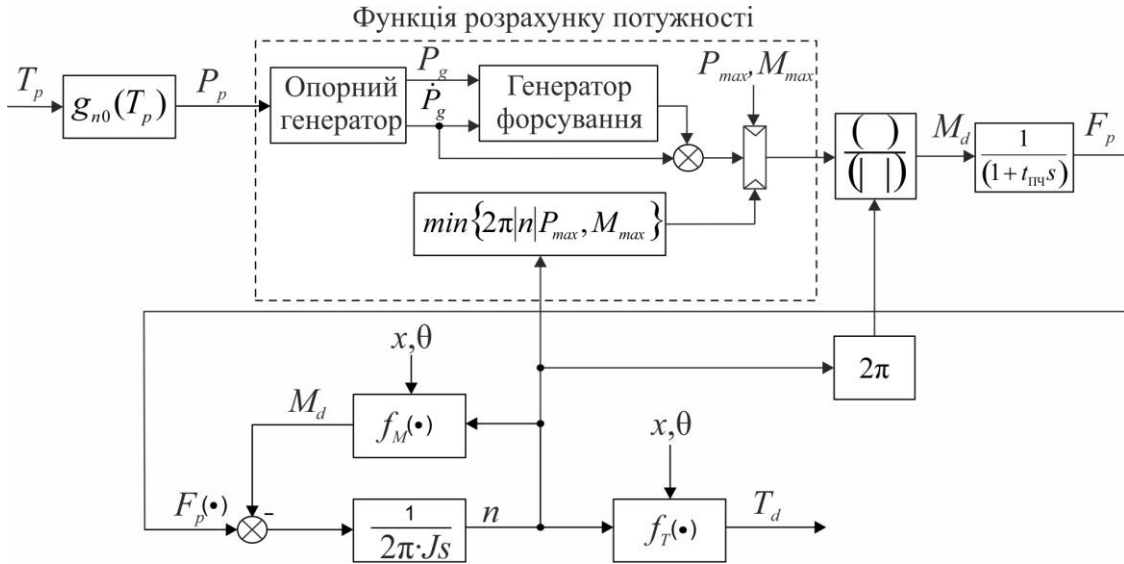


Рис. 4 Блок-схема регулятора потужності ПП

Для порівняльного аналізу різних схем управління необхідно визначити найбільш значимі властивості управління швидкістю, контролю обертаючого моменту і управління потужністю. Використовуючи (22) і (24), знаходимо залежність між фактичною тягою гвинта і заданою:

$$T_d = h_T(n, x, \theta)(1 - t_s) \frac{K_T}{K_{T0}} T_p = s_n(x, \theta) T_p. \quad (27)$$

Припустимо, що обертаючий момент гребного гвинта дорівнюють заданому зусиллю F_p в сталому режимі, тоді, з урахуванням (22) і (24), отримуємо

$$T_d = \frac{h_T(n, x, \theta)(1 - t)}{h_M(n, x, \theta)} \frac{K_{F0}}{K_F} \frac{K_T}{K_{T0}} T_p = s_M(n, x, \theta) T_p. \quad (28)$$

Для схеми управління потужністю, представленій на Рис. 4, як правило, потужність дорівнює P_p в сталому режимі. Тому аналогічно, використовуючи (24) і (26), отримуємо

$$T_d = \frac{h_T(n, x, \theta)(1-t)}{h_M^{2/3}(n, x, \theta)} \left(\frac{K_{F0}}{K_F} \frac{K_T}{K_{T0}} \right)^{2/3} \cdot T_p = s_p(n, x, \theta) T_p. \quad (29)$$

Опираючись на розроблену стратегію всережимних регуляторів ПП були визначені принципи формування управління інваріантного до збурення з урахуванням ситуаційних чинників експлуатаційного режиму.

Керуючи впливи δ_I (20), (21), що забезпечують адекватність процесів у СЕУ КПК при утриманні судном позиції, і для котрих сума значущих ознак типових ситуаційних чинників b_{ks} максимальна формуються згідно співвідношень (26), (30) і (31) (Рис. 4), а також критерію максимальної суми значущих ознак типових ситуаційних чинників b_{ks} (19). Відповідно, множина, що враховує змінні модифікованого завдання управління, а також, коли $I = E_F \times I$ і $\varphi = E_F \times \varphi$) виконується,

Для споживачів, якими у даному випадку є ГЕД ПП, що працюють, наприклад, на гіперболі постійної потужності, залежними від збурення по моменту на валу координатами будуть частота обертання і струм, що споживається ГЕД ПП (23), (24), за умовою, що залежність (26) виконується. Тоді, враховуючи усе вищезазначене, керуючий вплив δ_I , що забезпечує адекватність процесів, повинно бути сформовано відповідно співвідношенню:

$$\delta_I = \frac{\sum_{i=1}^{b_{ks}} C_{ik}^{x,\theta}(p) \left(\frac{1}{W_{\delta_I}(s)} \cdot T_d(s) - \frac{W_{T_p}(s)}{W_{\delta_I}(s)} \cdot T_p(s) - \frac{W_E(s)}{W_{\delta_I}(s)} \cdot E(s) \right)}{1 - \frac{W_{C_{ik}^{x,\theta}}(s)}{W_{\delta_I}(s)} \cdot C_{ik}^{x,\theta}(s)}, \quad (30)$$

яке отримано у результаті спільного рішення (20), (21) і (26).

З метою надання системі керування розподіленням електроенергії СЕУ КПК властивостей інваріантності по каналу збурення, з (20), (21) і (30) впливає, що:

$$\delta_I = \frac{\sum_{i=1}^{b_{ks}} C_{ik}^{x,\theta}(p) \left(-\frac{W_{T_p}(s)}{W_{\delta_I}(s)} \cdot T_p(s) + \frac{W_{T_p}(s) - W_E(s)}{W_{\delta_I}(s)} \cdot E(s) \right)}{1 - \frac{W_{C_{ik}^{x,\theta}}(s)}{W_{\delta_I}(s)} \cdot C_{ik}^{x,\theta}(s)}. \quad (31)$$

Також розроблена стратегія всережимних регуляторів дозволила удосконалити керування багатомасовими електромеханічними системами із розрахунком та обробкою дискретних чисельних значень експериментальних швидкісних характеристик, визначення коефіцієнтів передавальних функцій і знаходження залежностей для обчислення складових ПД-регуляторів швидкості безградієнтним методом Поувелла.

У п'ятому розділі «Методологія побудови багатокритеріальних стратегій управління розподілом потужності суднових енергетичних установках комбінованих пропульсивних комплексів» з умовою забезпечення дина-

мічних показників якості процесів передачі енергії в умовах різновекторних навантажень були визначення критерії застосування стратегій управління енергоспоживанням та розроблена методика створення математичних моделей електроенергетичних систем з багатошинними конструкціями.

Залежно від точки підключення, побудовано просторовий вектор споживаного ГЕД (АД або СД) струму, який обертається в d, q -координатах з частотою, що визначається фазою навантаження, яка в свою чергу, залежить від різниці імпедансу в точці підключення і найближчої високовольтної шини СОДГ. Тоді, рівняння моделі одного СОДГ, підключеного до шин, можна описати системою рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{\Psi}}{dt} = (W(n) + FX^{-1})\bar{\Psi} + Nu_g + gu_f \\ \frac{dn}{dt} = \frac{1}{t} (t_{m_содг} - \bar{\Psi}^t (M^t KM) X^{-1} \bar{\Psi}) \\ \Delta \frac{d\delta_{содг}}{dt} = \omega_N (n - n_1), \end{cases} \quad (32)$$

де $\bar{\Psi}$ – вектор потокозчеплення; u_f – напруга збудження, в. о.; n – частота обертання, $[с^{-1}]$; ω_N – номінальна частота обертання, $[рад/с]$; r_{ss} – опір обмотки статора АД, в. о.; r_{lk} – опір шини між точками lk , в. о.; t_d, t_q – повздовжня і поперечна складові постійної часу демпферної обмотки СОДГ, с; t_f – постійна часу обмотки збудження, с; x_d, x_q – повздовжня і поперечна складові значення реактивного опору розсіяння, в. о.; $k_{\mu d}, k_{\mu q}, k_{\mu f}$ – повздовжня і поперечна складові значення коефіцієнту насичення демпферної і статорної і обмотки збудження; μ_d, μ_f – коефіцієнти взаєміндукції між обмоткою статора і демпферною, між обмоткою збудження и демпферною.

$$W(n) = \begin{bmatrix} 0 & \omega_N n & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_N n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad N = \begin{bmatrix} \omega_N & 0 \\ 0 & \omega_N \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (33)$$

$$F = \begin{bmatrix} \omega_N (r_{ss} + r_{kl}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_N (r_{ss} + r_{kl}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/t_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/t_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/t_f \end{bmatrix}; \quad (34)$$

$$X = \begin{bmatrix} -x_d & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -x_q & 0 & 1 & 0 \\ -(1-k_{\mu_d})x_d & 0 & 1 & 0 & \mu_d \\ 0 & -(1-k_{\mu_q})x_d & 0 & 1 & 0 \\ -(1-k_{\mu_f})x_d & 0 & \mu_f & 0 & 1 \end{bmatrix}; g = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{t_f} \end{bmatrix}^t. \quad (35)$$

Тоді, із виразу (32), вектор потокозчеплення ψ СОДГ зв'язаний з величинами, що характеризують обмотку статора виразом:

$$h(\bar{\Psi}) = \bar{\Psi}_s' K i_s = \bar{\Psi}' (M^T K M) X^{-1} \bar{\Psi}, \quad (36)$$

$$\text{де } K = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}; \quad M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad M^T K M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Спільне рішення виразів (32), (33), (34), (35) дозволяє визначити постійну інтегрування, що характеризують уставки ПІД-регуляторів СОДГ при їх паралельній роботі. Регулятори налаштовуються так, що один з регуляторів контролює частоту і напругу, а інший на постачання активної і реактивної потужностей з уставками, взятими щодо потужності першого генератора. Таким способом досягається рівномірний розподіл навантаження:

$$c = x_d (\mu_f (\mu_d + k_{\mu_d} - 1) - \mu_d + 1 - k_{\mu_d} + k_{\mu_f} (k_{\mu_q} - 1)).$$

Значення струму статора i_s , активної (P) і реактивної (Q) потужностей знаходяться із рівняння:

$$\begin{cases} i_s = M X^{-1} \bar{\Psi} \\ P = u_g^t i_s = u_g^t M X^{-1} \bar{\Psi} \\ Q = -u_g^t K i_s = -u_g^t K M X^{-1} \bar{\Psi}. \end{cases} \quad (37)$$

На підставі отриманих залежностей, удосконалено систему контролю та управління енергетичними процесами у СЕУ КПК та синтезовано багатокритеріальну трирівневу стратегію управління розподілом потужності за критерієм мінімуму споживання електроенергії шляхом введення критерію отримання максимуму альтернативної енергії та регулювання ступеню заряду батарей СНЕ із використанням АДЕ, блок-схема якої показана на Рис. 5. На Рис. 6 наведені результати математичного моделювання енергетичних процесів у СЕУ КПК із застосуванням запропонованої стратегії, аналіз яких дає право стверджувати, що застосування розробленої стратегії є досить ефективним засобом зниження перешкод в мережі, оскільки призводить до зниження коефіцієнта гармонік (THD) у розглянутій області частот в 6 разів (з $THD = 6,18\%$ до $THD = 1,08\%$), при цьому, амплітуда 5-ої гармоніки основної частоти, на яку налаштовуються СК ПЧ ПП, зменшується в 17 разів.



Рис. 5 Блок-схема стратегії управління СЕУ КПК за критерієм максимуму альтернативної енергії та регулювання ступеню заряду батарей СНЕ: САРН – система автоматичного регулювання напруги; X_{set} – уставка; T – упор; F – сила поштовху гвинта; f – частота напруги; V – напруга; n – частота обертання СОДГ; i_{exc} – струм збудження; i – струм; τ_T – результуюча проекції вектору зусилля на площину руху; α_A – кут повороту ПП відносно діаметральної площини судна В.О.

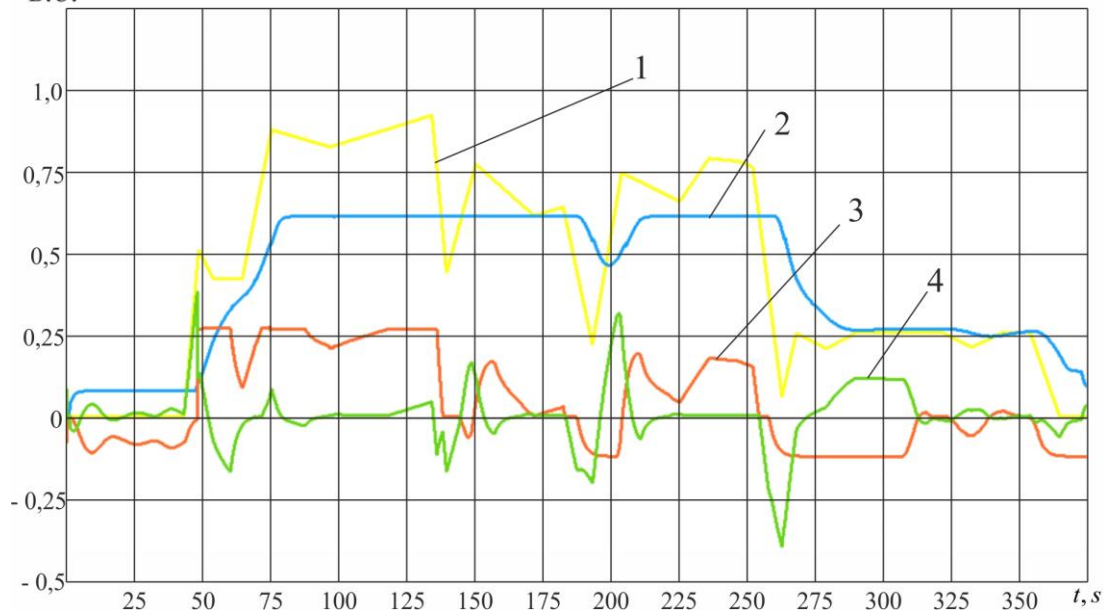


Рис. 6 Характеристики потужностей на різних ділянках ДЕПК, максимальним потужностям відповідають: 1 – навантаження 1000 кВт; 2 – потужності на СГЕ 10 кВт; 3 – потужності на СНЕ 20 кВт; 4 – потужності на DC-link 300 кВт

У шостому розділі «Методологія розробки системи підтримки прийняття рішень при проектуванні і дослідженні суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів» досягаючи ситуативних цілей були сформовані і об'єднані критерії вибору рішень, заснованих на множині СЕУ КПК та експлуатаційних режимів.

На підставі експериментальних залежностей відношень опору на тонну водотоннажності в функції коефіцієнту повздовжньої гостроти корпусу судна і числа Фруда, були знайдені вирази для коефіцієнтів ефективності на лініях валопроводів, вагові коефіцієнти сил в площині, де ці сили мають перевагу та відношення моментів і споживаних двигунами ПП потужностей, з урахуванням коефіцієнтів подоби для формалізованої фізичної моделі ПП (Рис. 7).

Для функціонального структурування СППР при проектуванні СЕУ КПК застосовано когнітивний процес (Таблиця 2). Встановлено, що, для відтворення підсистеми СП, необхідно описати її еквівалентний модуль – динамічний функціональний аналог (ДФА):

$$F_{obj_seu_cpc}(x, \delta, y, t) \rightarrow \max, \delta(t) \in U_F; y(t) \in Y_F, \quad (38)$$

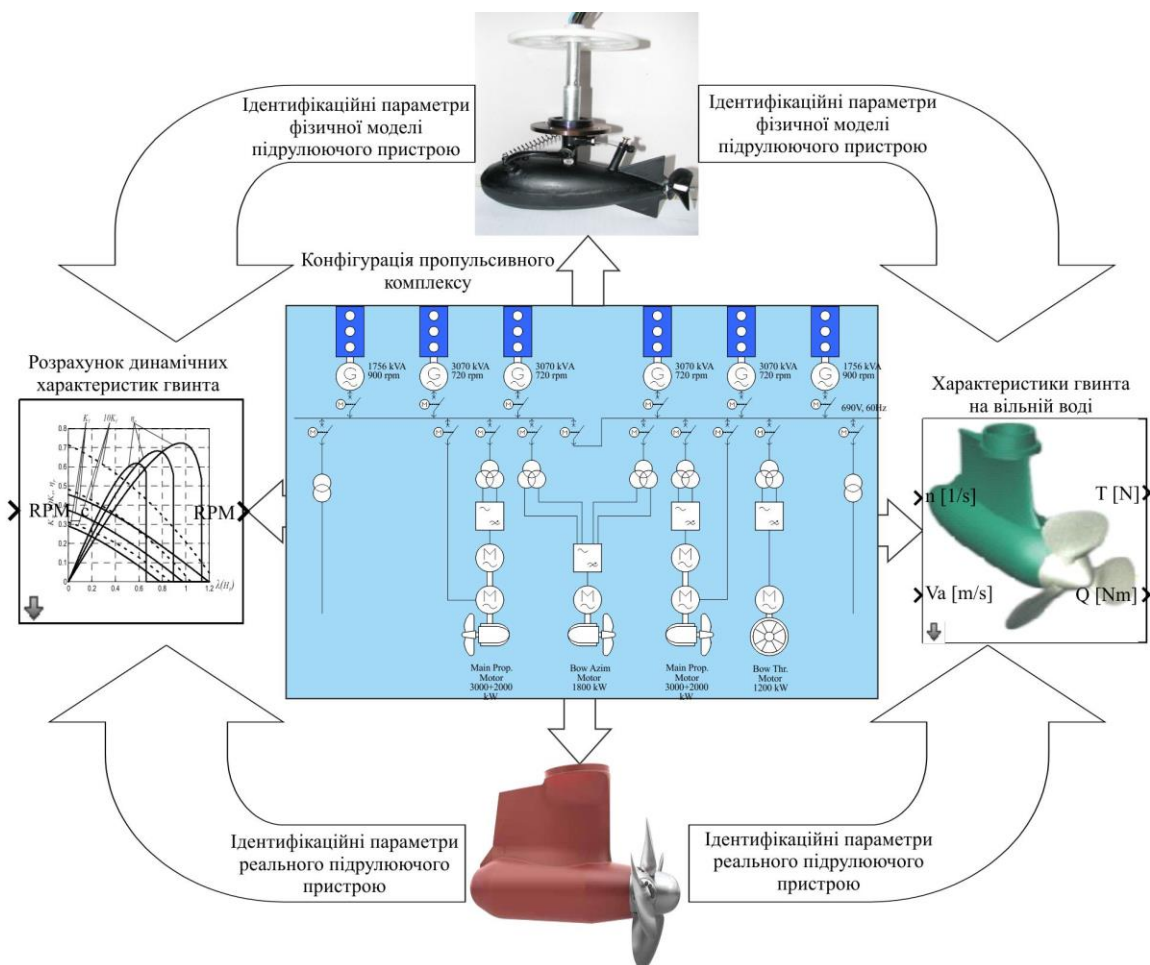


Рис. 7 Візуалізація процесу формалізації фізичних моделей ПП із визначенням конфігурації КПК

де $x(t)$ – вектор збурюючих впливів на об'єкт дослідження (СЕУ КПК); $\delta(t)$ – вектор керуючих впливів; $y(t)$ – вектор координат динамічної моделі СЕУ КПК; t – змінна часу; $F_{obj_seu_cpc}$ – цільова функція; U_F, Y_F – множини допустимих значень для $\delta(t)$ і $y(t)$ відповідно.

Як вирішення завдання визначається функція часу $\delta(t)$, що забезпечує максимум цільової функції $F_{obj_seu_cpc}(x, \delta, y, t)$ при зміні в часі збурюючих впливів $x(t)$. У розгорнутому вигляді завдання (38) можна представити таким чином:

$$F_{obj_seu_cpc}(x, \delta, y, t) \rightarrow \max_{\delta(t) \in U} U_F = \{\delta : g(x, \delta, y, t) = 0; \varepsilon(x, \delta, y, t) \geq 0\}, \quad (39)$$

де g і ε – задані вектор-функції в математичній моделі об'єкта дослідження і обмеження завдання. Всі співвідношення, що враховуються у завданні (39) в якості моделей і обмежень, задаються в класі інтегро-диференціальних рівнянь і нерівностей.

Таблиця 2
Процес когнітивного проектування СППР

Науковий інструментарій	Наукові задачі (етапи)	Наукові результати, способи впровадження
Обробка результатів аналізу періодичних видань	Обґрунтування актуальності розробки СППР при проектуванні СЕУ КПК	Рекомендації що до подальшого удосконалення СППР
Протоколи збирання вихідних даних і декомпозицій задач	Постанова і декомпозиція задач стосовно СППР	Таблиця необхідних вимог до СППР
Перелік існуючих та можливих обмежень при прийнятті рішень у процесі проектування	Визначення і перелік обмежень, які можуть виникнути при прийнятті рішення	Перелік специфічних проблем для певної задачі
Необхідні функції СППР при проектуванні СЕУ КПК	Визначення функціональних можливостей СППР	Перелік доступних функцій СППР
Перелік методів та існуючих правил для вибору рішення	Розробка методології і способів прийняття рішень	Функціональне структурування
Системи автоматичного проектування, алгоритмічні мови, програми візуалізації	Типізація діалогових вікон, принципів керування СППР та застосування необхідного програмного середовища	Блок-схеми алгоритмів, словесні алгоритми роботи, інженерні методики
Імітаційні програмні продукти	Розробка програмного середовища і його апробація, протокол апробації	Алгоритми, блок-схеми, граф-схеми, програми, ідентифікаційні m -файли

Для визначення функціональної відповідності процесів задачам та технології проектування були визначені необхідні функції для підтримки прийняття рішень з боку ЛПР, вихідних процесів при проектуванні і дослідженні СЕУ КПК та структуровано математичний апарат у рамках СППР (Рис. 8).

Розроблена СППР дає можливість вибору альтернативних рішень, інструментарію для інформаційного пошуку, методів аналізу та додатків для представлення результатів, реалізації і підвищення якості прийнятих рішень. Викорис-

тання методів у межах кожної підсистеми **СППР** ґрунтується на визначених та перевірених критеріях та вимірах, що зумовлюють рівень їхньої адекватності у комплектації СЕУ **КПК** (Рис. 9). Були проведені розрахунково-ітераційні дослідження ефективності управління при різних режимах функціонування СЕУ **КПК** та його комп'ютерне моделювання (Рис. 10) з урахуванням типізації технологічного процесу та налаштування конфігурації **ПП**.



Рис. 8 Структура СППР при проектуванні та дослідженні СЕУ **КПК**

Для крокових відношень $p_{Di}=H_p/D_{pi}$ величини упорів і моментів будуть визначатися вектором зусилля τ_T , що описується рівнянням:

$$\tau_T = T_{matrix} K_{Tmatrix} u_T, \quad (40)$$

де u_T – вектор змінних упорів **ПП**, що прикладені до судна (41); $K_{Tmatrix}$ – матриця коефіцієнтів упору гвинтів (42); T_{matrix} – матриця конфігурації **ПП** (43), (44), (45), (46).

Упори, що прикладено до судна у режимі динамічного позиціонування, внаслідок роботи **ПП**, визначаються вектором зусиль (упорів):

$$u_T = \left[p_{D1} - p_{D10} | (p_{D1} - p_{D10}) | p_{D2} - p_{D20} | (p_{D2} - p_{D20}) | \dots, \right. \\ \left. | p_{Dk_{TR}} - p_{Dk_{TR}0} | (p_{Dk_{TR}} - p_{Dk_{TR}0}) \right]^{T_{matrix}}, \quad (41)$$

де p_{Di0} ($i0 = 1 \dots k_{TR}$) – крокове відношення гвинта окремого **ПП**, максимальна кількість яких визначається числом k_{TR} .

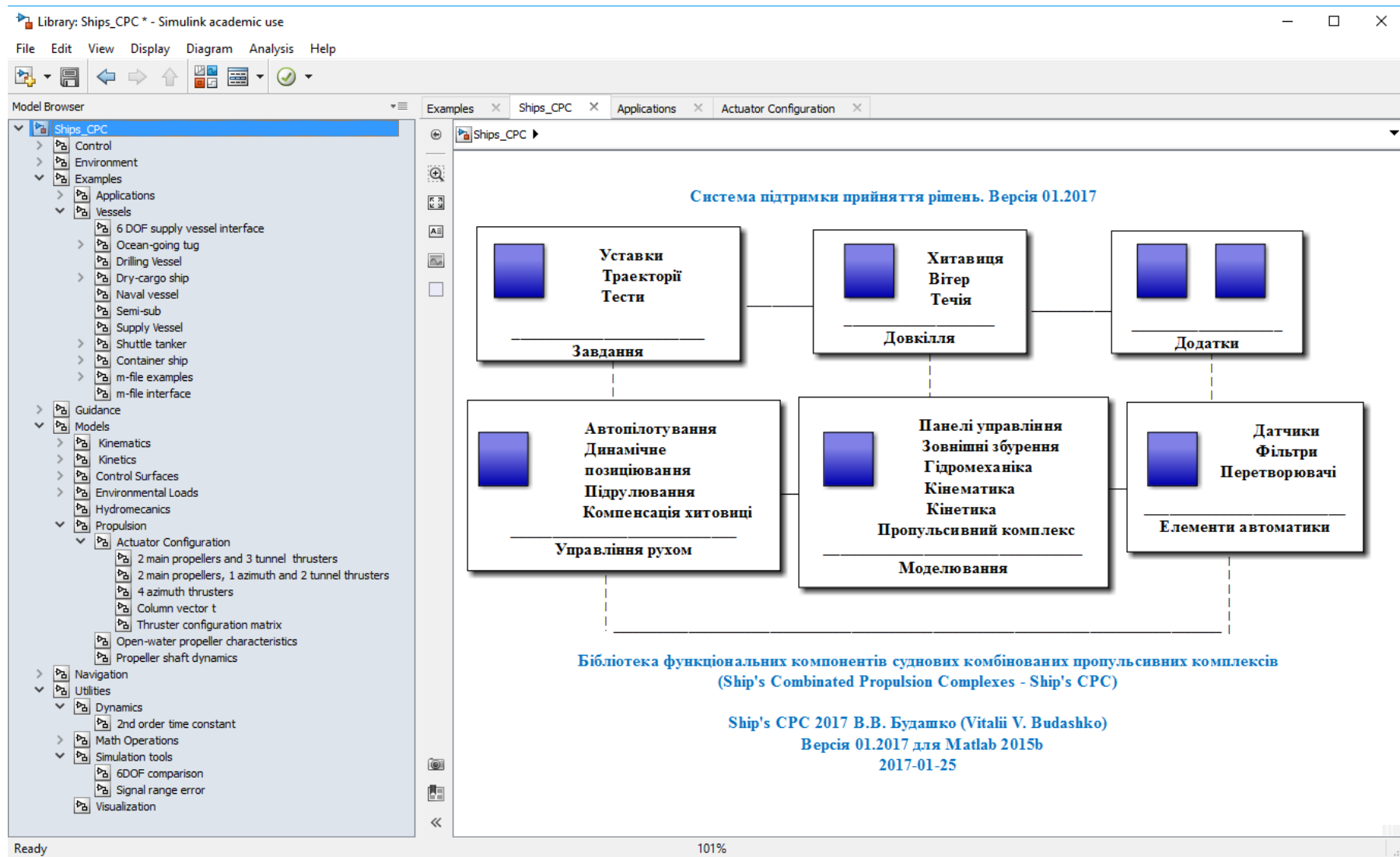


Рис. 9 Головна сторінка програмного комплексу у *MatLab/Simulink* розробленої СППР

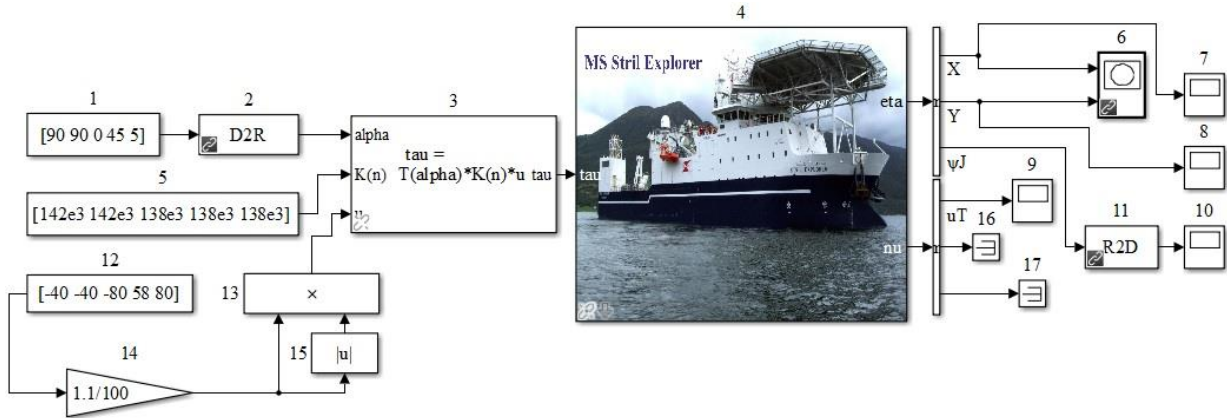


Рис. 10 Модель конфігурації ПП для судна типу *Supply Vessel*: 1 – завдання кута розташування ПП α_A , град.; 2, 11 – блок перетворення градусів у радіани, радіан у градуси; 3 – модель КПК; 4 – ідентифікатор параметрів судна; 5 – завдання коефіцієнту упору, K_T ; 6 – плоттер XY -координат, в.о.; 7...10 – осцилографи, що фіксують: XY -координати судна, м; значення упору, що прикладено до судна u_T , $H \times 10^6$; кут нищпорення ψ_J , град.; 12 – завдання крокового відношення гвинтів H_p , $-100\% \div +100\%$; 13 – функція перемноження; 14 – блок розрахунку крокового відношення $p_D = H_p/D_p$; 15 – блок розрахунку абсолютної величини; 16 – 17 – пристрої поглинання вихідних сигналів, що не відстежуються.

Коефіцієнти упорів гвинтів визначаються діагональною матрицею:

$$K_{Tmatrix} = \begin{pmatrix} K_{T1}(n_1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & K_{T2}(n_2) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & K_{Tr}(n_r) \end{pmatrix}, \quad (42)$$

де n_i ($i = 1 \dots r$) – частота обертання гвинта i -го ПП, об/хвил.

Сили упорів ПП (40) розподіляються на складові матрицею конфігурації ПП. На судні типу *Supply Vessel* встановлено два головних та два допоміжних ПП, які повертаються на будь-який кут α_A відносно діаметральної площини судна, та один носовий тунельний ПП. Виходячи з цього маємо наступну конфігурацію упорів: $u_{T1,2}$ – головних азимутальних ПП; $u_{T3,4}$ – допоміжних азимутальних ПП, u_{T5} – носового ПП:

$$T_{matrix(0)} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_{A1} & \cos \alpha_{A2} & \cos \alpha_{A3} & \cos \alpha_{A4} & 0 \\ \sin \alpha_{A1} & \sin \alpha_{A2} & \sin \alpha_{A3} & \sin \alpha_{A4} & 1 \\ l_{T1} \sin \alpha_{A1} & l_{T2} \sin \alpha_{A2} & l_{T3} \sin \alpha_{A3} & l_{T4} \sin \alpha_{A4} & l_{T5} \end{pmatrix}, \quad (43)$$

де l_{Ti} ($i = 1 \dots 5$) – плече сили, або відстань від місця прикладення упору даного ПП до проекції вектору зусилля τ_T на площину руху судна.

Для даного судна, в якості перевірки ефективності існуючої інсталяції СЕУ КПК у рамках розробленої СППР, додатково, окрім основної, протестовані ще три можливих конфігурації ПП, які визначаються відповідними матрицями $T_{matrix(1)}$ (44); $T_{matrix(2)}$ (45); $T_{matrix(3)}$ (46); $T_{matrix(4)}$ (47):

$$T_{matrix(1)} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \cos\alpha_{A3} & 0 \\ 0 & 0 & \sin\alpha_{A3} & 1 \\ l_{T1} & -l_{T2} & l_{T3}\sin\alpha_{A3} & l_{T4} \end{pmatrix}; \quad (44)$$

$$T_{matrix(2)} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & \cos\alpha_{A5} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & \sin\alpha_{A5} & 1 \\ l_{T1} & -l_{T2} & -l_{T3} & -l_{T4} & l_{T5}\sin\alpha_{A5} & l_{T6} \end{pmatrix}; \quad (45)$$

$$T_{matrix(3)} = \begin{pmatrix} \cos\alpha_{A1} & \cos\alpha_{A2} & 0 & \cos\alpha_{A4} & 0 \\ \sin\alpha_{A1} & \sin\alpha_{A2} & 1 & \sin\alpha_{A4} & 1 \\ l_{T1}\sin\alpha_{A1} & l_{T2}\sin\alpha_{A2} & -l_{T3} & l_{T4}\sin\alpha_{A4} & l_{T5} \end{pmatrix}; \quad (46)$$

$$T_{matrix(4)} = \begin{pmatrix} \cos\alpha_{A1} & \cos\alpha_{A2} & \cos\alpha_{A3} & \cos\alpha_{A4} & \cos\alpha_{A5} & \cos\alpha_{A6} \\ \sin\alpha_{A1} & \sin\alpha_{A2} & \sin\alpha_{A3} & \sin\alpha_{A4} & \sin\alpha_{A5} & \sin\alpha_{A6} \\ l_{T1}\sin\alpha_{A1} & l_{T2}\sin\alpha_{A2} & l_{T3}\sin\alpha_{A3} & l_{T4}\sin\alpha_{A4} & l_{T5}\sin\alpha_{A5} & l_{T6}\sin\alpha_{A6} \end{pmatrix}. \quad (47)$$

Для різних типів суден були розроблені m -файли ідентифікаційних параметрів для подальшої імплементації у просторові моделі СЕУ з метою отримання оптимальних с точки зору мінімізації ХУ-переміщень, експлуатаційних показників СЕУ та гідродинамічних КПК. На [Рис. 11](#), [Рис. 12](#) відповідно показані графіки зміни ХУ-координат та кута нищпорення ψ_J в функції часу продовж 200 с судна типу *Supply Vessel* при різних конфігураціях [ІІІ](#), взаємного розташування осей основних і допоміжних гребних гвинтів відносно діаметральної площини судна; значеннях крокових відношень і коефіцієнтів упорів.

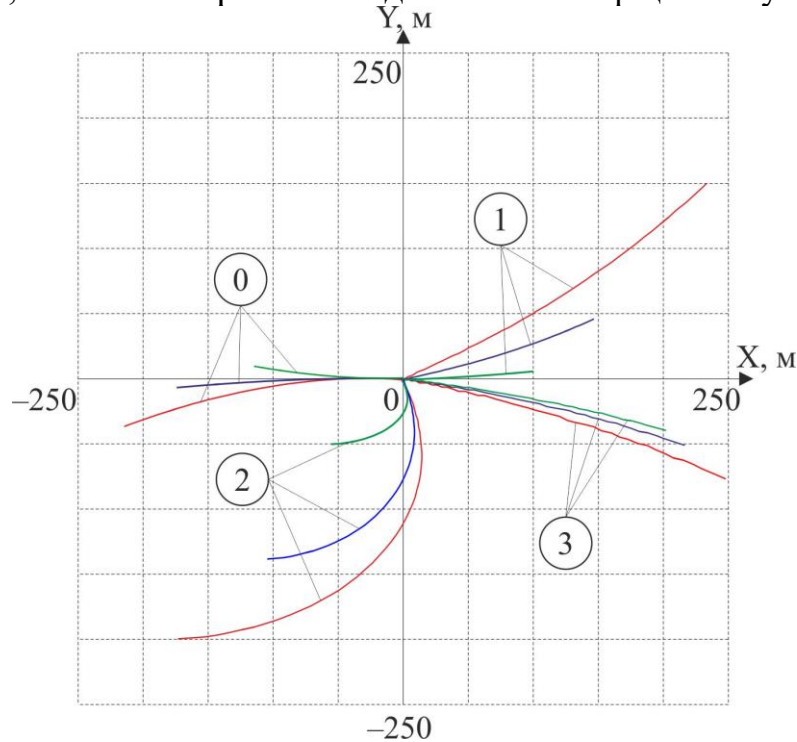


Рис. 11 Зміна координат судна типу *Supply Vessel* при різних конфігураціях [ІІІ](#):
0 – 3 – номери відповідних конфігурацій [\(43\)](#), [\(44\)](#), [\(45\)](#), [\(46\)](#): взаємно-перпендикулярне розташування осей основних і допоміжних гребних гвинтів

- з незмінними значеннями крокових відношень і коефіцієнтів упорів;
- з регульованими значеннями крокових відношень і коефіцієнтів упорів;
- оптимальне розташування осей основних і допоміжних гребних гвинтів зі значеннями крокових відношень і коефіцієнтів упорів, що відповідають критерію мінімальної зміни ХУ-координат судна.

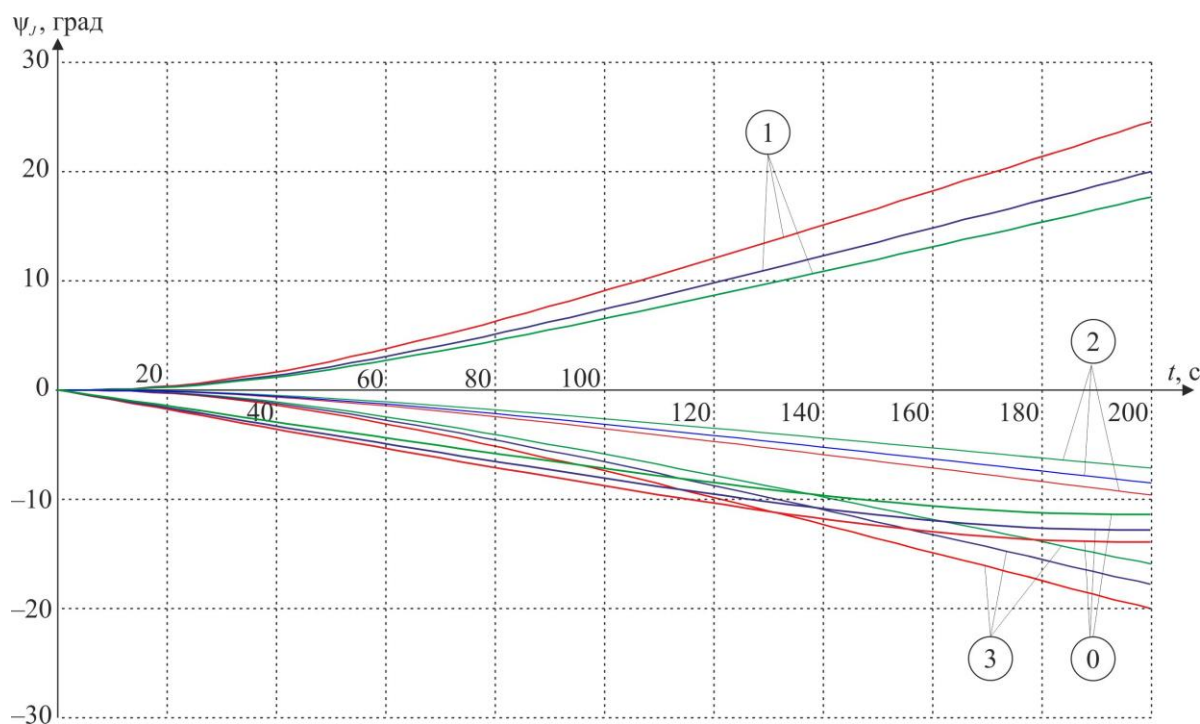


Рис. 12 Графіки залежності кута нищпорення судна типу *Supply Vessel*, довжиною 76 м, у функції часу: 0 – 3 – номери відповідних конфігурацій (43), (44), (45), (46): взаємно-перпендикулярне розташування осей основних і допоміжних гребних гвинтів — з незмінними значеннями крокових відношень і коефіцієнтів упорів; — з регульованими значеннями крокових відношень і коефіцієнтів упорів; — оптимальне розташування осей основних і допоміжних гребних гвинтів зі значеннями крокових відношень і коефіцієнтів упорів, що відповідають критерію мінімальної зміни ХУ-координат судна.

Аналізуючи графіки на Рис. 11, Рис. 12 можна зробити висновок, що оптимальною з точки зору мінімуму зсуву судна у ХУ-площині є конфігурація ПП №2, яка визначається матрицею (45).

Аналізуючи отримані результати, можна зробити висновок, що для СЕУ КПК, працюючого у режимі *DP*, цільова функція (2) по відношенню до (1) буде модифікованою, для множини U (5). Для досягнення цього результату, управляючи впливи повинні враховувати деградаційні ефектів на лініях гребних потоків. Для цього, на рівні технічної реалізації, у ланках орієнтації стабілізації, навігації та управління, були застосовані п'єзоелектричні давачі, які динамічно налаштовуються на відміну від традиційно використовуваних приладів у *DP*, можуть працювати у незалежних режимах виміру кута і швидкості.

Також, на основі застосування незалежного від характеристик вхідної напруги формування моменту [ПП](#), запропонований метод дозволяє, реалізовувати необхідні керуючі сигнали з урахуванням дислокації активних упорів відносно корпусу судна, з можливістю оперативного переналаштування залежних від довкілля параметрів ланок ланцюга [DP–PMS–DTC](#).

В свою чергу, підвищення продуктивності СЕУ [КПК](#) з архітектурними рішеннями проаналізованих структур можливо за рахунок кореляції коефіцієнту коригування елементів конструкції судна f_j із плечем сили, яка визначається місцем прикладення упору даного [ПП](#) до проекції вектору зусилля τ_T на площину руху судна l_T , та довжиною судна поміж перпендикулярами L_{PP} :

$$f_j = \frac{f_{j0} \cdot \left(\prod_{j=1}^n f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{l_T} L_{PP}^{(1 + l_T(i)/L_{PP})} \right)}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}, \quad (48)$$

де f_{j0} – початкове дизайнерське значення коефіцієнту для інших типів суден ($0,77 < f_{j0} < 1$).

Подібне уточнення цільової функції можливе із паралельним застосуванням інтелектуальних стратегій управління [ПП](#) і судном у цілому. У якості прогностичного розроблено емпіричний метод оцінки якості проектування і прийняття рішення у рамках розробленої СППР.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі здійснено теоретичне узагальнення та запропоновано нове вирішення важливої наукової проблеми, що полягає у розробці та вдосконаленні теорії та методології у галузі технічної експлуатації суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів і наданні практичних рекомендацій з підвищення ефективності їх функціонування. За результатами дослідження зроблено такі висновки і пропозиції:

– ресурсозберігаючі екологічно чисті технології експлуатації СЕУ [КПК](#) розвиваються шляхом застосування альтернативних генеруючих елементів при проектуванні джерел живлення і підвищення їх швидкодії при зміні експлуатаційних режимів, що дозволяє удосконалювати стратегії керування гібридними СЕУ [КПК](#) з точки зору розподілу потужності між АГЕ, [СНЕ](#), судновою електроенергетичною системою (СЕЕС) та іншими складовими СЕУ відповідно до обраної стратегії управління енергоспоживанням;

– проектування гнучких багатофункціональних електроенергетичних систем, які інтегруються у гібридні СЕУ [КПК](#) в якості невід'ємної складової, а також проведення параметризації пропульсивних і енергетичних характеристик СЕУ [КПК](#) в залежності від зміни експлуатаційних режимів, гідродинамічних характеристик і умов довкілля можливо шляхом поєднання класичних стратегій

управління розподілом потужності зі стратегією контролю за станом СОДГ і ступенем заряду АГЕ СНЕ;

– розробку математичних моделей різних систем управління СЕУ КПК суден необхідно проводити на підставі структурної декомпозиції енергетичних процесів на перетинах енергетичного потоку від джерел живлення до рушіїв, а відповідна ефективність процесів позиціонування для різних способів і схем управління може бути оцінена за допомогою створення віртуальних моделей СЕУ КПК в *MatLab/Simulink* із наступною верифікацією результатів реальними характеристиками ходових випробувань різних типів ПП;

– ефективна стабілізація напруги СОДГ СЕУ КПК можлива за умови застосування стратегій управління перерозподілом потужності за технологією *Open System* із можливістю реорганізовуватися, перенастроюватися та інтегруватися у технологічні процеси управління енергетичною системою судна з перспективою на завершення у формі універсальної структури;

– контроль частоти і стану СОДГ з регулюванням ступеню заряду батареї СНЕ, при усіх інших рівних умовах для експлуатаційного режиму, дозволяє зменшити кількість, або потужність модулів СГЕ на $7 \div 10$ %, а управління за критерієм отримання максимуму альтернативної енергії та регулюванням ступеню заряду батареї СНЕ використовувати акумуляторні батареї меншої ємності у межах $6 \div 8$ %;

– можливість ітераційної оптимізації параметрів СЕУ КПК дозволяє використовувати розроблені методи як засіб інтелектуального проектування, результатом застосування якого є вдосконалені експлуатаційні характеристики СЕУ КПК. Запропонована стратегія у порівнянні з існуючими системами має вищу швидкодію виявлення ризику знеструмлення СЕЕС, більшу надійність і точність з точки зору визначення необхідності зниження навантаження (в межах 150 мілісекунд);

– співвідношення коефіцієнтів упорів ПП КПК краще корелюються до коефіцієнтів потужності ніж до крокових коефіцієнтів гвинтів, що дає підстави вважати про підвищення енергетичної ефективності СЕУ КПК в експлуатаційних режимах та дає можливість додавати отримані результати у базу даних інших подібних СППР для забезпечення розробників і дослідників необхідною інформацією для створення нових концепцій СЕУ КПК або для модифікації існуючих;

– визначення величин упорів, що прикладено до судна, та формування матриці конфігурації ПП із встановленням відстані від місця прикладення упору окремого ПП до проекції вектору зусилля τ_T на площину руху судна можливо на підставі вивчення внутрішніх властивостей компонентів СЕУ КПК, що працює у режимі динамічного позиціонування, із визначенням відповідних ідентифікаційних чинників;

– кореляції коефіцієнту коригування елементів конструкції судна f_j із плечем сили, яка визначається місцем прикладення упору даного ПП до проекції вектору зусилля τ_T на площину руху судна l_T , та довжиною судна поміж перпе-

ндикулярами L_{rr} , дозволяє зменшити зони обмеження розвороту ПП від 4,5 до 6 град. В залежності від конструкції та розташування ПП;

- отримання залежностей коригуючих чинників, що впливають на компоненти упорів і моментів, пропорційних радіусу моделі і реального ПП, прив'язаних до вихідної геометрії, відбувається шляхом формалізації фізичних моделей азимутальних ПП із засобами ідентифікації деградаційних ефектів на лініях потоків гребних гвинтів методами обчислювальної гідродинаміки;

- удосконалення структур математичних моделей СЕУ КПК за даними експериментальних досліджень можливо шляхом виміру вхідних і вихідних параметричних координат ПП КПК судна, що працює у режимі динамічного позиціонування, з оцінкою дисперсій коефіцієнтів рівнянь регресії, а побудова наближених аналітичних моделей КПК для визначення параметрів системи управління ПП КПК у рамках розробки СППР за допомогою ортогонального композиційного планування експерименту із певним ПФЕ, складанням відповідної матриці та отримання результатів у вигляді коефіцієнтів моделі;

- розробка ефективної СППР для проектування, дослідження та експлуатації СЕУ КПК можлива за умови дотримання наступних вимог: 1) застосування інтегрального критерію ефективності, що дозволяє приймати рішення при варіюванні будь-яких істотних параметрів СЕУ КПК; 2) можливість ітераційного розрахунку загальної кількості та типу ПП, гребних гвинтів, системи живлення електродвигунів із можливістю багаторазової зміни конструкції навіть при наявності мінімальних даних про існуючий проект; 3) можливість застосування практично для будь-якого типу судна; 4) можливість проводити модернізацію різноманітних типів суден для їхньої адаптації до режиму динамічного позиціонування та синтезувати рекомендації розробникам ПП, контролерів керування та систем живлення для суден, працюючих у режимі динамічного позиціонування;

- підвищення енергетичної ефективності СЕУ КПК в експлуатаційних режимах та інтегрування отриманих результатів у базу даних інших подібних СППР для забезпечення розробників і дослідників необхідною інформацією для створення нових концепцій СЕУ КПК або для модифікації існуючих відбувається шляхом взаємної імплементації характеристичних просторових векторів енергетичних процесів в СЕУ і гідродинамічних в КПК;

- прискорення збіжності синтезованих DMI-моделей суден для заданих швидкостей обертання гребних гвинтів, тяги, крутного моменту і крокового відношення відбувається шляхом розрахунків коефіцієнту упору зі зміною взаємного розташування ПП відносно один одного та діаметральної площини судна, значень крокових відношень, коефіцієнтів упорів і розташування осей основних і допоміжних гребних гвинтів;

- стійкість електроприводів взаємно-впливаючих технологічних процесів КПК до збурюючих моментів можливо забезпечити за умови збігу нульового значення координати електроприводу і швидкості відхилення діаметральної площини судна від вертикального положення із оптимізацією системи керуван-

ня шляхом математичного опису динаміки диференціальними рівняннями з розрахунковими коефіцієнтами, що є похідними від функцій змінних станів;

– вирішення задачі усталеності моменту на валу електроприводів взаємно-впливаючих технологічних процесів КПК можливо за умови отримання експериментальних залежностей коефіцієнтів рівнянь руху динамічного об'єкта під дією збурюючих сил в координатній площині переміщення судна із наступною параметризацією відповідних компонентів, а усунення аперіодичних складових в законах керування електроприводами взаємно-впливаючих технологічних процесів КПК із дотриманням критеріїв стійкості і якості перехідних процесів можливо за допомогою застосування всережимності регулятора координатних характеристик з форсуванням здолання зони нечутливості та підвищення стійкості електроприводу як динамічного об'єкту.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. Будашко, В. В. Концепция моделирования и построения электро-энергетической установки современного судна [Текст] / В. В. Будашко, О. А. Онищенко // Оптимальне управління та експлуатація електроприводів спеціальних установок: зб. наук. праць (колект. монографія). – Одеса: Наука і техніка, 2015. – С. 109–115; **внесок автора:** визначення критеріїв оптимальності, розробка математичного апарату для дослідження енергетичних процесів; **база(и):** Google Академія.

Наукові праці в спеціалізованих виданнях з переліком наукометричних баз де вони проіндексовані:

2. Будашко, В. В. Інтегральний критерій оцінки ефективності передачі потужності комбінованого пропульсивного комплексу [Text] / В. В. Будашко, С. А. Ханмамедов // Збірник наукових праць Севастопольського військово-морського ордена Червоної Зірки інституту ім. П. С. Нахімова. – Севастополь: СВМІ ім. П. С. Нахімова. – 2007. - № 2(12). – С. 151–154; **внесок автора:** розробка методології застосування інтегрального критерію ефективності продовж дослідження передачі потужності у комбінованих пропульсивних комплексах.

3. Будашко, В. В. Моніторинг енергетичних процесів в комп'ютерній лабораторії для суднового дизель-електричного пропульсивного комплексу [Text] / В. В. Будашко // Праці Луганського відділення Міжнародної Академії Інформатизації: Науковий журнал. – 2007. – № 1(14). С. 100–107; **база(и):** РИНЦ, реферативний журнал «Джерело» (Україна), Google Академія.

4. Будашко, В. В. Оцінка ефективності передачі потужності в суднових дизель-електричних комплексах [Text] / В. В. Будашко // Судовые энергетические установки: Научно-технический сборник. – 2007. – №18. – Одесса: ОНМА. С. 21–24; **база(и):** Google Академія.

5. Budashko, V. Decision support system's concept for design of combined propulsion complexes [Text] / V. Budashko, V. Nikolskyi, O. Onishchenko, S. Khni-unin / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – V. 3. – № 8(81). – P. 10–21. Doi:[10.15587/1729-4061.2016.72543](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72543); **внесок автора:** розробка методології створення системи підтримки прийняття рішень для дослідження, проектування та експлуатації СЕУ КПК, а також методу взаємної імплементації характеристичних просторових векторів енергетичних процесів в СЕУ і гідродинамічних в КПК; **база(и):** Scopus, Ulrich's Periodicals Directory, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus, WorldCat, ПИНЦ, DOAJ, EBSCO, ResearchBib, American Chemical Society, Directory Indexing of International Research Journals, DRJI, CrossRef, OAJI.

6. Budashko, V. V. Design of the three-level multicriterial strategy of hybrid marine power plant control for a combined propulsion complex [Text] / V. V. Budashko / Electrical engineering & electromechanics. – 2017. – №2. – P. 62–72. Doi:[10.20998/2074-272X.2017.2.10](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.2.10); **база(и):** Web of Science™ Core Collection: Emerging Sources Citation Index (ESCI), Index Copernicus (ICV2015 – 83,98), DOAJ, ПИНЦ, CrossRef, ProQuest, EBSCO Publishing INC., Gale/Cengage Learning, Ulrich's Periodical Directory, реферативний журнал «Джерело» (Україна), реферативний журнал ВІНІТИ РАН (Російська Федерація), Google Академія.

7. Budashko, V. Formalization of design for physical model of the azimuth thruster with two degrees of freedom by computational fluid dynamics methods [Text] / V. Budashko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – V. 3. – № 7(87). – P. 40–49. Doi:[10.15587/1729-4061.2017.101298](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101298); **база(и):** Scopus, Ulrich's Periodicals Directory, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus, WorldCat, ПИНЦ, DOAJ, EBSCO, ResearchBib, American Chemical Society, Directory Indexing of International Research Journals, DRJI, CrossRef, OAJI.

8. Budashko, V. Theoretical-applied aspects of the composition of regression models for combined propulsion complexes based on data of experimental research [Text] / V. Budashko, V. Golikov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – V. 4. – № 3(88). – P. 11–20. Doi:[10.15587/1729-4061.2017.107244](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.107244); **внесок автора:** розробка принципів побудови регресійних емпіричних моделей СЕУ КПК із визначенням функції зв'язку вхідних змінних із вихідною за даними експериментальних випробувань, перевірка адекватності отриманої моделі із розрахунком відповідних критеріїв; **база(и):** Scopus, Ulrich's Periodicals Directory, OpenAIRE, BASE, Index Copernicus, WorldCat, ПИНЦ, DOAJ, EBSCO, ResearchBib, American Chemical Society, Directory Indexing of International Research Journals, DRJI, CrossRef, OAJI.

9. Budashko, V. V. Conceptualization of research of power hybrid electric power complexes [Text] / O. V. Glazeva, V. V. Budashko, S. F. Samonov // Technology audit and production reserves. – 2016. – V. 5. – 1(31). – 63–73. Doi:[10.15587/2312-8372.2016.81407](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.81407); **внесок автора:** концептуалізація принципів налагодження систем управління розподіленням електроенергії для різних експлуатаційних режимів в умовах недетермінованих навантажень СЕУ КПК,

знаходження критеріїв порівняння продуктивності систем накопичення енергії, обґрунтування вибору вольт-амперних характеристик сонячних генеруючих елементів і літій-іонних батарей систем накопичення енергії з точки зору енерго-заощаджувальних циклів заряджання/розряджання; **база(и):** *Index Copernicus*, РИНЦ, *Ulrich's Periodicals Directory*, *DRIVER*, *BASE*, *ResearchBib*, *DOAJ*, *WorldCat*, *EBSCO*, *CrossRef*, *Directory Indexing of International Research Journals*, *DRJI*, *OAJI*, *Sherpa/Romeo*, *Open Access Articles*, *WorldWideScience.org*, *JURN*.

10. Budashko, V. V. Increasing control's efficiency for the ship's two-mass electric drive [Text] / V. V. Budashko / *Electrical engineering & electromechanics*. – 2016. – №4. – Р. 34–42. Doi:[10.20998/2074-272X.2016.4.05](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.4.05); **база(и):** *Web of Science™ Core Collection: Emerging Sources Citation Index (ESCI)*, *Index Copernicus (ICV2015 – 83,98)*, *DOAJ*, РИНЦ, *CrossRef*, *ProQuest*, *EBSCO Publishing INC.*, *Gale/Cengage Learning*, *Ulrich's Periodical Directory*, реферативний журнал «Джерело» (Україна), реферативний журнал ВІНІТІ РАН (Російська Федерація), Google Академія.

11. Budashko, V. V. Modernization of hybrid electric-power system for combined propulsion complexes [Text] / V. V. Budashko, O. A. Onishchenko, D.V. Ungarov // *Electrotechnic and computer systems*. – 2016. – 23(99). – Р. 17–22. Doi:[10.15276/eltecs.23.99.2016.02](https://doi.org/10.15276/eltecs.23.99.2016.02); **внесок автора:** попередні розрахунки для визначення орієнтовної вартості СЕУ КПК, визначення нормативних проблем, які необхідно вирішити у подальших дослідженнях; **база(и):** *Index Copernicus*, Google Академія.

12. Бойко, А. А. Синтез и исследование системы автоматического симметрирования токов асинхронного двигателя с преобразователем напряжения [Текст] / А. А. Бойко, В. В. Будашко, Е. А. Юшков, Н. А. Бойко // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – 2016. Т. 1. № 2 (79). С. 22–34. Doi:[10.15587/1729-4061.2016.60544](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.60544); **внесок автора:** синтез елементів системи симетрування, визначення показників симетрування та рекомендації із застосування системи; **база(и):** *Scopus*, *Ulrich's Periodicals Directory*, *OpenAIRE*, *BASE*, *Index Copernicus*, *WorldCat*, РИНЦ, *DOAJ*, *EBSCO*, *ResearchBib*, *American Chemical Society*, *Directory Indexing of International Research Journals*, *DRJI*, *CrossRef*, *OAJI*.

13. Будашко, В. В. Имплементарный подход при моделировании энергетических процессов динамически позиционирующего судна [Текст] / В. В. Будашко // *Електротехніка і Електромеханіка*. 2015. №6. – С. 20–25. ISSN 2074-272X. Doi:[10.20998/2074-272X.2015.6.02/50764](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.6.02/50764); **база(и):** *Web of Science™ Core Collection: Emerging Sources Citation Index (ESCI)*, *Index Copernicus (ICV2015 – 83,98)*, *DOAJ*, РИНЦ, *CrossRef*, *ProQuest*, *EBSCO Publishing INC.*, *Gale/Cengage Learning*, *Ulrich's Periodical Directory*, реферативний журнал «Джерело» (Україна), реферативний журнал ВІНІТІ РАН (Російська Федерація), Google Академія.

14. Будашко, В. В. Математические основы имитационного моделирования системы управления энергетической установкой бурового судна [Текст] /

В. В. Будашко, О. А. Онищенко // Вестник Камчатского государственного технического университета. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ. – 2014. – Вып. 29. – С. 6–13. Режим доступа: \WWW/ URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22822710>. – 16.05.2016 р. – Загол. з екрану; **внесок автора:** декомпозиція суднової енергетичної установки як об'єкта математичного моделювання, структуризація локальних систем і різних функцій управління підрулюючими пристроями комбінованих пропульсивних комплексів бурових суден; **база(и):** РИНЦ, реферативний журнал ВІНІТИ РАН (Російська Федерація), Google Академія.

15. Будашко, В. В. Математическое моделирование всережимных регуляторов оборотов подруливающих устройств судовых энергетических установок комбинированных пропульсивных комплексов [Электронный ресурс] / В. В. Будашко, Е. А. Юшков // Электронное моделирование (Electronic Modeling). – 2015. – V. 37. – №2 (2015). Р. 101–114. – Режим доступа: \WWW/ URL:<http://www.emodel.org.ua/index.php/ru/44-archive/2015-год/37-2/594-37-2-8.html>. – 13.05.2016 г. – Загл. с экрана; **внесок автора:** розробка математичних моделей, передавальних функцій і блок-схем замкнутих систем регулювання частотою обертання, моментом і потужністю підрулюючого пристрою, що залежать від динамічних характеристик судна, що знаходиться під впливом нестабільної роботи гвинта і умов довкілля; **база(и):** Index Copernicus, РИНЦ, Google Академія.

16. Будашко, В. В. Система мониторинга состояния винторулевой колонки для предупреждения эффекта Коанда [Текст] / В. В. Будашко, В. В. Никольский, С. Г. Хнюнин, Ю. А. Накул // Автоматизация судовых технических средств: Науч.-техн. сб. – 2015. – Вып. 21. – Одесса: ОНМА. – С. 22–28; **внесок автора:** параметризація датчиків деградаційних ефектів та способу їх ідентифікації на перетинах енергетичного каналу; **база(и):** Google Академія.

17. Будашко, В. В. Суднова система моніторингу для попередження ефекту Коанда [Текст] / В. В. Будашко, В. В. Нікольський, С. Г. Хнюнін // Патент UA на корисну модель № 100819, 2015. Режим доступа: \WWW/ URL:<http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=215069>. – 16.05.2016 р. – Загол. з екрану; **внесок автора:** розробка принципу інтеграції датчиків із судновою системою розподілу потужності.

18. Будашко, В. В. Удосконалення системи управління підрулюючим пристроєм комбінованого пропульсивного комплексу [Текст] / В. В. Будашко, О. А. Онищенко / Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 38 (1081). – С. 45–51. Режим доступа: \WWW/ URL:<http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/13378>. – 16.05.2016 р. – Загол. з екрану; **внесок автора:** розробка методу побудови систем управління підрулюючими пристроями комбінованого пропульсивного комплексу; **база(и):** Google Академія.

19. Будашко, В. В. Физическое моделирование многофункционального пропульсивного комплекса [Текст] / В. В. Будашко, О. А. Онищенко, Е. А. Юшков // Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса). Технічні науки. – 2014. – №. 2. – С. 88–92. Режим доступу: \www/ URL:http://zbirnyk.vaodessa.org.ua/images/zbirnyk_2/13.PDF. – 13.05.2016 г. – Загл. с экрана; **внесок автора:** визначення критеріїв подібності і розрахунків коефіцієнтів пропорційності в залежності від режимів роботи.

20. Будашко, В. В. Оценка эффективности компенсации деградиционных эффектов в комбинированном пропульсивном комплексе [Текст] / В. В. Будашко // Судовые энергетические установки: научно–технический сборник. Вып. 36. – Одесса: ОНМА, 2015. – С. 15–22. ISSN 1815-6770.

21. Будашко, В. В. Система імпульсно-фазового управління електроприводом суднової гвинто-кермової установки [Текст] / В. В. Будашко, Є. О. Юшков // Патент UA на корисну модель № 108074, 2016. Режим доступу: \WWW/ URL: <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=224863>. – 26.06.2016 р. – Загол. з екрану; **внесок автора:** розробка принципу паралельного імпульсно-фазового управління асинхронним електродвигуном.

Будашко В. В. Оптимизация управления энергетической установкой типа CRP AZIPOD® [Текст] / В. В. Будашко // Автоматизация судовых технических средств. – 2008. - Вып. 14. – С. 8–12. – Режим доступу: \www/ URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/asts_2008_14_4. – 13.05.2016 г. – Загл. с экрана.

22. Глазева, О. В. Аспекти математичного моделювання елементів єдиних електроенергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів [Текст] / О. В. Глазева, В. В. Будашко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2015. – № 42 (1151). – С. 71–75. Режим доступу: \WWW/ URL:<http://pema.khpi.edu.ua/index.php/2079-3944/article/view/55969>. – 16.05.2016 р. – Загол. з екрану; **внесок автора:** спектральний аналіз високої напруги за допомогою додатка *SP Tools* середовища *MatLab/Simulink*.

23. Никольский, В. В. Система мониторинга позиционирования полупогружных плавучих буровых установок [Текст] / В. В. Никольский, В. В. Будашко, С. Г. Хнюнин, Н. Е. Раенко // Судовые энергетические установки: научно-технический сборник. Вып. 35. – Одесса: ОНМА, 2015. – С. 137–142. ISSN 1815-6770; **внесок автора:** розробка стратегії застосування реєстраційних елементів на лініях валопроводів пропульсивних комплексів.

24. Хнюнин, С. Г. Судовая система мониторингу для попередження ефекту Коанда [Текст] / С. Г. Хнюнин, В. В. Никольский, В. В. Будашко // Патент UA на корисну модель № 107006, 2016. Режим доступу: \WWW/ URL: <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=223437>. – 3.06.2016 р. – Загол. з екрану; **внесок автора:** розробка конструкції закріплення датчиків на лінії гребного гвинта.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

25. Будашко, В. В. Комп'ютерне моделювання багаторівневого перетворення електроенергії допоміжної гребної енергетичної установки [Text] / В. В. Будашко // Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю "Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів (ПАЕТЗ-2007)". – Миколаїв: НУК. – 2007, С. 27–32.

26. Budashko, V. V. DMI-Models in Modeling of Power Condition in PWM-Propulsion [Text] / V. V. Budashko // // 2nd International Conference on Inductive modeling (ICIM 2008): Proceedings. – Kyiv, Ukraine: Укр. ІНТЕІ. – 2008, С. 279–280. Режим доступу: \WWW/ URL: <http://www.mgua.irtc.org.ua/attach/ICIM-IWIM/2008/3.5.2%20.pdf>. – 16.05.2017 р. – Загол. з екрану.

27. Будашко, В. В. Оптимизация управления энергетической установкой типа **CRP** AZIPOD® [Text] / В. В. Будашко // // XV Международная конференция по автоматическому управлению (Автоматика-2008): Доклады. – Одеса: ОНМА, 2008, С. 84–86.

28. Будашко, В. В. Моделювання режимів роботи суднових дизель-електричних пропульсивних комплексів [Text] / В. В. Будашко, П. Г. Солойденко, В. С. Свинобій // Сучасні проблеми суднової енергетики – 2008 // Матеріали наукової конференції професорсько-викладацького складу та курсантів. Одеса: ОНМА, 2008, С. 148–150; **внесок автора**: проведення інформаційного пошуку, складання математичної моделі та перевірка її адекватності.

29. Будашко, В. В. Лабораторна установка для дослідження режимів роботи електроприводів суднових пропульсивних комплексів [Text] / В. В. Будашко, Юшков Є. О. // Сучасні проблеми суднової енергетики – 2008 // Матеріали наукової конференції професорсько-викладацького складу та курсантів. Одеса: ОНМА, 2008, С. 124–126; **внесок автора**: постановка задачі дослідження, розробка схеми лабораторної установки.

30. Будашко, В. В. Применение натуральных испытаний при расчёте параметров моделирования пропульсивных комплексов **CRP** AZIPOD® [Text] / В. В. Будашко // Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту – ISDMCI'2008 // Матеріали міжнародної наукової конференції / т.2 (частина 1): Аналіз і моделювання складних систем і процесів. Євпаторія: ХНТУ, 2008, С. 37–41. Режим доступу: \WWW/ URL: <http://isdmc.org.ua/modules/smartsection/item.php?itemid=16>. – 16.05.2017 р. – Загол. з екрану.

31. Budashko, V. V. Physical model of degradation effect by interaction azimuthal flow with hull of ship [Text] / V. V. Budashko, V. V. Nikolskyi, O. A. Onishchenko, S. N. Khniunin // Proceeding Book of International conference on engine room simulators (ICERS12). – Istanbul, Istanbul Technical University, Maritime Faculty, 2015. – P. 49–53. ISBN: 978-605-01-0782-1. Режим доступа: \www/ URL: <http://www.maritime.itu.edu.tr/icers12/program.htm>. – 13.05.2016 г. –

Загл. с экрана; **внесок автора:** розробка стратегії визначення деградаційних ефектів на лініях потоків гребних гвинтів.

32. Nikolskyi, V. The monitoring system of the [Coanda effect](http://www.maritime.itu.edu.tr/icers12/program.htm) for the tension-leg platform's [Text] / V. Nikolskyi, V. Budashko, S. Khniunin // Proceeding Book of International conference on engine room simulators (ICERS12). – Istanbul, Istanbul Technical University, Maritime Faculty, 2015. – P. 45–49. ISBN: 978-605-01-0782-1. Режим доступа: \www/ URL: <http://www.maritime.itu.edu.tr/icers12/program.htm>. – 13.05.2016 г. – Загл. с экрана; **внесок автора:** розробка технології інтегрування датчиків реєстрації деградаційних ефектів у суднову систему моніторингу.

33. Будашко, В. В. Исследование процессов передачи мощности в комбинированном пропульсивном комплексе при разновекторных нагрузках [Текст] / В. В. Будашко, И. М. Тарасов // Актуальні питання суднової електротехніки і радіотехніки // Матеріали науково–методичної конференції, 11.12.2013 – 12.12.2013. – Одеса: ОНМА, 2014, С. 49–52; **внесок автора:** постановка проблеми, визначення основних критеріїв, розробка математичних моделей СЕУ КПК.

34. Будашко, В. В. Моделирование систем управления мощностью и крутящим моментом подруливающих устройств при позиционировании судов [Текст] / В. В. Будашко, Д. А. Гончаренко // Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта (ISDMCI'2014): Материалы международной научной конференции. – Херсон: ХНТУ, 2014. С. 59–61. ISBN 978-966-8912-90-0; **внесок автора:** розробка стратегії управління підрулюючим пристроєм з вентиляторною характеристикою на валу на основі регулювання потужності, яка відповідає значенню обертаючого моменту.

35. Будашко, В. В. Моделирование элементов судовой энергетической установки для исследования режимов работы пропульсивного комплекса [Текст] / В. В. Будашко, И. М. Тарасов // Сучасні проблеми морського транспорту та безпека мореплавства // Матеріали III Всеукраїнської студентської наукової конференції, м. Херсон, 21 листопада 2013 року). – Херсон: Видавництво ХДМА, 2013, С. 277–279; **внесок автора:** визначення структури математичної моделі та розрахунок її параметрів.

36. Будашко, В. В. Моделирование электродинамических процессов в комбинированном пропульсивном комплексе при удержании позиции [Текст] / В. В. Будашко, С. О. Юшков // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2012) // Збірка матеріалів четвертої Міжнародної науково–практичної конференції у двох томах, т.2. Херсон: ХДМА, 2012, С.10–12; **внесок автора:** визначення критеріїв адекватності розробленої математичної моделі реальному об'єкту.

37. Будашко, В. В. Моделирование энергетических процессов у пропульсивном комплексе с асинхронным двигателем на линии вала [Текст] / В. В. Будашко, С. О. Юшков // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці. Матеріали першої науково-технічної конференції, присвяченої 90-річчю НУК ім. адмірала Мака-

рова. Миколаїв: НУК, 2010, С. 48–51; **внесок автора:** розрахунок параметрів асинхронного двигуна, визначення структури математичної моделі, імітаційне моделювання.

38. Будашко, В. В. Моделювання перехідних процесів у дизель-електричному комплексі з малообертовим дизелем і асинхронним двигуном на лінії валу рушія [Текст] / В. В. Будашко, Є. О. Юшков // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2010). Збірка матеріалів другої Міжнародної науково-практичної конференції у двох томах, т.2. Херсон: ХД-МА, 2010, С.77–80; **внесок автора:** параметризація електричних компонентів математичної моделі, перевірка адекватності.

39. Будашко, В. В. Параметризація потужних електричних машин при моделюванні суднових пропульсивних комплексів [Текст] / В. В. Будашко // Наука в інформаційному просторі // Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції у восьми томах ISBN 978-617-645-140-2. – Дніпропетровськ: Біла К.О. – с. 80–83. Режим доступу: \WWW/ URL:http://www.confcontact.com/2013-nauka-v-informatsionnom-prostranstve/tn9_budashko.htm. – 16.05.2016 р. – Загол. з екрану.

40. Будашко, В. В. Повышение энергетической эффективности холодильных установок средствами автоматизированного управления [Текст] / В. В. Будашко, О. А. Онищенко // Энергетика судна: експлуатація та ремонт // Матеріали науково-технічної конференції, 26.03.2014 – 28.03.2014. Частина II. – Одеса: ОНМА, 2014, С. 11–13; **внесок автора:** розробка принципів підвищення енергетичної ефективності та визначення критеріїв її перевірки.

41. Будашко, В. В. Приближення експериментальних даних при моделюванні енергетичних установок суднових пропульсивних комплексів [Текст] / В. В. Будашко, І. М. Тарасов // Суднова енергетика: стан та проблеми // Міжнародна науково-технічна конференція. – Миколаїв, НУК: 13.11.2013 – 14.11.2013. Режим доступу: \WWW/ URL:<http://conference.nuos.edu.ua/catalog/lectureDetail.jsessionid=49cf5fce4a72d37c93736df1794b?lectureId=25553&conferenceId=19994&isProjectorView=false>. – 16.05.2016 р. – Загол. з екрану; **внесок автора:** постановка проблеми, визначення напрямків її вирішення, створення умов для перевірки результатів дослідження.

42. Будашко, В. В. Применение результатов натурных испытаний при моделировании энергетических установок комбинированных пропульсивных комплексов [Текст] / В. В. Будашко, Е. А. Юшков // European Conference on Innovations in Technical and Natural Sciences. The 8th International scientific conference proceedings (July 22, 2015). – Vienna: «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH. – 2015. – Р. 89–96. Режим доступу: \WWW/ URL:<http://elibrary.ru/item.asp?id=24015711>. – 16.05.2016 р. – Загол. з екрану; **внесок автора:** постановка експерименту, розробка стратегії проведення експерименту, визначення критеріїв перевірки результатів.

43. Будашко, В. В. Проблеми технічної експлуатації суднової енергетичної установки бурового судна [Текст] / В. В. Будашко, О. А. Онищенко // Енергетика судна: експлуатація та ремонт // Матеріали науково-технічної конференції, 26.03.2014 – 28.03.2014. Частина II. – Одеса: ОНМА, 2014, С. 9–11; **внесок автора:** аналіз літературних джерел та патентний пошук, визначення основних напрямків вирішення зазначеної проблеми.

44. Гончаренко, Д. А. Моделирование систем управления мощностью и крутящим моментом подруливающих устройств при позиционировании судов [Текст] / Д. А. Гончаренко, В. В. Будашко // Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта (ISDMCI'2014). Материалы междунар. науч. конф. – Херсон: ХНТУ. – 2014. – С.59–61; **внесок автора:** на підставі аналізу систем позиціонування обрано математичний апарат для моделювання систем управління потужністю.

45. Дерменжи, В. В. Дослідження дестабілізаційних процесів у дводвигуновому електроприводі вантажно-розвантажувальної системи рефрижераторного судна [Текст] / В. В. Дерменжи, В. В. Будашко // Матеріали науково-методичної конференції «Актуальні питання суднової електротехніки і радіоелектроніки», 15.12.2015 – 16.12.2015, – Одеса: НУ ОМА, 2016, С. 62–66; **внесок автора:** розробка методу удосконалення математичних моделей багатомасових електроприводів.

46. Слободянюк, І. С. Ідентифікація маркерів деградаційних ефектів на лініях потоків гребних гвинтів комбінованого пропульсивного комплексу [Текст] / І. С. Слободянюк, В. В. Будашко // Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 11 – 12 квітня 2017 р. – Кременчук, КрНУ, 2017. – С. 84–85. ISSN 2079-5106. Режим доступу: \WWW/ URL: http://esmo.kdu.edu.ua/publ/ESMO_2017.pdf. – 3.5.2017 р. – Загол. з екрану; **внесок автора:** розробка методу удосконалення існуючого гідродинамічного інструментарію визначення деградаційних ефектів.

Анотація

Будашко В. В. Підвищення ефективності функціонування суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту (0701 – транспорт і транспортна інфраструктура). – Національний університет «Одеська морська академія»), Одеса, 2017.

Ця докторська дисертація являє сукупність нових ідей, методів і результатів досліджень, пов'язаних з підвищенням ефективності функціонування суднових енергетичних установок (СЕУ) комбінованих пропульсивних комплексів (КПК). Головною мотивацією цих досліджень є існуючі на сьогоднішній день запити практики в галузі експлуатації СЕУ КПК і наявність невирішених про-

блем на лініях гребних гвинтів, в системах живлення двигунів підрулюючих пристроїв (ПП) і системах розподілу потужності.

У результаті інформаційного пошуку була сформульована комплексна задача дослідження: розробка система підтримки прийняття рішень (СППР) для проектування, дослідження і удосконалення СЕУ КПК, що складається з трьох головних завдань: розробки системи моніторингу деградаційних ефектів на лініях гребних потоків двигунів із ідентифікацією відповідних маркерів, розробки стратегії всережимних регуляторів потужності, моменту і частоти обертання електродвигунів ПП КПК і розробки методології побудови багатокритеріальних стратегій управління розподілом потужності СЕУ КПК.

Підсумком вирішення комплексної та головних задач стали: синтез трирівневої багатокритеріальної стратегії управління розподілом енергії у гібридній СЕУ КПК; розробка СППР для автоматизації і комп'ютеризації процесів проектування, дослідження і експлуатації СЕУ КПК; побудова фізичної моделі багато-функціонального КПК зі змінною структурою; встановлення закону пульсацій упорів на лініях валів гребних гвинтів протилежного обертання (ГПО, *CRP*) в умовах їх взаємодії між собою і корпусом КПК; розробка принципу формування інваріантного до збурення керування моментом ПП СЕУ КПК з урахуванням ситуаційних чинників експлуатаційного режиму; розробка спрощеної напівемпіричної методики ітераційної прогресивно-регресивної параметризації СЕУ КПК на непроектних режимах експлуатації; розробка розрахункового методу, що дозволяє із достатньою точністю оцінювати значення упорів і моментів рушіїв *азимутального ПП* в широкому діапазоні експлуатаційних режимів і кутів відхилення потоків внаслідок дії деградаційних ефектів.

Ключові слова: суднова енергетична установка, комбінований пропульсивний комплекс, деградаційний ефект, ефективність, функціональність, система підтримки прийняття рішень.

Аннотация

Будашко В. В. Повышение эффективности функционирования судовых энергетических установок комбинированных пропульсивных комплексов.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.20 – эксплуатация и ремонт средств транспорта (0701 – транспорт и транспортная инфраструктура). – Национальный университет «Одесская морская академия», Одесса, 2017.

Эта докторская диссертация представляет совокупность новых идей, методов и результатов исследований, связанных с повышением эффективности функционирования судовых энергетических установок (СЭУ) комбинированных пропульсивных комплексов (КПК). Главной мотивацией этих исследований являются существующие на сегодняшний день запросы практики в области эксплуатации СЭУ КПК и наличие нерешенных проблем на линиях гребных

винтов, в системах питания двигателей подруливающих устройств (ПУ) и системах распределения мощности.

В результате информационного поиска была сформулирована комплексная задача исследования: разработка система поддержки принятия решений (СППР) для проектирования, исследования и усовершенствования СЭУ КПК, состоящая из трех главных задач: разработка системы мониторинга деградационных эффектов на линиях гребных потоков двигателей с идентификацией соответствующих маркеров, разработка стратегии всережимных регуляторов мощности, момента и частоты вращения электродвигателей ПУ КПК и разработка методологии построения многокритериальных стратегий управления распределением мощности СЭУ КПК.

Итогом решения комплексной и главных задач стали: синтез трехуровневой многокритериальной стратегии управления распределением энергии в гибридной СЭУ КПК; разработка СППР для автоматизации и компьютеризации процессов проектирования, исследования и эксплуатации СЭУ КПК; построение физической модели много-функционального КПК с переменной структурой; установление закона пульсаций упоров на линиях валов гребных винтов противоположного вращения в условиях их взаимодействия между собой и корпусом КПК; разработка принципа формирования инвариантного к возмущению управления моментом ПУ СЭУ КПК с учетом ситуационных факторов эксплуатационного режима; разработка упрощенной полуэмпирической методики итерационной прогрессивно-регрессивной параметризации СЭУ КПК на непроектных режимах эксплуатации; разработка расчетного метода, позволяющего с достаточной точностью оценивать значение упоров и моментов двигателей азимутальных ПУ в широком диапазоне эксплуатационных режимов и углов отклонения потоков вследствие действия деградационных эффектов.

Ключевые слова: судовая энергетическая установка, комбинированный пропульсивный комплекс, деградационный эффект, эффективность, функциональность, система поддержки принятия решений.

Abstract

Budashko V. Improve the efficiency of ship power plants combined propulsion complexes.

The thesis for the degree of doctor of technical sciences, specialty 05.22.20 – Operation and repair of vehicles (0701 – Transport and transport infrastructure). – National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, 2017.

This doctoral thesis represents a set of new ideas, methods and research results related to improving the efficiency of functioning of ship power plants (SPP) of combined propulsion complexes (CPC). The main motivation for these studies is the existing current practice requests for the operation of the SPP CPC, such as: ensuring minimization of irreversible losses in the transmission of capacities from the SPP to the engines of the CPC; the need to improve the monitoring of the transfer of capacities in the SPP CPC with dynamic principles of retaining the vessel; increasing the

operational reliability and strength of the SPP CPC; creation of new and improvement of existing decision support systems (DSS) during operation, research and design of the SPP CPC.

Based on the analysis of the existing state of the development of the SPP CPC, the following unresolved problems were found on the lines of propellers, in power systems of motors for thrusters and power distribution systems, which can be characterized as follows: reduction of propeller thrust and torque due to water flow perpendicular to the axis of the propeller caused by the flow from the vessel speed or flows from other engines with force in the direction of inflow due to the deflection of the propeller flow. This is often called a cross-combination of resistances; the presence of cavitation for heavy loads on the propellers leads to a reduction in pressure on the blade of the propeller and can occur during a small immersion of the propeller due to the movement of the ship across the waves; sudden drops of thrust and torque with the effect of hysteresis due to the large amplitude of the ship's motion perpendicular to the surface of the water; simultaneous reduction of thrust and change of thrust direction due to interaction of the flow from the thruster to the hull (Coanda effect); loss of the thrust and reduction of thrust caused by the action of the propellant flow from one motor to adjacent motors; limitation of the increase in torque by the inductance of the motor with the prevention of damage to the mechanical part of the electric drive; limitation of the maximum power of the thruster, is taken into account when determining the overload capacity of the electric motor and frequency converter (FC); the absence of a control strategy for the thruster FC based on variable speed governors which provide the transition of consumers, working on a constant power hyperbola, to the torque or speed of rotation control mode; the need for [Dynamic Positioning](#) (DP) systems to meet the quality management requirements encountered during the operational phase; unification of [Power Management System](#) (PMS) in a combination of functions in relation to others similar; the independence of PMS systems components from each other to the level of sensors; not only the reduction in capacity based on the total design load, but also the load of an individual medium speed diesel generator (MSDG); compliance of the system with conditions increasing the load in terms of sufficiency to ensure normal operation in relation to any abnormal mode and non-overloading the ship electric power system (SEPS) in general.

The above problems directly led to the formulation of the main complex research task: the development of a DSS for the design, research and improvement of SPP CPC, consisting of three main tasks: the development of a monitoring system for degradation effects on the lines of propulsion flows of motors with the identification of relevant markers, the development of the strategy for all-mode power controllers, torque controllers and variable speed governors by the electric motors of the CPC thrusters and the development of the methodology for constructing multi-criteria control strategies over power distribution of the SPP CPC.

As a result of solving the main and auxiliary tasks, the following scientific positions were obtained: improvement of the method of computational hydrodynamics is provided by using the distribution of the sought-for intensities of the degradation

effects from the interaction of the propeller flows among themselves and the CPC body due to the use of piezoelectric sensors on the shaft lines of azimuth thruster. Compensation of degradation effects is achieved by calculation of power flows from azimuth thrusters in the form of a power drive disc, which allows identifying turbulent regions with relative vortex viscosity coefficients μ_t/μ_w . Calculation of the components of the x-velocities at the intersection of the propeller flow along the axis of rotation with dimensions in units of the diameter of the DP propeller makes it possible to realize the method of surface-oriented averaging of the Reynolds-Navier-Stokes equation for mass transfer at the interface; limitations on power and torque on the shaft lines of the SPP CPC thruster of dynamically positioning vessels are provided by redistribution of the thrusts between the thrusters or the reduction of the maximum load as part of the algorithm for distributing the thrust of the DP system due to the application of the strategy of full range speed governors in relation to operating conditions; for the first time, a three-level multi-criteria strategy for managing the distribution of energy in the hybrid SPP CPC was developed by integrating the classical strategy of power distribution management with a strategy of control over the state of the MSDG and the degree of charge of the energy storage system alternative generating element. The developed strategy differs from existing by higher speed detection of risk of de-energization of ship electric power system, greater reliability and accuracy in determining the need for load reduction and the thruster speed of rotation fully integrated with variable speed governors and power supply system; for the first time, the DSS was created to study the ways of automating and computerizing the design and operation processes of the SPP CPC, which being based on theoretical, design and experimental methods, has enabled the introduction of a comprehensive substantiation, verification and self-testing of the developed components of the methodological and mathematical apparatus; for the first time, a physical model of a multifunctional CPC with a variable structure was created, which, in synergy with the solution of the problem of DSS development, allows iterative analysis of the structures of the SPP CPC with minimal initial data; the law of pulsations of thrusts on the lines of propeller shafts is established, which occur under conditions of interaction of several thrusters with each other and with the CPC body. In the process of studying the version of the configuration of a CPC with contra-rotating propellers (CRP) it was established that: 1) the rotation of the thruster body leads to the appearance of characteristic recirculation zones and changes in the velocity fields in its disk and differs by an increased degree of flow heterogeneity; 2) the characteristics of the thrust and the torque of the thruster differ significantly depending on the direction of rotation; 3) the pulsation of the propeller thrust of the azimuth thruster sharply increases with its rotation, and the most significant growth in pulsations occurs at the resonant frequencies of the interaction of the propeller flow of the azimuth thruster and the stationary one; the theory of non-stationary interaction of several propellers with each other has been developed, which made it possible to establish for the first time the following facts: 1) rotation of the thruster leads to an increase in the axial and tangential components of the thrusts and torques; 2) the operation of the azimuth thruster at large

angles with respect to the stationary propeller results in the appearance of significant loads on the thruster stock, which can be determinative in terms of the strength of the structural components of the thruster, the presence of deformations of which has been experimentally established and confirmed by calculation. Also, for the first time, the dependencies of the thrusts and torques of the azimuth thruster were determined as a result of the interaction of the propeller flow with the hull and the stock due to the occurrence of degradation effects; for the first time, a simplified semi-empirical method for iterative progressively regressive parameterization of the SPP CPC was developed in off-design operation modes, which generalizes the previously relationship, which have been derived for thrusts and torques of co-axial CPP s in a homogeneous flow with ratios known from the theory of turbomachines for the case of interaction between the stationary propeller and the azimuth thruster. On the basis of this technique, a calculation method has been developed that makes it possible to accurately estimate the value of thrusts and torques of motors for azimuth thrusters in a wide range of operating conditions and the angles of flow deflection due to the influence of degradation effects that are substantially different from the design ones. The necessity to take into account the influence of degradation effects on the lines of propeller shafts in the CRP Azipod® concept has been proved.

Keywords: ship power plants, combined propulsive complex degradation effects, effectiveness, functionality and decision support system

Підп. до друку 15.11.2017. Формат 60х84/16. Папір офсет.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 16,15.
Тираж 100 пр. Зам. № И17-11-53

Національний університет «Одеська морська академія»
65029, м. Одеса, Дідріхсона, 8.
Тел./факс (0482) 34-14-12
publish-r@onma.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 1292 від 20.03.2003