

Міністерство освіти і науки України
Національний університет “Одеська морська академія”

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Будашко Віталій Віталійович

УДК 629.56.064.5+620.9+629.5

ДИСЕРТАЦІЯ

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

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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



(В. В. Будашко)

Науковий консультант:

Онищенко Олег Анатолійович, д.т.н., професор

Одеса – 2017

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 представляє 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 (див. [Додаток К, Рис. К.1](#)) у галузі експлуатації СЕУ [КПК](#), такі як:

- 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 (ДПУ);
- підвищення експлуатаційної надійності і міцності СЕУ [КПК](#);
- створення нових і удосконалення існуючих систем підтримки прийняття рішень ([СППР](#)) під час експлуатації, досліджень і проектування СЕУ [КПК](#).

На підставі аналізу існуючого стану розвитку СЕУ [КПК](#) встановлено наявність наступних невирішених проблем на лініях рушіїв, в системах живлення двигунів [ПП](#) та в системах розподілу потужності, які можна характеризувати наступним чином (див. [Додаток К, Рис. К.1](#)):

- зменшення тяги гвинта і крутного моменту в наслідок надходження води перпендикулярно до осі гребного гвинта, викликане течією від

швидкості судна або 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 (всмоктування повітря) веде до зменшення тиску на лопаті гвинта та може статися під час малого занурення гвинта за рахунок руху судна поперек хвилям;

- 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](#));

- 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](#) [ПП](#), заснованій на всережимних регуляторах, які забезпечують перехід споживачів, що працюють на гіперболі постійної потужності, у режим регулювання моменту або частоти обертання;

- необхідність дотримання систем [DP](#) вимогам менеджменту якості, з якими стикаються на етапі експлуатації;

- уніфікація [PMS](#) у комбінації функцій по відношенню до інших подібних;

- незалежність складових систем [PMS](#) одна від одної навіть до рівня датчиків;

- не тільки зменшення потужності в розрахунку на загальне розрахункове навантаження, але також і навантаження окремого [середньо–обертового дизель–генератору \(СОДГ\)](#);

– відповідність системи умовам збільшення навантаження з точки зору достатності для забезпечення нормальної роботи в залежності від будь-якої ненормального режиму і не перевантажування суднової електроенергетичної системи (СЕЕС) взагалі.

Вищевказані проблеми напряду зумовили формулювання основної комплексної задачі дослідження (див. [Додаток К, Рис. К.1](#)): розробки 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.

В результаті вирішення головних і допоміжних задач (див. [Додаток К, Рис. К.2](#)) отримані 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 судових технологій та застосуванням інтегрального критерію ефективності, що забезпечує підвищення ефективності функціонування СЕУ КПК при варіюванні будь-яких істотних параметрів останніх.

Також 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 всережимними 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 обґрунтування, 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 ефектів 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 енерго-заощаджувальні 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 характеристик 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 розрахунку параметрів СЕУ КПК з подальшим удосконаленням в залежності від певного експлуатаційного режиму;

– запропонована стратегія всережимного регулятора 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 [ДР](#), для досягнення мінімізації втрат енергії з одночасним поліпшенням гармонійного складу напруги суднової електроенергетичної системи;

[До змісту](#)

– 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;

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

Список публікацій здобувача.

1. [226] 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.

2. [239] 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.

3. [228] 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.

4. [242] Будашко, В. В. Оцінка ефективності передачі потужності в судових дизель-електричних комплексах [Text] / В. В. Будашко // Судовые энергетические установки: Научно-технический сборник. – 2007. – №18. – Одесса: ОНМА. С. 21–24.

5. [34] 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. INTEI. – 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.

6. [240] Будашко, В. В. Оптимизация управления энергетической установкой типа **CRP** AZIPOD® [Text] / В. В. Будашко // // XV

[До змісту](#)

Международная конференция по автоматическому управлению (Автоматика-2008): Доклады. – Одесса: ОНМА, 2008, С. 84–86.

7. [238] 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.

8. [230] 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.

9. [247] 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.

10. [32] Budashko, V. Decision support system's concept for design of combined propulsion complexes [Text] / V. Budashko, V. Nikolskyi, O. Onishchenko, S. Khniunin / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – V. 3. – № 8(81). – P. 10–21. Doi:[10.15587/1729-4061.2016.72543](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72543).

11. [33] 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).

12. [36] Budashko, V. Formalization of design for physical model of the azimuth thruster with two degrees of freedom by computational fluid dynamics methods [Text] / V., Budashko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – V. 3. – № 7(87). – P. 40–49. Doi:[10.15587/1729-4061.2017.101298](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101298).

13. [39] 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).

14. [35] 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).

15. [37] Budashko, V. V. Increasing control's efficiency for the ship's two-mass electric drive [Text] / V. V. Budashko / Electrical engineering & electromechanics. – 2016. – №4. – P. 34–42. Doi:[10.20998/2074-272X.2016.4.05](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.4.05).

16. [38] 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). – P. 17–22. Doi:[10.15276/eltecs.23.99.2016.02](https://doi.org/10.15276/eltecs.23.99.2016.02).

17. [40] 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.

18. [144] Nikolskyi, V. The monitoring system of the [Coanda effect](#) 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.

19. [224] 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).

20. [225] 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).

21. [227] 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.

22. [229] Будашко, В. В. Концепция моделирования и построения электроэнергетической 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.

23. [231] 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.

24. [232] 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.

25. [233] 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.

26. [234] Будашко, В. В. Моделирование элементов судовой энергетической установки для исследования режимов работы пропульсивного комплекса [Текст] / **В. В. Будашко**, І. М. Тарасов // Сучасні проблеми морського транспорту та безпека мореплавства // Матеріали ІІІ Всеукраїнської студентської наукової конференції, м. Херсон, 21 листопада 2013 року). – Херсон: Видавництво ХДМА, 2013, С. 277–279.

27. [235] Будашко, В. В. Моделювання електродинамічних процесів в комбінованому пропульсивному комплексі при утриманні позиції [Текст] / **В. В. Будашко**, Є. 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.

28. [236] Будашко, В. В. Моделювання енергетичних процесів у пропульсивному комплексі з асинхронним двигуном на лінії валу [Текст] / **В. В. Будашко**, Є. О. Юшков // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці. Матеріали першої науково-технічної конференції, присвяченої 90-річчю НУК ім. адмірала Макарова. Миколаїв: НУК, 2010, С. 48–51.

29. [237] 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: ХДМА, 2010, С.77–80

30. [244] Будашко, В. В. Параметризація потужних електричних машин при моделюванні судових 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.

31. [245] 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.

32. [246] 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.

33. [248] 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.

34. [249] Будашко, В. В. Проблеми технічної експлуатації суднової енергетичної установки бурового судна [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. 9–11.

35. [251] 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.

36. [252] 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 доступу: \WWW/ URL:<http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=215069>. – 16.05.2016 р. – Загол. з екрану.

37. [253] 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 доступу: \WWW/ URL:<http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/13378>. – 16.05.2016 р. – Загол. з екрану.

38. [254] 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 екрана.

39. [241] Будашко, В.В. Оценка эффективности компенсации деградационных 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.

40. [250] 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.

41. [243] 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.

42. [256] 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.

43. [257] 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.

44. [258] 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.

45. [223] 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.

46. [262] 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.

47. [264] Хнюнін, С. Г. Суднова система моніторингу для попередження ефекту Коанда [Текст] / С. Г. Хнюнін, В. В. Нікольський, **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.

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

[До змісту](#)

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.

Анотація	2
Abstract	17
Зміст.....	22
Перелік умовних скорочень.....	27
Список рисунків	39
Список таблиць	46
Вступ.....	47
РОЗДІЛ 1. СУДНОВІ ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ КОМБІНОВАНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ: АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ І СТАН РОЗВИТКУ НАУКОВО-ПРИКЛАДНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	62
1.1. Сучасні концепції енерго-заощаджувальних технологій у транспортній галузі.....	62
1.2. Проблеми побудови єдиних електроенергетичних систем і розвиток теорії і методів дослідження експлуатаційних режимів з урахуванням ситуаційних чинників технологічного процесу.....	78
1.3. Розвиток теорії багатоконтурних систем управління активними засобами утримання судна у заданій позиції.....	86
1.4. Етапи підвищення ефективності функціонування в залежності від експлуатаційного режиму	90
1.5. Стан розвитку систем підтримки прийняття рішень у галузях проектування та дослідження	93
1.6. Висновки до розділу.....	98
РОЗДІЛ 2. СТРУКТУРИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК КОМБІНОВАНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ.....	102
2.1. Обґрунтування тематики дисертаційних досліджень.....	102

2.2. Декомпозиційна систематизація процесу дослідження	106
2.3. Принципи декомпозиції енергетичних процесів з урахуванням коефіцієнтів енергоефективності, ситуаційних чинників і маркерів деградаційних ефектів.....	109
2.4. Формулювання вимог до способів дослідження процесів передачі потужності	117
2.5. Висновки до розділу.....	119
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ДЕГРАДАЦІЙНИХ ЕФЕКТІВ НА ЛІНІЯХ ГРЕБНИХ ПОТОКІВ РУШІВ ІЗ ІДЕНТИФІКАЦІЄЮ ВІДПОВІДНИХ МАРКЕРІВ.....	123
3.1. Розширення масиву даних щодо досвіду експлуатації СЕУ КПК в різних експлуатаційних умовах.....	123
3.2. Аналіз методів реєстрації деградаційних ефектів на перетинах енергетичних потоків	125
3.3. Визначення ймовірно-статистичних параметрів розподілів навантажень та аналіз етапів застосування методів обчислювальної гідродинаміки.....	128
3.4. Формалізація фізичної моделі с урахуванням ситуаційних факторів довкілля і ідентифікаційних чинників експлуатаційних режимів..	137
3.5. Ітераційна координація оцінювання експлуатаційних режимів....	141
3.6. Моніторинг енергетичних процесів при застосування альтернативних джерел живлення	145
3.7. Висновки до розділу.....	151
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТРАТЕГІЇ ВСЕРЕЖИМНИХ РЕГУЛЯТОРІВ ПОТУЖНІСТЮ, МОМЕНТОМ ТА ЧАСТОТОЮ ОБЕРТАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ ПІДРУЛЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ КОМБІНОВАНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ.....	153
4.1. Удосконалення математичного апарату при моделюванні енергетичних процесів в різних експлуатаційних режимах	153
4.2. Принципи систематизації рівнянь різних технологічних процесів	156

4.3. Формалізація принципу декомпозиції енергетичних процесів у експлуатаційному режимі по ситуаційним чинникам	164
4.4. Синтез математичних моделей всережимних регуляторів	167
4.5. Визначення принципів формування управління інваріантного до збурення з урахуванням ситуаційних чинників експлуатаційного режиму ..	177
4.6. Удосконалення стратегії керування багатомасовими електромеханічними системами.....	180
4.7. Експериментальні дослідження методів визначення навантажень за результатами модельних випробувань	187
4.8. Висновки до розділу	192
РОЗДІЛ 5. МЕТОДОЛОГІЯ ПОБУДОВИ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИХ СТРАТЕГІЙ УПРАВЛІННЯ РОЗПОДІЛОМ ПОТУЖНОСТІ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ КОМБІНОВАНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ.....	195
5.1. Забезпечення динамічних показників якості процесів передачі енергії в умовах різновекторних навантажень.....	195
5.2. Визначення критеріїв застосування стратегій управління енергоспоживанням	197
5.3. Методика створення математичних моделей електроенергетичних систем з багатошінними конструкціями.....	199
5.4. Удосконалення системи контролю та управління енергетичними процесами	203
5.5. Синтез багатокритеріальної тривірневої стратегії управління розподілом потужності.....	207
5.6. Моделювання і дослідження процесів заощаджування енергії.....	211
5.7. Експериментальні дослідження енергетичних процесів в різних експлуатаційних режимах	218
5.8. Висновки до розділу	223

РОЗДІЛ 6. МЕТОДОЛОГІЯ РОЗРОБКИ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ПРОЕКТУВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННІ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК КОМБІНОВАНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ.....	226
6.1. Формулювання і об'єднання критеріїв вибору рішень	226
6.2. Об'єднання експертних систем при проектуванні	232
6.3. Синтез розрахункових методів визначення параметрів навантажень і джерел живлення	234
6.4. Підтримка функціональної відповідності процесів задачам проектування	237
6.5. Технологія реалізації СППР з урахуванням інтелектуальних, поведінкових і когнітивних обмежень ЛПР	241
6.5.1. Одноканальні СМО з очікуванням.....	252
6.5.2. Багатоканальні СМО.	258
6.6. Дослідження ефективності управління при різних режимах функціонування.....	267
6.7. Комп'ютерне моделювання конфігурацій ПП з урахуванням типізації технологічного процесу	274
6.8. Емпіричний метод оцінки якості проектування і прийняття рішення	282
6.9. Результати оцінки якості модельного проектування.....	292
6.10. Висновки до розділу.....	301
ВИСНОВКИ	307
Предметний покажчик.....	313
Список використаних джерел.....	320
Додаток А. Акти впровадження результатів досліджень та документи, що підтверджують практичну цінність отриманих результатів	334
Додаток Б. Тактико-технічні характеристики досліджувальних суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів	347
Б.1. Тактико-технічні характеристики судна типу Supply Vessel	373

Б.2. Тактико-технічні характеристики бурового судна	376
Б.3. Схемні та конструктивні рішення комбінованих (гібридних) пропульсивних комплексів	378
Додаток В. Приклади файлів комп'ютерних моделей елементів суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів.....	381
В.1. m-файл ідентифікації параметрів судна типу Supply Vessel, що знаходиться у режимі динамічного позиціонування.....	381
В.2. m-файл ідентифікації параметрів бурового судна, що знаходиться у режимі динамічного позиціонування.....	382
В.3. m-файл ідентифікації параметрів багатоцільового судна, що знаходиться у режимі динамічного позиціонування.....	383
В.4. m-файл ідентифікації параметрів нафтової платформи.....	386
Додаток Г. Результати моделювання енергетичних процесів у СЕУ КПК на лініях гребних гвинтів методами обчислювальної гідродинаміки	393
Додаток Д. Протокол моніторингу ідентифікаційних параметрів і ситуаційних чинники СЕУ КПК	394
Додаток Е. Фізичне моделювання багатофункціонального пропульсивного комплексу	396
Додаток Ж. Схемні рішення комбінованих (гібридними) пропульсивних комплексів.....	397
Додаток З. Порівняльні результати моделювання енергетичних процесів при передачі потужності у СЕУ КПК	409
Додаток И. Система підтримки прийняття рішень при дослідженні і розробці суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів	413
Додаток К. Технологічна карта дослідження.....	414
Додаток Л. Результати корегування конструктивного коефіцієнту енергоефективності	416
Додаток М. Системна структуризація процесу дослідження.....	420

Перелік умовних скорочень

Скорочення, терміни, позначення	Пояснення
<i>AD</i>	<i>Actuator Disk</i>
<i>AHTS</i>	<i>Anchor–handling Tug/Supply</i>
<i>AHV</i>	<i>Anchor Handling Vessel</i>
<i>ASK</i>	<i>Automatic Station Keeping</i>
<i>AVR</i>	<i>Automatic Voltage Regulator</i>
<i>Azipod®</i>	<i>Electric podded azimuth thruster produced by ABB Group</i>
<i>Azipul</i>	<i>Rolls–Royce plc azimuthing pulling propeller</i>
<i>CAHV</i>	<i>Construction anchor handling vessel</i>
<i>CFD</i>	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
<i>CLV</i>	<i>Cable laying vessel</i>
<i>Contaz®</i>	<i>Rolls–Royce plc azimuth thruster with contra–rotating propellers</i>
<i>CPICS</i>	<i>Classical PI control strategy with SOC's regulation</i>
<i>CPP</i>	<i>A controllable–pitch propeller or variable–pitch propeller is a type of propeller</i>
<i>CPP</i>	<i>Controllable Pitch Propeller</i>
<i>CRP</i>	<i>Contra–rotating propeller</i>
<i>CRP Azipod®</i>	<i>Propulsion Concept</i>
<i>CSD</i>	<i>Cutter Suction Dredger</i>
<i>DC–link</i>	<i>Direct current link</i>
<i>DEPV</i>	<i>Diesel–electric Passenger Vessel</i>
<i>DMS</i>	<i>Data Management System</i>
<i>DP</i>	<i>Dynamic Positioning</i>
<i>DSLCCM</i>	<i>Digital Synchronizer and Load Control Module</i>
<i>DSS</i>	<i>Decision Support System</i>
<i>DTC</i>	<i>Direct Torque Control</i>
<i>ECMS</i>	<i>Equivalent consumption minimization strategy</i>
<i>EDLC</i>	<i>Electric double–layer capacitor</i>
<i>EEDI</i>	<i>Energy Efficiency Design Index</i>
<i>EEMS</i>	<i>External energy maximization strategy with SOC's regulation</i>

Скорочення, терміни, позначення	Пояснення
<i>EEOI</i>	<i>Energy Efficiency Operational Index</i>
<i>EMDEC</i>	<i>Electro–Motive Diesel Engine Control system</i>
<i>EMS</i>	<i>Energy Management System</i>
<i>ESS</i>	<i>Energy Storage System</i>
<i>FACTS</i>	<i>Flexible Alternative Current Transmission Systems</i>
<i>Fanbeam®</i>	<i>DP reference system</i>
<i>FDSMCS</i>	<i>Frequency decoupling and state machine control strategy with SOC's regulation</i>
<i>FMEA</i>	<i>Failure modes and effects analysis</i>
<i>FPP</i>	<i>A fixed–pitch propeller is a type of <i>propeller</i></i>
<i>FRV</i>	<i>Fisheries research vessel</i>
<i>GNSS</i>	<i>Global Navigation Satellite System</i>
<i>HART</i>	<i>Highway Addressable Remote Transducer Protocol</i>
<i>ICE–HICE</i>	<i>Mermaid podded propulsors ICE and HICE produced by Rolls–Royce plc</i>
<i>IMO</i>	<i>International Maritime Organization</i>
<i>K–POS</i>	<i>Single Dynamic Positioning system</i>
<i>LCI</i>	<i>Load Commutated Inverter</i>
<i>L–Drive</i>	<i>An L–drive is a type of <i>azimuth thruster</i> in which the pod–mounted propellers</i>
<i>LFC</i>	<i>Live Fish Carrier</i>
<i>LNG</i>	<i>Liquefied natural gas</i>
<i>LNGCF</i>	<i>LNG Car Ferry</i>
<i>MARPOL</i>	<i>International Convention for the Prevention of Pollution from Ships</i>
<i>Mermaid™</i>	<i>Electric podded <i>azimuth thruster</i> produced by Rolls–Royce plc</i>
<i>MGTV</i>	<i>Multipurpose Geotechnical & Soil Investigation Vessel</i>
<i>MOV</i>	<i>Multipurpose Offshore Vessel</i>
<i>MRSV</i>	<i>Multipurpose field & ROV Support Vessel</i>
<i>OCV</i>	<i>Offshore Construction Vessel</i>

Скорочення, терміни, позначення	Пояснення
ORV	<i>Oceanographic Research Vessel</i>
OSCV	<i>Offshore Subsea Construction Vessel</i>
PCT	<i>Product/Chemical Tankers</i>
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
PMR	<i>Power Management Relay</i>
PMS	<i>Power Management System</i>
PST	<i>Purse Seiner/Pelagic Trawler</i>
PT	<i>Power Transducers</i>
PUSH	<i>Mermaid Push podded propulsors produced by Rolls–Royce plc</i>
PVGS	<i>Photovoltaic (PV) generation system</i>
RANS	<i>Reynolds–averaged Navier–Stokes</i>
RBU	<i>Resistor back unit</i>
ReFRESCO	<i>Reliable&Fast Rans Equations (solver for) Ships, Cavitation (and) Offshore</i>
Rolls–Royce	<i>Rolls–Royce Marine Power Operations Limited, a subsidiary of Rolls–Royce plc</i>
RO-RO	<i>Roll-on/Roll-off ships</i>
ROV	<i>Remotely operated underwater vehicle</i>
RPU	<i>Redundant Power Management Processors Unit</i>
SBV	<i>Stand-by and Guard Vessels</i>
SEEMP	<i>Ship Energy Efficiency Management Plan</i>
SFC	<i>Specific fuel consumption</i>
<i>Ships CPC</i>	<i>Ships Combined Propulsion Complexes – Система підтримки прийняття рішень, що розроблена у рамках науково–дослідної держбюджетної роботи «Концепції, технології та напрямки удосконалення суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів» Національного університету «Одеська морської академія» (державний реєстраційний номер 0114U000340).</i>
SLS	<i>Seabed Logging Ship</i>
SMCS	<i>State machine control strategy</i>
SOC	<i>State-of-Charge</i>

Скорочення, терміни, позначення	Пояснення
SPAR	<i>Single Point mooring And Reservoir</i>
SPU	<i>Signal Processing Unit</i>
SRV	<i>Seismic Research Vessel</i>
SWATH	<i>Small Waterplane Area Twin Hull</i>
Swing–UP	<i>Rolls–Royce plc swing–up/combi thrusters type</i>
THD	<i>Total harmonic distortion</i>
TLP	<i>Tension–leg platform</i>
TML	<i>Twin Marine Lifter</i>
TT–PM	<i>The Permanent magnet tunnel thruster produced by Rolls–Royce plc</i>
UL	<i>Rolls–Royce plc retractable azimuth thruster type</i>
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
VFD	<i>Variable Frequency Drive</i>
VSD	<i>Variable Speed Drives</i>
VSI	<i>Voltage source inverter</i>
VSP	<i>Variable Speed Pumping</i>
WSCC	<i>Western System Coordinating Council</i>
Z–Drive	<i>Is a type of marine propulsion unit. Specifically, it is an azimuth thruster</i>
EKEE	Експлуатаційний коефіцієнт енергоефективності
АГРК	Азимутально гвинто–рульова колонка
АД	Асинхронний двигун
АДГ	Аварійний дизель–генератор
АДЕ	Альтернативне джерело енергії
АДЛ	Азимутальний двигун лівого борту
АДП	Азимутальний двигун правого борту
АПП	Азимутальний підрулюючий пристрій
АЦП	Аналого–цифровий перетворювач
АЧХ	Амплітудно–частотна характеристика

Скорочення, терміни, позначення	Пояснення
ВПП	Висувний підрулюючий пристрій
ВРП	Вантажно-розвантажувальний процес
ГЕД	Гребний електродвигун
ГЛОНАСС	Глобальна навігаційна супутникова система
ГПО	Гвинт протилежного обертання
ГРК	Гвинт регульованого кроку
ГРЩ	Головний розподільний щит
ГРЩ ВН	Головний розподільний щит високої напруги
ГРЩ НН	Головний розподільний щит низької напруги
ГСА	Головний силовий агрегат
ГФК	Гвинт фіксованого кроку
ДАУ	Дистанційне автоматичне управління
ДЕПК	Дизель-електричний пропульсивний комплекс
ДКПА	Дистанційно-керований підводний апарат
ДПУ	Динамічний принцип утримання
ДФА	Динамічний функціональний аналог
ДФЕ	Дробовий факторний експеримент
ІН	Інвертор напруги
ККД	Коефіцієнт корисної дії
ККЕЕ	Конструктивний коефіцієнт енергоефективності
КПК	Комбінований пропульсивний комплекс
КПП	Кормовий підрулюючий пристрій
ЛПР	Людина, що приймає рішення
ЛІАБ	Літій-іонна акумуляторна батарея
МАРПОЛ	Міжнародна конвенція по запобіганню забруднення з суден
МВ	Машинне відділення
МНК	Метод найменших квадратів
НЗБУ	Напівзанурювальна бурова установка
НЗШО	НЗШО – Насос зі змінною швидкістю обертання
НПП	Носовий підрулюючий пристрій
ОАК	Об'єкт автоматичного керування

Скорочення, терміни, позначення	Пояснення
ПАК	Пристрій автоматичного керування
ПВП	Питома витрата палива
ПІД	Пропорційно–інтегрально–диференціальний
ПК	Персональний комп'ютер
ПП	Підрулюючий пристрій
ППН	Перетворювач постійної напруги
ПТМ	Підйомно–транспортний механізм
ПУЕЕС	План управління енергоефективністю судна
ПФЕ	Повний факторний експеримент
ПЧ	Перетворювач частоти
РЩ	Розподільний щит
САК	Система автоматичного керування
САР	Система автоматичного регулювання
САРН	Система автоматичного регулювання напруги
СГЕ	Сонячний генеруючий елемент
СД	Синхронний двигун
СЕЕС	Суднова електроенергетична система
СЕУ	Суднова енергетична установка
СІФК	Система імпульсно–фазового керування
СК	Система керування
СКРЕЕ	Система керування розподіленням електроенергії
СНЕ	Система накопичення енергії
СОГГ	Середньо-обертовий газо-генератор
СОДГ	Середньо–обертовий дизель–генератор
СП	Споживач
СПБУ	Самопідйомна бурова установка
СПГ	Скrapлений природний газ
СППР	Система підтримки прийняття рішень
СТС	Складна технологічна система
ФЗП	Функціонально–закінчена підсистема

Скорочення, терміни, позначення	Пояснення
ШІМ	Широтно–імпульсна модуляція
<i>Характеристики комбінованих пропульсивних комплексів та їх компонентів</i>	
v_s (4.16)	Абсолютна швидкість судна, [м/с]
λ (H_p) (4.14)	Відносний крок гвинта, [в.о.]
Δ_s	Водотоннажність судна, [т]
A_E/A_0 (Рис. 4.2)	Дискове співвідношення гвинта
D_p (4.14)	Діаметр гвинта, [м]
l_s, l_m (6.8)	Довжина, [м], відповідно (s) – судна і (m) – моделі судна
K_{EKEE} (1.3)	Експлуатаційний коефіцієнт енергоефективності транспортної стратегії
k_{TR} (6.37)	Кількість (номер) підруючих пристроїв
k_p	Кількість гвинтів
Z	Кількість лопатей гвинта
f_Δ (1.2)	Коефіцієнт водотоннажності судна
t_s (4.16)	Коефіцієнт горизонтального утримання, [в.о.]
f_{eff} (1.11)	Коефіцієнт доступності інноваційних технологій енергоефективності
f_{degr} (1.12)	Коефіцієнт доступності технології компенсації деградаційних ефектів
f_j (1.10)	Коефіцієнт коригування елементів конструкції судна
f_c (1.2)	Коефіцієнт коригування коефіцієнту водотоннажності судна
K_F (4.14)	Коефіцієнт моменту гвинта, [в.о.]
w_s (4.14)	Коефіцієнт попутного потоку, [в.о.]
K_T (4.14)	Коефіцієнт упору гвинта, [в.о.]
f_w (1.2)	Коефіцієнт фактору погоди
$K_{KKEE(DP)}$ (1.2)	Конструктивний коефіцієнту енергоефективності технології DP
$K_{KKEE(tr)}$ (1.1)	Конструктивний коефіцієнту енергоефективності транспортної технології
H_p/D_p (4.14)	Конструктивний крок гвинта, [в.о.]
p_D (4.14)	Крокове відношення гвинта

Скорочення, терміни, позначення	Пояснення
ψ_J (Рис. 6.10)	Кут нищпорення судна, [рад]
α_A (Рис. 5.3)	Кут розташування азимутальних пристроїв відносно діаметральної площини судна, [град]
J_s (Рис. 4.3)	Момент інерції судна
R_u (4.16)	Опір руху судна, [Н]
h_s, h_M (6.8)	Осідання, [м], відповідно (s) – судна і (M) – моделі судна
M_s	Поворотний момент судна, [Н×м]
v_i (3.4)	Поточна швидкість судна, [м/с]
R_p	Радіус гвинта, [м]
r_p	Радіус перетину лопаті гвинта, [м]
b_p	Товщина лопаті гвинта, [м]
v_a (4.15)	Швидкість притоку води, [м/с]
b_s, b_M (6.8)	Ширина, [м], відповідно (s) – судна і (M) – моделі судна
<i>Характеристики суднових енергетичних установок та їх компонентів</i>	
M_d (4.18)	Діюче значення моменту гвинта, [Н×м]
P_d	Діюче значення потужності гвинта, [Вт]
T_d (4.18)	Діюче значення упору гвинта, [Н×м]
η_p	Ефективність гвинта, [в.о.]
ν_s (3.1)	Коефіцієнт кінематичної пружності матеріалу, $\times 10^{-6}$ [м ² /с]
η_m (4.16)	Коефіцієнт корисної дії валопроводу и реверс-редукторної передачі, [в.о.]
η_{pF} (4.17)	Коефіцієнт корисної дії гвинта для даного значення K_F , [в.о.]
η_{pr} (4.16)	Коефіцієнт корисної дії пропульсивний, [в.о.]
η_h (4.16)	Коефіцієнт корисної дії пропульсивний, [в.о.]
m_{cS} (3.1)	Маса контактної області сенсора, [кг]
m_{ncS} (3.1)	Маса неконтактної області сенсора, [кг]
M_p (4.14)	Момент гвинта, [Н×м]
P_p (4.14)	Потужність гвинта
F_p (4.14)	Сила поштовху гвинта, [Н]

Скорочення, терміни, позначення	Пояснення
$F_S(t)$ (3.1)	Сила, що діє на сенсор, [Н]
T_p (4.14)	Упор гвинта, [Н×м]
T_{THR} (4.18)	Упор підрулюючого пристрою, [Н×м]
$\bar{v}_S(t)$	Швидкість, з якою рухається система, що коливається у зоні прикладення сили, [м/с]
<i>Загально-фізичні величини</i>	
ε	Діелектрична проникність середовища, [Ф/м]
L, l	Довжина, [м]
ε_0	Електротехнічна постійна, $8,8 \times 10^{-12}$ [Ф/м]
μ_R (2.5)	Коефіцієнт в'язкості середовища, або коефіцієнт грузлого тертя, $\times 10^{-2}$ [кг/м×с]
μ_t/μ_w	Коефіцієнт відносної вихрової в'язкості, [в.о.]
μ_S (3.1)	Коефіцієнт внутрішнього тертя матеріалу сенсора, $\times 10^{-2}$ [кг/м×с]
μ_w (2.4)	Коефіцієнт динамічної в'язкості, $\times 10^{-3}$ [Па×с]
ν_w (2.4)	Коефіцієнт кінематичної в'язкості, $\times 10^{-6}$ [м ² /с]
Ψ	Магнітний потік, [Вб]
m	Маса, [кг]
γ	Питома вага, [Н/м ³]
S	Площа поперечного перетину, [м ²]
g	Сила тяжіння [м/с ²]
P_v (2.4)	Тиск потоку, [Па]
d	Товщина, [м]
t	Час, [с]
n (4.14)	Частота обертання, [с ⁻¹]
Ω, ω	Частота обертання, [рад/с]
R_n (4.15)	Число Рейнольдса, [в.о.]
Fr	Число Фруда, [в.о.]
$n_N (= 60 \times n)$	Швидкість обертання, [об/хв]
b	Ширина, [м]
ρ (4.14) (2.4)	Щільність води, [кг/м ³]
<i>Характеристики систем координат та векторні величини</i>	

Скорочення, терміни, позначення	Пояснення
v_{saxi} (B.1)	Аксіальна (осева) складова швидкості переміщення судна у циліндровій системі координат, [м/с]
$x(t)$ (6.14)	Вектор збурюючих впливів
u_T (6.36)	Вектор змінних зусиль
$y(t)$ (6.14)	Вектор координат динамічної моделі
$\dot{U}_{ph-ph}$	Вектор поміж фазної напруги
$\bar{\Psi}$	Вектор потокозчеплення обмотки статора
$\dot{I}$	Вектор струму
τ_T (6.36)	Вектор упору і моменту
$\delta(t)$	Вектор управляючих впливів
$\vec{f}_m$ (2.4)	Векторне поле масових сил
$\vec{v} = (v^1, \dots, v^n)$ (2.4)	Векторне поле швидкостей
F_l, F_x (6.1)	Сила, що діє на судно по довжині l_s і зумовлює відповідний кут диференту, [Н]
F_h, F_y (6.2)	Сила, що діє на судно по ширині h_s і зумовлює відповідний кут крену, [Н]
F_z, F_θ (6.3)	Сила, що діє на судно у напрямку руху і зумовлює відповідний кут нищпорення, [Н]
v_{stg} (B.1)	Тангенціальна складова швидкості переміщення судна у циліндровій системі координат, [м/с]
$v_{sy} (vs)$ (B.1)	Швидкість бокового переміщення судна у декартовій системі координат, [м/с]
$v_{sr} (rs)$ (B.1)	Швидкість нищпорення судна у декартовій системі координат, [рад/с]
$v_{sx} (us)$ (B.1)	Швидкість повздовжнього переміщення судна у декартовій системі координат, [м/с]
<i>Характеристики та величини математичних перетворень</i>	
Δ (2.4)	Векторний оператор Лапласа
a_j (4.10)	Допоміжна індикаторна змінна ітераційного процесу

Скорочення, терміни, позначення	Пояснення
d_i (4.10)	Допоміжна індикаторна змінна прогресивного ітераційного процесу
b_s (4.10)	Допоміжна індикаторна змінна регресивного ітераційного процесу
R^m (3.10)	Матриця активної складової схеми заміщення комплексного навантаження
$K_{Tmatrix}$	Матриця коефіцієнтів упорів
$T_{matrix(i)}$	Матриця конфігураційних параметрів підрулюючих пристроїв, де $(i = 0 \dots k)$ – номер відповідної конфігурації (див. підрозділ 6.6)
L^m (3.10)	Матриця реактивної складової схеми заміщення комплексного навантаження
Y_F	Множина допустимих значень координат динамічної моделі
U_F	Множина допустимих значень управляючих впливів
$\bar{C}_i$	Множина змінних управляючих координатних завдань
P_{ik} (4.10)	Множина характерних ознак k -того типового ситуаційного чинника для i -го ідентифікатору експлуатаційного режиму
p_{is} (4.10)	Ознака ситуаційного чинника
R_F	Оператор відображення вектору стану
s (4.11)	Оператор диференціювання
∇ (2.4)	Оператор набла
W^X (4.12)	Передавальна функція за впливом X
$F_{obj_seu_cpc}$	Цільова функція
<i>Електромеханічні характеристики суднових енергетичних установок та їх компонентів</i>	
$E_{int/SOC}$ (3.3)	Енергія, необхідна для заряду конденсатору, [Вт]
Z_{SE} (3.2)	Імпеданс перетворювача з електричного боку, [Ом]
Z_{SM} (3.2)	Імпеданс перетворювача з механічного боку, [Ом]
μ_f	Коефіцієнт взаємоіндукції між обмоткою збудження и демпферною, [в.о.]
μ_d	Коефіцієнт взаємоіндукції між обмоткою статора і демпферною, [в.о.]

Скорочення, терміни, позначення	Пояснення
k_{puls_max}	Коефіцієнт допустимих пульсацій, [в.о.]
k_μ	Коефіцієнт насичення, [в.о.]
k_{THD}	Коефіцієнтом несинусоїдальності на пруги, [в.о.]
α (4.5)	Кут відкриття тиристорів, [рад]
$\delta_{СОДГ}$ (6.13)	Кут навантаження, [рад]
n_g	Номер гармоніки
t_{EM} (3.2)	Постійна часу електромеханічного перетворення, [с]
t_{ME} (3.2)	Постійна часу електромеханічного перетворення, [с]
χ	Реактивний електричний опір, [Ом]
c_U	Середньозважений постійний конструктивний коефіцієнт давача напруги
c_I	Середньозважений постійний конструктивний коефіцієнт давача струму
β_δ	Середньозважений постійний конструктивний коефіцієнт давачів збурюючих впливів
$c_{\varphi(U)}$	Середньозважений постійний конструктивний коефіцієнт зворотного зв'язку АІН по напрузі
$c_{\varphi(I)}$	Середньозважений постійний конструктивний коефіцієнт зворотного зв'язку АІС по струму
β_χ	Середньозважений постійний конструктивний коефіцієнт системи самозбудження СОДГ
β_φ	Середньозважений постійний конструктивний коефіцієнт трансформатору амплітудно фазового компаундування
I_s	Струм статора, [А]
φ_U	Фаза напруги, [рад]
s_U	Шпаруватість напруги, [в.о.]

Список рисунків

Рис. 1.1 Типи морських бурових засобів	65
Рис. 1.2 Залежності питомої витрати палива від навантаження на СОДГ і характеристик гребних гвинтів.....	72
Рис. 1.3 Структурна функціональна схема гібридного ДЕПК	76
Рис. 1.4 Фрагмент однолінійної схеми єдиної багато-шинної електроенергетичної системи офшорного (Supply vessel) судна (див. додаток Б.1, Рис. Ж.1)	80
Рис. 1.5 Конфігурація ДАУ СОДГ СЕУ КПК	87
Рис. 1.6 Структура системи DP КПК судна.....	89
Рис. 2.1 Структурна функціональна схема ДЕПК з фрагментацією СНЕ.	105
Рис. 3.1 Характеристики потоків і складових х-швидкостей підрулюючого пристрою моделі UL/ULE потужністю 1500 кВт	130
Рис. 3.2 Візуалізація потоку від азимутального рушія ПП СЕУ КПК у вигляді диска силового приводу (англ. Actuator Disk – AD).....	132
Рис. 3.3 Фізична модель ПП з двома ступенями свободи.....	134
Рис. 3.4 Фізичне моделювання моніторингу деградаційних ефектів	135
Рис. 3.5 Фізичне моделювання головних гребних електродвигунів.....	136
Рис. 3.6 Компоненти аксіальних сил, пропорційні радіусу огибаючої лопатей гвинта.....	140
Рис. 3.7 Компоненти тангенціальних сил, пропорційні радіусу гвинта....	140
Рис. 3.8 Візуалізація процесу формалізації фізичних моделей підрулюючих пристроїв із визначенням конфігурації комбінованого пропульсивного комплексу	144
Рис. 3.9 Блок-схема системи моніторингу стану EDLC для ДЕПК.	146
Рис. 3.10 Параметри комплексного навантаження для визначення ємності EDLC для певного експлуатаційного режиму СЕК КПК	148
Рис. 3.11 Амплітудно-частотна характеристика обраних EDLC	149
Рис. 3.12 Параметри заряду/розряду обраних EDLC у заданих межах SOC	149

Рис. 3.13 Порівняльні характеристики ефективності циклів заряду/розряду EDLC запропонованої комплектації СЕУ КПК динамічними джерелами живлення для двох експлуатаційних режимів.....	150
Рис. 4.1 Схема динаміки руху вантажопідйомного механізму.....	161
Рис. 4.2 Графіки залежності параметрів гребного гвинта ПП від відносного кроку гвинта	169
Рис. 4.3 Схема балансу діючих моментів гвинта	171
Рис. 4.4 Блок-схема замкнутої системи регулювання моментом асинхронного двигуна (АД) ПП.....	172
Рис. 4.5 Блок-схема регулятора швидкості.....	172
Рис. 4.6 Блок-схема регулятора моменту гвинта	174
Рис. 4.7 Визначення обмеження максимального моменту.....	175
Рис. 4.8 Блок-схема регулятора потужності ПП	176
Рис. 4.9 Структурна схема з'єднання передавальних функцій для управління ПП на гіперболі постійної потужності СЕУ КПК по (4.30).....	178
Рис. 4.10 Структурна схема з'єднання передавальних функцій для інваріантного до основного збурення управління ПП на гіперболі постійної потужності СЕУ КПК по (4.31)	179
Рис. 4.11 Комп'ютерна модель експериментальної установки в Matlab Simulink.....	181
Рис. 4.12 Діаграми швидкості електродвигуна при апроксимації системи передавальними функціями другого (а) і третього (b) порядків.	188
Рис. 4.13 Діаграми швидкості двигуна при оптимізації перехідного процесу по швидкості для другого (а) і третього (b) порядків.....	188
Рис. 4.14 Принципова схема лабораторної установки.	189
Рис. 4.15 Зовнішній вигляд лабораторної установки	190
Рис. 4.16 Графіки частоти обертання та струму АД до оптимізації	191
Рис. 4.17 Графіки частоти обертання та струму АД після оптимізації.	191

Рис. 5.1 Векторна діаграма для ділянки високовольтної шини із підключеними до неї АД и СОДГ	200
Рис. 5.2 Блок-схема управління гібридною СЕУ КПК за критерієм мінімуму споживання електроенергії.....	209
Рис. 5.3 Блок-схема стратегії управління СЕУ КПК за критерієм максимуму альтернативної енергії та регулювання ступеню заряду батарей СНЕ.....	210
Рис. 5.4 Функціональна схема СКРРЕ (PMS) гібридного ДЕПК.....	211
Рис. 5.5 Енергетичні характеристики СНЕ.....	213
Рис. 5.6 Енергетичні характеристики СГЕ	214
Рис. 5.7 Залежності напруги і струму на DC-link	214
Рис. 5.8 Характеристики потужностей на різних ділянках ДЕПК.....	215
Рис. 5.9 Залежність струму навантаження.....	216
Рис. 5.10 Модель динаміки судна	221
Рис. 5.11 Графіки перехідних процесів пуску та навантаження АД ПП... ..	222
Рис. 5.12 Спектральна характеристика на шинах високої напруги	223
Рис. 6.1 Експериментальні залежності відношень опору на тонну водотоннажності в функції коефіцієнту повздовжньої гостроти корпусу судна і числа Фруда.	231
Рис. 6.2 Структура СППР при проектуванні та дослідженні СЕУ КПК	242
Рис. 6.3 Граф переходів марківського ланцюга, який представляє простійший потік	251
Рис. 6.4 Граф переходів одноканальної СМО	254
Рис. 6.5 Граф переходів багатоканальної СМО	257
Рис. 6.6 Діаграми управляючих напруг СІФК	270
Рис. 6.7 Робочі характеристики ГЕД судна типу АНТS при використанні всережимного регулятора (підрозділ 4.4).....	272
Рис. 6.8 Характеристики споживаної активної потужності 4-ма СОДГ СЕУ КПК.....	273
Рис. 6.9 Характеристики споживаної реактивної потужності 4-ма СОДГ СЕУ КПК.....	273

Рис. 6.10 Комп'ютерна модель у MatLab Simulink конфігурації підрулюючих пристроїв для судна типу Supply Vessel.....	274
Рис. 6.11 Зміна координат судна типу Supply Vessel, довжиною 76 м, при різній конфігурації ПП.....	280
Рис. 6.12 Графіки залежності кута нищпорення судна типу Supply Vessel, довжиною 76 м (додаток Б.1), у функції часу	281
Рис. Б.1 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК судна для установки якорів (англ. Anchor Handling Vessel – AHV).....	347
Рис. Б.2 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК багатоцільового офшорного судна (англ. Multipurpose Offshore Vessel – MOV).....	348
Рис. Б.3 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК судна для заведення якорів та офшорного будівництва (англ. Construction anchor handling vessel – CAHV).....	349
Рис. Б.4 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК судна для заведення якорів та офшорного будівництва (англ. Construction anchor handling vessel – CAHV).....	350
Рис. Б.5 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК резервного, рятувального та охоронного судна (англ. Stand-by and Guard Vessels – SBV).....	351
Рис. Б.6 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК судна для офшорного будівництва (англ. Offshore Construction Vessel – OCV)	352
Рис. Б.7 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК судна для офшорного будівництва (англ. Offshore Construction Vessel – OCV)	353
Рис. Б.8 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК океанографічного дослідницького судна (англ. Oceanographic Research Vessels – ORV).....	354
Рис. Б.9 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК риболовецького дослідницького судна (англ. Fisheries research vessel – FRV).....	355
Рис. Б.10 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК дизель-електричного пасажирського судна (англ. Diesel-electric Passenger Vessels – DEPV).....	356

Рис. Б.11 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК риболовецького траулера (англ. Live Fish Carrier – LFC)	357
Рис. Б.12 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК пелагічного сейнер-траулера (англ. Purse Seiner/Pelagic Trawler – PST).....	358
Рис. Б.13 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК риболовецького траулера (англ. Live Fish Carrier – LFC)	є 359
Рис. Б.14 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК продуктового судна/хімовоза (англ. Product/Chemical Tankers – PCT).....	360
Рис. Б.15 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК продуктового судна/хімовоза (англ. Product/Chemical Tankers – PCT).....	361
Рис. Б.16 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК подвійного морського підйомнику (англ. Twin Marine Lifter – TML).....	362
Рис. Б.17 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК патрульного судна побудованого за технологією SWATH (англ. Small Waterplane Area Twin Hull – SWATH)	363
Рис. Б.18 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК днопоглиблювального судна (англ. Cutter Suction Dredger – CSD).....	364
Рис. Б.19 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК Судно для дослідження морського дна (англ. Seabed Logging Ship – SLS)	365
Рис. Б.20 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК багатофункціонального геотехнічного дослідницького судна (англ. Multipurpose Geotechnical & Soil Investigation Vessel – MGTV).....	366
Рис. Б.21 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК оффшорного судна для дослідження морського дна (англ. Offshore Subsea Construction Vessel – OSCV)	367
Рис. Б.22 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК багатоцільового судна із дистанційно-керованими підводними апаратами (англ. Multipurpose field & ROV Support Vessel – MRSV).....	368
Рис. Б.23 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК судна для прокладання кабелів (англ. Cable laying vessel – CLV).....	369

Рис. Б.24 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК сейсмічного дослідницького судна (англ. Seismic Research Vessel – SRV)	370
Рис. Б.25 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК газового автомобільного парому (англ. LNG Car Ferry – LNGCF).....	371
Рис. Б.26 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК пасажирського парому (англ. Roll-on/Roll-off ships – RO-RO).....	372
Рис. Б.27 Основні розміри судна типу Supply Vessel.	375
Рис. Б.28 Структурна схема суднової енергетичної установки комбінованого пропульсивного комплексу бурового судна	378
Рис. Б.29 Основні типи АГРК	379
Рис. Б.30 Вантажно-розвантажувальна система судна із КПК.....	380
Рис. Г.1 Порівняльний аналіз траєкторій складових х-швидкостей потоку гвинта ПП за результатами вимірювань	393
Рис. Е.1 Загальний вигляд фізичної моделі багатофункціонального пропульсивного комплексу зі змінною структурою.....	396
Рис. Ж.1 Однолінійна схема СЕУ КПК судна типу Supply Vessel (додаток Б.1)	397
Рис. Ж.2 Однолінійна схема СЕУ КПК буксиру з головними азимутальними ПП та ПП типу Z-Drive	398
Рис. Ж.3 Однолінійна схема СЕУ КПК допоміжного судна з головними допоміжними ПП типу Contaz®	399
Рис. Ж.4 Однолінійна схема СЕУ КПК буксиру-допомогача з допоміжними ПП типу Aziprul.....	400
Рис. Ж.5 Однолінійна схема СЕУ КПК багатоцільового судна з допоміжними ПП типу L-Drive.....	401
Рис. Ж.6 Однолінійна схема СЕУ КПК судна якорязавідника з допоміжними ПП типу UL/ULE	402
Рис. Ж.7 Однолінійна схема СЕУ КПК судна-рятівника з допоміжними ПП типу Swing-UP.....	403

Рис. Ж.8 Однолінійна схема СЕУ КПК пасажирського судна льодового класу з ПП типу Mermaid™	404
Рис. Ж.9 Однолінійна схема СЕУ КПК великого пасажирського судна льодового класу з ПП типу Mermaid™	405
Рис. Ж.10 Однолінійна схема СЕУ КПК наукового судна з ПП типу ТТ-РМ	406
Рис. Ж.11 Фрагмент перетину розподілу енергетичного потоку для СЕУ КПК з ПП типу L-Drive (Рис. Ж.5)	407
Рис. Ж.12 Зони дії упорів ПП різних типів комплектації СЕУ КПК.....	408
Рис. И.1 Головна сторінка програмного комплексу у MatLab/Simulink системи підтримки прийняття рішень	413
Рис. К.1 Технологічна карта дослідження (проблеми, мета і головні задачі)	414
Рис. К.2 Технологічна карта дослідження (допоміжні задачі)	415
Рис. М.1 Структурна схема процесу визначення тематики дослідження ..	420

Список таблиць

Таблиця 1.1	Переваги і недоліки двигунів і технологій живлення СЕУ КПК	70
Таблиця 1.2	Час від подання сигналу на автоматичний пуск до моменту прийому навантаження до номінального значення потужності СОДГ	91
Таблиця 6.1	Процес когнітивного проектування СППР	233
Таблиця 6.2	Параметри СМО, що входять в мережу.....	265
Таблиця 6.3	Значення оборотів валу, крокового відношення гвинта і моменту опору в різних точках експерименту.....	292
Таблиця 6.4	Дані повторних дослідів і результати проміжних розрахунків оцінки дисперсії адекватності	294
Таблиця 6.5	Значення t-критерію Ст'юденту	295
Таблиця 6.6	Значення F-критерію Фішера	296
Таблиця 6.7	Матриця планування ПФЕ 2 ³ має вигляд	297
Таблиця 6.8	Абсолютні значення змінних параметрів.....	299
Таблиця 6.9	Матриця планування і результати експерименту	301
Таблиця Д.1	Ідентифікаційні параметри і ситуаційні чинники СЕУ КПК	394
Таблиця 3.1	Результати моделювання енергетичних процесів при передачі потужності у гібридному ДЕПК судна типу Supply Vessel	409
Таблиця 3.2	Результати моделювання енергетичних процесів при передачі потужності у гібридному ДЕПК буксиру з головними азимутальними ПП та ПП типу Z-Drive (Рис. Ж.2)	411
Таблиця Л.1	Корегування конструктивного коефіцієнту енергоефективності в залежності від типу судна і матриці конфігурації ПП.....	416
Таблиця М.1	Результати експертної оцінки аспектів тематики дисертаційних досліджень.....	421

Вступ

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, призначених для проведення 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 по принципу єдиних електроенергетичних систем ([Рис. Б.1 – Рис. Б.26](#)).

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) (англ. [International Convention for the Prevention of Pollution from Ships – MARPOL 73/78](#)) щодо конструктивного індексу (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.

Дослідження, розробка і прогнозування методів удосконалення експлуатаційних характеристик таких СЕУ КПК, підвищення ефективності контролю їхнього технічного стану, встановлення закономірностей змінювання параметрів технічного стану в процесі експлуатації,

[До змісту](#)

впровадження методів і засобів діагностування та прогнозування технічного стану, що забезпечують високу ефективність використання і надійність роботи СЕУ [КПК](#) є актуальними проблемами у галузі розвитку транспорту, транспортних технологій і відповідної інфраструктури.

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 морської 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 і 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 необхідно буде розв'язати проблему створення системи підтримки прийняття рішень ([СППР](#)) для проектування, дослідження і удосконалення СЕУ [КПК](#), яку, в свою чергу, неможливо вирішити без всебічного моніторингу деградаційних ефектів на лініях

[До змісту](#)

гребних потоків рушіїв із ідентифікацією відповідних маркерів на перетинах енергетичних потоків, розробки стратегії всережимних регуляторів потужністю, моментом та частотою обертання електродвигунами [ПП](#) КПК і методології побудови багатокритеріальних трирівневих стратегій управління розподілом потужності у СЕУ КПК.

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 поєднуються теоретичні, чисельні та експериментальні методи дослідження. Теоретичні методи розроблялися у випадках, коли доводилося стикатися з абсолютно новими проблемами, що не досліджувалися раніше, або якщо застосування відомих методів виявлялося не раціональним для вирішуваних завдань. За допомогою теоретичних розробок створені розрахункові методи і система підтримки прийняття рішень, що їх реалізує. Експериментальні методи використовувались для верифікації отриманих результатів і математичних моделей. При цьому експерименти проводилися на розробленій фізичній моделі багатофункціонального пропульсивного комплексу зі змінною структурою і в суднових 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 достовірність результатів, що одержано за допомогою створеної системи підтримки прийняття рішень.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що компенсація впливу гідропропульсивних деградаційних ефектів на процеси

передачі потужності від енергетичної установки до рушіїв комбінованих пропульсивних комплексів призводить до зменшення 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 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 всережимними 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 непроекtnих 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

[До змісту](#)

технологічних процесів на судні, яке перебуває в умовах нестабільності роботи гвинта і впливу довкілля;

– теорія нестаціонарної 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 ефектів 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 енерго-заощаджувальні 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 характеристик 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 розрахунку параметрів СЕУ **КПК** з подальшим удосконаленням в залежності від певного експлуатаційного режиму;

– запропонована стратегія всережимного регулятора 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. Усі наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самотійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належать:

[238] – проведення інформаційного пошуку, складання математичної моделі та перевірка її адекватності;

[230] – постановка задачі дослідження, розробка схеми лабораторної установки;

[32] – розробка методології створення системи підтримки прийняття рішень для дослідження, проектування та експлуатації СЕУ **КПК**, а також

[До змісту](#)

методу взаємної імплементації характеристичних просторових векторів енергетичних процесів в СЕУ і гідродинамічних в КПК;

[35] – 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 енергозаощаджувальних циклів заряджання/розряджання;

[38] – попередні розрахунки для визначення орієнтовної вартості СЕУ КПК, визначення нормативних проблем, які необхідно вирішити у подальших дослідженнях;

[39] – 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.

[40] – розробка стратегії визначення деградаційних ефектів на лініях потоків гребних гвинтів;

[144] – розробка технології інтегрування датчиків реєстрації деградаційних ефектів у суднову систему моніторингу;

[224] – синтез елементів системи симетрування, визначення показників симетрування та рекомендації із застосування системи;

[227] – постановка проблеми, визначення основних критеріїв, розробка математичних моделей СЕУ КПК;

[229] – визначення критеріїв оптимальності, розробка математичного апарату для дослідження енергетичних процесів;

[231] – декомпозиція суднової енергетичної установки як об'єкта математичного моделювання, структуризація локальних систем і різних функцій управління підрулюючими пристроями комбінованих пропульсивних комплексів бурових суден;

[232] – 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;

[233] – розробка стратегії управління підрулюючим пристроєм з вентиляторною характеристикою на валу на основі регулювання потужності, яка відповідає значенню обертаючого моменту;

[234] – визначення структури математичної моделі та розрахунок її параметрів;

[235] – визначення критеріїв адекватності розробленої математичної моделі реальному об'єкту;

[236] – розрахунок параметрів асинхронного двигуна, визначення структури математичної моделі, імітаційне моделювання;

[237] – параметризація електричних компонентів математичної моделі, перевірка адекватності;

[245] – розробка принципів підвищення енергетичної ефективності та визначення критеріїв її перевірки;

[246] – постановка проблеми, визначення напрямків її вирішення, створення умов для перевірки результатів дослідження;

[248] – постановка експерименту, розробка стратегії проведення експерименту, визначення критеріїв перевірки результатів;

[249] – аналіз літературних джерел та патентний пошук, визначення основних напрямків вирішення зазначеної проблеми;

[251] – параметризація датчиків деградаційних ефектів та способу їх ідентифікації на перетинах енергетичного каналу;

[252] – розробка принципу інтеграції датчиків із судновою системою розподілу потужності;

[253] – розробка методу побудови систем управління підрулюючими

[До змісту](#)

пристроями комбінованого пропульсивного комплексу;

[254] – визначення критеріїв подібності і розрахунок коефіцієнтів пропорційності в залежності від режимів роботи;

[250] – розробка принципу паралельного імпульсно-фазового управління асинхронним електродвигуном;

[256] – спектральний аналіз високої напруги за допомогою додатка *SP Tools* середовища *MatLab/Simulink*;

[257] – на підставі аналізу систем позиціонування обрано математичний апарат для моделювання систем управління потужністю;

[258] – розробка методу удосконалення математичних моделей багатомасових електроприводів;

[223] – розробка стратегії застосування реєстраційних елементів на лініях валопроводів багато привідних пропульсивних комплексів;

[262] – розробка методу удосконалення існуючого гідродинамічного інструментарію визначення деградаційних ефектів;

[264] – розробка конструкції закріплення датчиків на лінії гребного гвинта.

Апробація результатів дисертації. Основні результати наукових досліджень неодноразово доповідалися на ряді міжнародних та Всеукраїнських наукових з'їздах, конференціях, симпозіумах, 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).

РОЗДІЛ 1. СУДНОВІ ЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ КОМБІНОВАНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ: АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ І СТАН РОЗВИТКУ НАУКОВО-ПРИКЛАДНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Сучасні концепції енерго-заощаджувальних технологій у транспортній галузі

Жорсткість вимог з охорони навколишнього середовища, майбутній перехід на більш дорогі сорти палива з низьким вмістом сірки, необхідність зменшення шкідливих викидів в атмосферу, зниження шумових характеристик суден в певних районах плавання, виділення окремих районів судноплавства і портів, де виключається робота судових дизелів, викликало необхідність пошуку альтернативних джерел енергії, які б відповідали сучасним вимогам морського і екологічного законодавств [118].

Реалізація [Транспортної стратегії](#) України до 2020 року ([розпорядження](#) Кабінету Міністрів України №2174-р від 20 жовтня 2010 року) обмежується, з одного боку, необхідністю розглядати проектування, дослідження та експлуатацію СЕУ [КПК](#) як самостійні галузі і в той же час, як частини [системи підтримки прийняття рішень](#) більш високого рівня, яка виступає єдиним цілим для означених галузей. У свою чергу кожен елемент СЕУ [КПК](#) має власну структуру і також може розглядатися як окремий елемент у процесі передачі потужності від СЕУ до рушіїв.

Вивчення альтернативних дизельних і газових двигунів для СЕУ [КПК](#), де особлива увага приділяється системам рекуперації тепла вихлопних газів, привело до значної економії щорічних експлуатаційних витрат, але не вирішило екологічних проблем.

Застосування систем утилізації тепла, які покривають частину споживання електроенергії, та пристроїв для зниження шкідливих викидів у атмосферу є перспективними напрямками розвитку СЕУ КПК, але такими, що поступово втрачають актуальність.

Гібридні СЕУ КПК з [альтернативними джерелами енергії](#) (АДЕ), які використовують максимальну ефективність прямого механічного приводу і гнучкість поєднання потужності згоряння від теплового двигуна і накопиченої енергії з АДЕ, є найбільш перспективними. На низькій потужності пропульсивного електричного приводу, призначеного для приведення у рух судна, [ГЕД](#) забезпечує необхідну потужність, а надлишок потужності теплового двигуна може бути використаний в якості живлення власних потреб від валогенератору. Типові архітектури СЕУ КПК показані у [Додаток А: суден для установки якорів \(Anchor Handling Vessel\)](#) – [Рис. Б.1](#); багатопільових офшорних суден ([Multipurpose Offshore Vessel](#)) – [Рис. Б.2](#); суден для заведення якорів та офшорного будівництва ([Construction anchor handling vessel](#)) – [Рис. Б.3](#), [Рис. Б.4](#); резервних, рятівних та охоронних суден ([Stand-by and Guard Vessels](#)) – [Рис. Б.5](#); суден для офшорного будівництва ([Offshore Construction Vessel](#)) – [Рис. Б.6](#); [Рис. Б.7](#); океанографічних дослідницьких суден ([Oceanographic Research Vessels](#)) – [Рис. Б.8](#); риболовецьких дослідницьких суден ([Fisheries research vessel](#)) – [Рис. Б.9](#); дизель-електричних пасажирських суден ([Diesel-electric Passenger Vessels](#)) – [Рис. Б.10](#); риболовецьких траулерів ([Live Fish Carrier](#)) – [Рис. Б.11](#); [Рис. Б.13](#); пелагічних сейнер-траулерів ([Purse Seiner/Pelagic Trawler](#)) – [Рис. Б.12](#); продуктових суден/танкерів хімовозів ([Product/Chemical Tankers](#)) – [Рис. Б.14](#); [Рис. Б.15](#); подвійних морських підйомників ([Twin Marine Lifter](#)) – [Рис. Б.16](#); патрульних суден побудованих за технологією SWATH ([Small Waterplane Area Twin Hull](#)) – [Рис. Б.17](#); днопоглиблювальних суден ([Cutter Suction Dredger](#)) – [Рис. Б.18](#); суден для дослідження морського дна ([Seabed Logging Ship](#)) – [Рис. Б.19](#); багатфункціональних геотехнічних дослідницьких суден ([Multipurpose Geotechnical & Soil Investigation Vessel](#)) – [Рис. Б.20](#); офшорних

суден для дослідження морського дна (*Offshore Subsea Construction Vessel*) – Рис. Б.21; багатоцільових суден із дистанційно-керованими підводними апаратами (англ. *Remotely operated underwater vehicle* – ROV) (*Multipurpose field & ROV Support Vessel*) – Рис. Б.22; суден для прокладання кабелів (*Cable laying vessel*) – Рис. Б.23; сейсмічних дослідницьких суден (*Seismic Research Vessel*) – Рис. Б.24; газових автомобільних поромів (*LNG Car Ferry*) – Рис. Б.25; різноманітних типів поромів (*Roll-on/Roll-off ships*) – Рис. Б.26.

Також слід зауважити, що розвиток прибережного шельфу мирового океану з точки зору видобутку природних копалин, використання енергії вітру та течії продовжується дуже високими темпами. Проведення офшорних робіт є однією із найбільш важливих складових цих процесів. Робота у цих зонах зумовлює побудову КПК з технологічними процесами, СК якими мають властивості систем керування багатомасовими електроприводами (див. підрозділ 4.6).

Прикладом взаємо-впливаючих технологічних процесів із багатомасовими електроприводами виступають процеси буріння морських свердловин [67, 89], функціональність яких ускладнюється поведінкою води між гирлом свердловини і буровою установкою. У різноманітті технологічних процесів під час проведення означених робіт зокрема використовують самопідйомні (СПБУ) та напівзанурювальні самохідні бурові установки (НЗБУ), а також бурові судна (Рис. 1.1). Основним фактором, що впливає на вибір типу плавучих бурових засобів, є глибина моря на місці буріння.

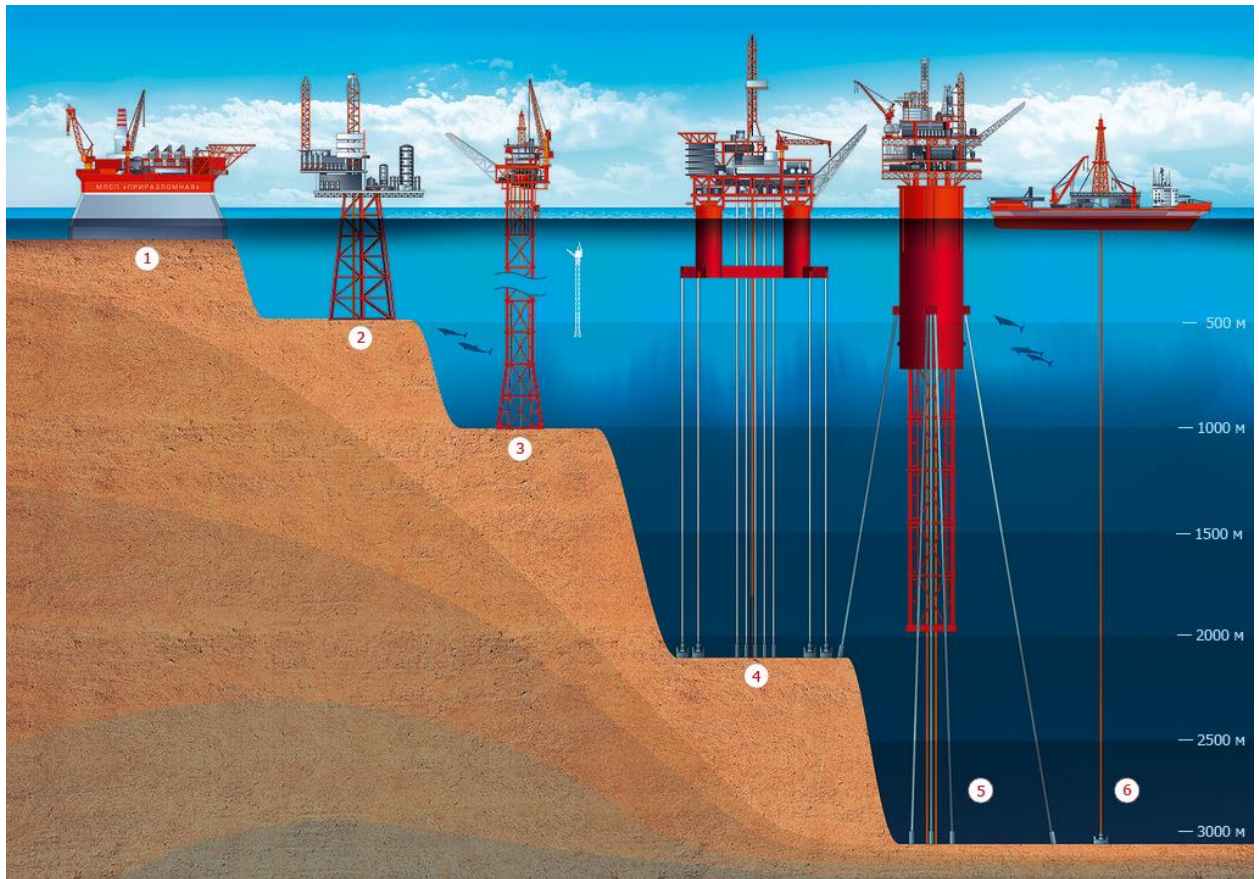


Рис. 1.1 Типи морських бурових засобів: 1, 2 – стаціонарні бурові платформи; 3 – стаціонарна самопідйомна вежа (СПБУ) або гнучка вежа; 4 – напівзанурювальна самохідна бурова установка (НЗБУ) типу *TLP* (*Tension-leg platform*); 5 – платформи типу *SPAR* (*Single Point mooring And Reservoir*); 6 – бурове судно.

Бурові судна (додаток Б.2) завдяки більш високій маневреності і швидкості переміщення, більшій автономності в порівнянні з НЗБУ [137], використовуються при бурінні пошукових і розвідувальних свердловин у віддалених районах при глибинах акваторій до 3000 м. На відміну від НЗБУ для бурових суден є великі обмеження в роботі залежно від хвилювання моря. Так, при бурінні вертикальна хитавиця бурових судів допускається до 3,6 м, а для НЗБУ – до 5 м. До недоліків останніх можна віднести малу швидкість пересування.

З іншого боку, зростання вантажопідйомності, енергоозброєності, підвищення цін на паливо і матеріали, розширення експлуатаційних режимів, що пов'язано насамперед із розвитком офшорного флоту, істотно загострили проблеми проектування, будівництва і експлуатації [КПК](#) і СЕУ, що їх забезпечують. У сьогоднішній при проектуванні суден поряд з традиційним прагненням до оптимізації динамічних характеристик все більш уваги стали приділяти підвищенню надійності системи рушій – валопровід – корпус – двигун з урахуванням специфіки їх роботи в умовах експлуатації, що постійно змінюються. Велика складність цих завдань залишає основним шляхом їх вирішення – фізичний модельний експеримент і засновані на його результатах експлуатаційні і техніко-економічні розрахунки. Результати таких досліджень, як правило, публікуються у відомчих виданнях, технічних матеріалах сесій Міжнародної конференції опитових басейнів (МКОБ) (англ. *International Towing Tank Conference – ITTC*) і науково-технічних товариств, зазвичай недоступних при проведенні дослідницьких розрахунків. Наявні видання в нашій країні здебільшого не відповідають сучасним вимогам в частині використовуваних методів розрахунків, позначень і термінології [170].

Означені факти змусили критично переосмислити досвід використання в судновій електроенергетиці акумуляторних, сонячних та водневих джерел енергії, переконатися в безпеці їх експлуатації та вдосконаленні технології їх виробництва і отримати схвалення провідних [Класифікаційних товариств](#) [1]. Важливою особливістю, наприклад, сучасних батарейних систем є їх можливість заряджатися від систем відбору тепла, регенерації від суднових кранів в режимах гальмування, від валогенераторів, а також від поновлюваних джерел енергії, таких як сонячні та водневі елементи. Таким чином на сьогоднішній день, при проектуванні та будівництві сучасних СЕУ [КПК](#), ми маємо рахуватися з цими факторами, пов'язаними з

енергоефективністю, як основними показниками якості функціонування СЕУ КПК.

Концептуально коефіцієнти енергоефективності ККЕЕ і ЕКЕЕ СЕУ КПК визначаються відповідно до [160] 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 якою швидкістю v_s (4.16) або працює у режимі *Dynamic Positioning* (DP) із кутом нищпорення ψ_J (Рис. 6.10), приблизна схема розрахунку коефіцієнтів енергоефективності буде виглядати наступним чином:

$$\begin{aligned}
 K_{KKEE(tr)} = & \left(\overbrace{\left(\prod_{j=1}^n f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right)}^{\text{Емісія CO}_2 \text{ головних двигунів}} + \left(P_{AE} \cdot C_{FAE(i)} \cdot SFC_{AE(i)} \right)^* + \right. \\
 & + \left(\overbrace{\left(\prod_{j=1}^n f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff} \cdot P_{AEff(i)} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE}}^{\text{Емісія CO}_2 \text{ СОДГ}} \right. \\
 & \left. - \left(\overbrace{\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff} \cdot P_{MEff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}}^{\text{Зменшення емісії CO}_2 \text{ ГД у наслідок застосування паливних елементів}} \right)^{**} - \left(\overbrace{\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff} \cdot P_{AEff(i)} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}}^{\text{Зменшення емісії CO}_2 \text{ СОДГ у наслідок застосування АДЕ}} \right)^{***} \right) \times \\
 & \times \frac{1}{\underbrace{f_{\Delta} \cdot f_c \cdot \Delta_s \cdot f_w \cdot v_s}_{\text{Транспортна технологія}}};
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

$$\begin{aligned}
K_{KKEE(DP)} = & \left(\overbrace{\left(\left(\prod_{j=1}^n f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff} \cdot P_{AEeff(i)} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right)}^{\text{Емісія CO}_2 \text{ СОДГ}} + \right. \\
& \left. - \left(\overbrace{\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff} \cdot P_{AEeff(i)} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}}^{\text{Зменшення емісії CO}_2 \text{ СОДГ у наслідок застосування паливних елементів}}^{**} - \overbrace{\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff} \cdot P_{AEeff(i)} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}}^{\text{Зменшення емісії CO}_2 \text{ СОДГ у наслідок застосування АДЕ}}^{***} \right) \times \right. \\
& \left. \times \frac{1}{\underbrace{f_{\Delta} \cdot f_c \cdot f_{degr} \times \Delta_s \cdot f_w \cdot \psi_J}_{\text{Технологія DP}}}; \right.
\end{aligned} \tag{1.2}$$

$$K_{EKEE} = \frac{K_{KKEE(tr)} \cdot t_{tr} + K_{KKEE(DP)} \cdot t_{DP}}{\underbrace{t_{total}}_{\text{Експлуатаційні чинники транспортної стратегії}}}, \tag{1.3}$$

де:

C_F – коефіцієнт перерахунку між споживанням палива та викидом CO_2 ; (1.4)

v_s – швидкість судна; Δ_s – водотоннажність; ψ_J – кут нищпорення судна;

P_{ME} – потужність головних двигунів (у разі наявності у складі СЕУ КПК); (1.5)

P_{AE} – потужність **СОДГ**;

P_{eff} – потужність, вироблена в наслідок застосування інноваційних технологій; (1.6)

P_{PTO} – потужність валогенератору (у разі наявності у складі СЕУ КПК); (1.7)

P_{PTI} – потужність **бустерного електродвигуна** або електродвигуна у гібридній судновій установці з гвинтами протилежного обертання (*Contra-Rotating Pod* – **CRP** [243] (у разі наявності у складі СЕУ КПК); (1.8)

SFC – питома витрата палива (англ. *Specific fuel consumption*); (1.9)

f_j – коефіцієнт коригування елементів конструкції судна; (1.10)

f_w – коефіцієнт фактору погоди;

[До змісту](#)

f_{eff} – коефіцієнт доступності інноваційних технологій енергоефективності;
(1.11)

f_{degr} – коефіцієнту доступності технології компенсації деградаційних ефектів на лініях гребних гвинтів;
(1.12)

f_{Δ} – коефіцієнт водотоннажності судна;

f_c – коефіцієнт коригування коефіцієнту водотоннажності судна;

L_{PP} – довжина судна поміж перпендикулярами.

Згідно [160] зменшити значення коефіцієнтів енергоефективності, окрім екстраполяції коефіцієнту коригування елементів конструкції судна (f_j) та коефіцієнту доступності інноваційних технологій енергоефективності (f_{eff}) можливо за рахунок застосування паливних елементів (англ. *Fuel cell*), альтернативних (поновлюваних) джерел живлення і коефіцієнту, що враховує компенсацію деградаційних ефектів на лініях гребних гвинтів (f_{degr}).

Згідно таблиці 1 у [160] коефіцієнти доступності інноваційних технологій енергоефективності f_{eff} корелюються у відповідності до типу судна за рахунок мінімізації додаткових витрат зі зміною експлуатаційного режиму СЕУ КПК шляхом забезпечення стабільності потужності СЕУ і навантаження СОДГ в умовах збурення довкілля за рахунок оптимального в сенсі мінімуму критерію споживаної потужності при управлінні параметрами СЕУ КПК [73, 102, 186].

Підвищення продуктивності СЕУ КПК з архітектурними рішеннями структур, що представлені на Рис. Ж.1 – Рис. Ж.10, можливо за рахунок кореляції коефіцієнту коригування елементів конструкції судна f_j (1.10) 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} :

$$f_j = \frac{f_{j0} \cdot \left(\prod_{j=1}^n f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{l_T} L_{PP}^{(1 + l_{T(i)} / L_{PP})} \right)}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}, \quad (1.13)$$

де f_{j0} – початкове дизайнерське значення коефіцієнту згідно таблиці 1 [160] для інших типів суден ($0,77 < f_{j0} < 1$).

Подібні кореляції передбачають у перспективі застосовування інтелектуальних стратегій управління ПП і судном у цілому (див. підрозділ 1.3).

На першому етапі потрібно класифікувати топологію СЕУ КПК за механічними, електричними або гібридними типами двигунів, і топологією живлення (теплові, електрохімічні і гібридні). Потім, розглядаючи процеси у СЕУ КПК і системах енергопостачання і їх стратегій контролю, удосконалити можливості та усунути недоліки для цих систем і їх відповідного контролю.

Зведені дані аналізу переваг та недоліків застосування різних типів СЕУ КПК приведені у Таблиця 1.1.

Таблиця 1.1

Переваги і недоліки двигунів і технологій живлення СЕУ КПК

Технологія	Переваги	Недоліки	Джерело
Електромеханічний КПК	Низькі втрати при розрахунковій потужності	Низька ефективність при часткових і пікових навантаженнях	Рис. 1.2
	Низькі викиди CO_2 та NO_x при розрахунковій потужності	Високі викиди NO_x при зниженні навантаження	[76, 106]
	Низькі втрати перетворення енергії	Низьке резервування	[20]
		Підвищений рівень шуму	[190]
		Перевантаження дизельних двигунів	[141, 216]
ДЕПК	Перевантажувальна спроможність	Постійність частоти обертання СОДГ	[22, 178]
	Узгодженість навантаження із СОДГ	Втрати при розрахунковій потужності	[112]
	Висока перспективність	Ризик постійної нестабільності потужності навантаження	[53]
	Зниження викидів NO_x при низькій швидкості Потенційно низький рівень шуму		Рис. 1.2
Гібридний ДПК	Низькі втрати при розрахунковій потужності	Постійність частоти обертання СОДГ	[120]

[До змісту](#)

	Перевантажувальна спроможність		[132, 222]
	Узгодження навантаження і ГЕД на низькій потужності	Складність системи	[194]
	Потенційно низький рівень шуму ГЕД		[21, 177]
Гібридний ДЕПК з АДЕ	Незалежність від стану повітря	Лімітована потужність	[27, 51]
	Зниження викидів у повітря	Небезпечність	[61]
	Висока ефективність і низький рівень шуму	Можливість модернізації	[142]
Енерго- заощад жувані гібридні СЕЕС	Незалежність від стану повітря	Лімітована потужність	[157, 161]
	Зниження викидів у повітря і низький рівень шуму	Небезпечність	
ДЕПК з гібридною СЕЕС	Вирівнювання навантаження	Постійність частоти обертання СОДГ	[187, 209]
	Нульовий рівень шуму і шкідливих викидів	Складність системи	[191]
	Зберігання регенованої енергії	Небезпечність обслуговування батарей	[150]
	Ефективність резервного живлення	Вартість батарей	[81]
	Можливість включення імпульсної потужності	Необхідність контролю за станом кожної з батарей	[113]
	Зниження витрати палива і викидів у атмосферу	Можливість виходу з ладу батарей у наслідок перезаряджання	[75, 216]
	Відсутність збільшення NO_x під час збільшення навантаження	Складність моніторингу за станом батарей	Рис. 3.9 [152, 153]
ДЕПК з гібридною СЕЕС постійного струму	Змінна швидкість обертання ГЕД і навантаження	Складність системи	[171]
	Оптимальне навантаження ГЕД	Вартість і втрати у силовій електроніці	[212]
	Зниження рівня шуму і вібрації двигуна	Збільшення NO_x у зв'язку зі змінною потужністю	[31]
	Зниження витрати палива і викидів CO_2	Необхідність впровадження енергозбереження при зменшенні потужності	[85]
	Можливість включення імпульсної потужності	Складність управління	[92]

Основним критерієм щодо визначення ефективності настроювання всережимних регуляторів СОДГ і ПЧ, що живлять ГЕД ПП, остається дотримання відповідного рівня питомої витрати палива (ПВП) (англ. *Specific fuel consumption* – *SFC*) (1.1), (1.2) у необхідних межах в залежності від навантаження на гребні гвинти і СОДГ (Рис. 1.2).

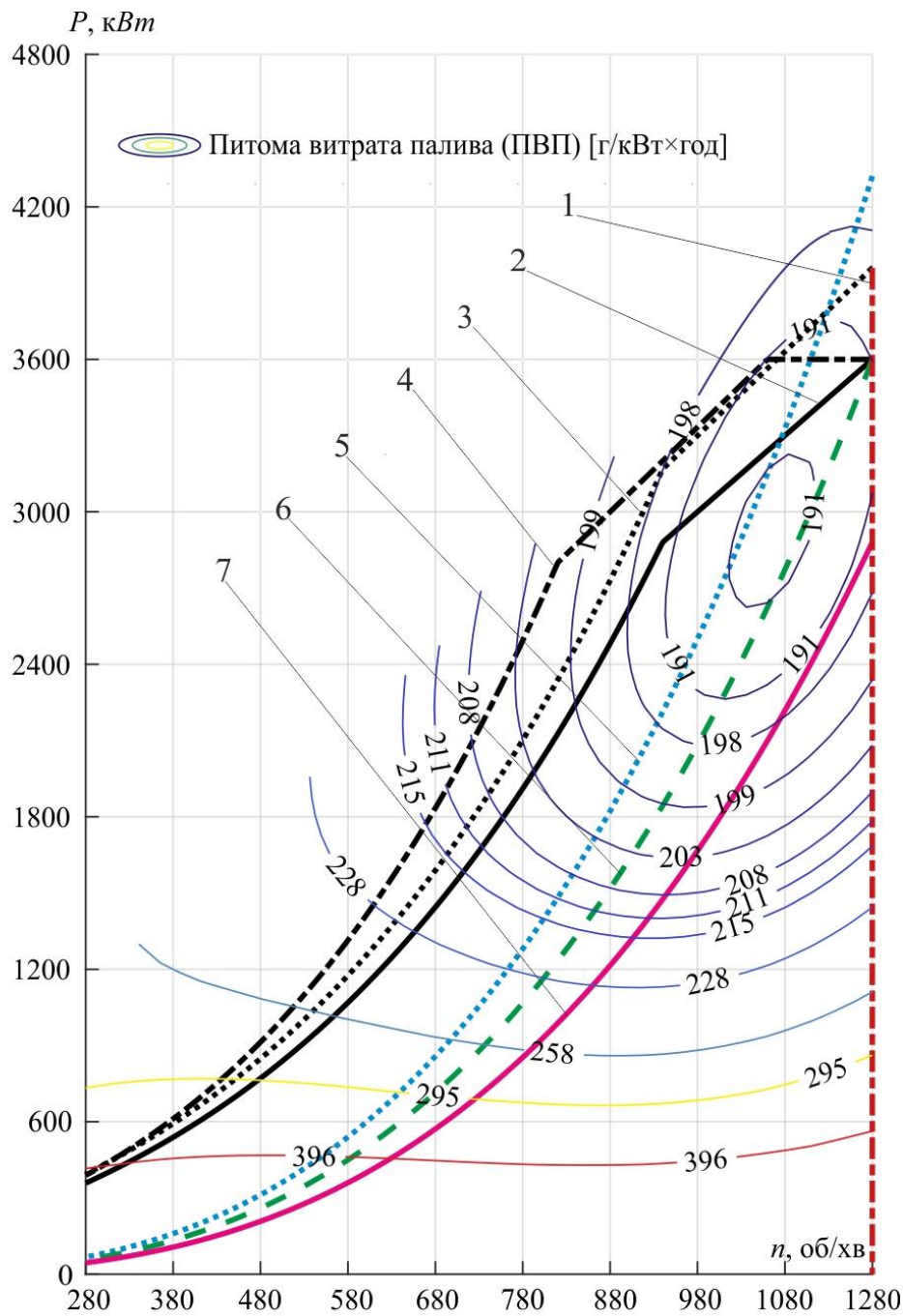


Рис. 1.2 Залежності питомої витрати палива від навантаження на СОДГ і характеристик гребних гвинтів: 1 – 4 – характеристики СОДГ; 1 – загороджувальна; 2 – навантажувальна; 3 – навантажувальна з підвищеним рейтингом; 4 – навантажувальна з послідовним турбонаддувом; 5 – 6 – характеристики гребних гвинтів; 5 – розрахункова; 6 – на вільній воді; 7 – випробувальна.

Значення коефіцієнту доступності інноваційних технологій енергоефективності f_{eff} (1.11) залежить від застосування у СЕУ КПК поновлюваних джерел енергії, особливо сонячної, енергії вітру, які все більше проникають у сектор суднобудування. Але, тривале зберігання енергії є універсальною проблемою в забезпеченні підтримки відновлюваних джерел на основі електроенергії з високою доступністю в залежності від сезону. Одним із шляхів подолання цієї проблеми є використання водню в якості енергетичного вектору, за допомогою якого сонячна енергія та енергія вітру перетворюється, зберігається та відновлюється у потрібний момент. Водень, отриманий з води методом електролізу, зберігається у вигляді стислого газу або метал-гідриду, потім використовується зі сховища для вироблення електроенергії у [паливному елементі](#).

У [61] авторами визначені переваги і проблеми різних типів паливних елементів. Розглядаються можливі обмеження шкідливих викидів різних типів паливних елементів, реальні пристрої для торгових суден і військових кораблів та проекти потенційних інновацій і потреб досліджень для області паливних елементів.

Детальний аналіз ефективності суднової гібридної системи живлення постійного струму здійснено у [209]. Також авторами розроблені алгоритми оптимізації системи керування за критерієм мінімуму витрати палива при різних умовах навантаження та досягнуто близько 15% економії палива з оптимально налагодженим накопиченням енергії в досліджуваній системі постійного струму.

Коефіцієнт енергоефективності традиційних СЕУ КПК, потужність яких зумовлюється тільки кількістю [СОДГ](#), може бути знижені шляхом правильної інтеграції відновлюваних джерел енергії. В останні роки, [сонячні генеруючі елементи](#) (СГЕ) (фотоелектричні елементи – ФЕ, англ. [photovoltaic](#) – PV) застосовані в СЕУ з метою скоротити викиди парникових газів, підвищення енергоефективності та зміцнення стабільності СЕЕС. Тим не

менше, використання занадто великої кількості сонячних батарей, може збільшити витрати на капітальні вкладення і зробити систему живлення нестабільно через невизначеність, пов'язану з сонячною енергією [19, 201]. Крім того, у широкому спектрі досліджень [6, 50, 66, 210, 217, 219] встановлено, що використання **систем накопичення енергії** (СНЕ) (англ. *Energy Storage System – ESS*) є одним з найбільш ефективних рішень для забезпечення якості, надійності і потужності СЕЕС і сприяє все більшому розвитку ефективного розподілення енергоресурсів. У деяких дослідженнях [27, 48] показано, що управління СНЕ в СЕЕС з багато-шинними конструкціями, які будуються за технологією гнучких (керованих) систем змінного струму (англ. *Flexible Alternative Current Transmission Systems – FACTS*) і являють собою єдині електроенергетичні системи (англ. *Western System Coordinating Council – WSCC*) з нерівномірним розподіленням імпедансу, дозволяє зменшувати пікові навантаження, знижати витрати на поновлення живлення і компенсувати негативний вплив на навколишнє середовище.

Гібридні концепції СЕЕС досліджувалися у наступних працях [111, 209]. **Літій-іонні акумулятори** в інтеграції з дизельними СЕУ для режимів **КПК** з вантажно-розвантажувальними роботами досліджено у [111]. Для забезпечення максимальної економії палива, СНЕ використані у переобладнанні балкерів для електроруху в роботі [56]. В інших роботах набули розвитку різні стратегії управління, які вирішували проблеми продовження терміну служби акумуляторів і скорочення витрати палива [17, 191, 209].

Багато досліджень, пов'язаних з гібридними енергосистемами опубліковано у роботах [124, 125, 126, 142, 157, 161, 214, 253]. Зокрема, економічні та екологічні переваги **гібридного дизельного-електричного пропульсивного комплексу** (ДЕПК) із застосуванням **СГЕ** і зберіганням енергії у **СНЕ**, проаналізовані у [125, 126, 142]. Оптимальна схема розподілу

електроенергії для автономного ДЕПК із інтегрованим вітрогенератором (ВТГ) і СГЕ в умовах їх невизначеності з точки зору мінімізації вартості енергії і максимальної надійності запропоновано у [157, 161]. Оптимальні методи удосконалення ДЕПК та СЕУ КПК також запропоновані у [124, 214, 253].

Варто зауважити, що у сучасних періодичних джерелах гібридні КПК займають далеко не перші місця [3, 94, 114]. В роботі [114] СГЕ застосовуються у СЕЕС для зниження вартості палива. Оцінку стабільності і економічного аналізу гібридних ДЕПК вивчено у [3]. Автори роботи [94] запропонували попередній аналіз заходів для зменшення шкідливих викидів у довкілля у портовій зоні. Крім того, інтеграція значної потужності СГЕ та СНЕ в СЕЕС для зниження викидів CO₂ є складним завданням.

Вироблення електроенергії СГЕ в СЕЕС залежить від його положення в океані. Попередні дослідження [63, 119, 159, 169, 204] з використання СГЕ враховують календарні умови, місцевий час, часовий пояс, експлуатаційні координати з точки зору забезпечення судно що рухається енергією. В роботі [159] запропоновано оптимальний вибір розмірів гібридного ДЕПК з урахуванням різних кутів нахилу панелей СГЕ.

Через сильну залежність параметрів і якості СГЕ від кліматичних умов, такі як пора року, місцевий час, експлуатаційні координати отримані поправки для вихідних параметрів панелей СГЕ в залежності від їх розташування на судні.

Автори [63] запропонували оптимальну принципову структуру гібридного ДЕПК з вітрогенераторами та різними станами довкілля з методами поетапної адаптації СГЕ до експлуатаційних умов. Детальні моделі гібридних ДЕПК з СГЕ створені і оптимізовані в роботах [119, 169], які враховували фактичні умови довкілля і невизначені експлуатаційні режими. Метод оцінки глобальної освітленості від нахилу СГЕ був розроблений в [204], який враховував температуру і розподіл сонячного спектру.

Варіант структурної комплектації гібридного ДЕПК показано на Рис. 1.3 додатку Б.2. Інші рішення, пов'язані із інтеграційними удосконаленнями гібридних ДЕПК, СЕУ і СЕЕС, які їх забезпечують, наведені у [16, 51, 96, 97, 127, 129, 195].

Гібридний ДЕПК, представлений на Рис. 1.3 додатку Б.2., розроблений на основі КПК офшорного судна, працюючого у режимі динамічного позиціонування і складається з наступних елементів:

СГЕ на базі модулів KC200GT, номінальною потужністю 10 кВт (максимальне значення 11,5 кВт) та вихідною напругою 30 – 60 В.

СНЕ на базі літій-іонних акумуляторних батарей (ЛІАБ), напругою системи 48 В та ємністю 4000 А×год.

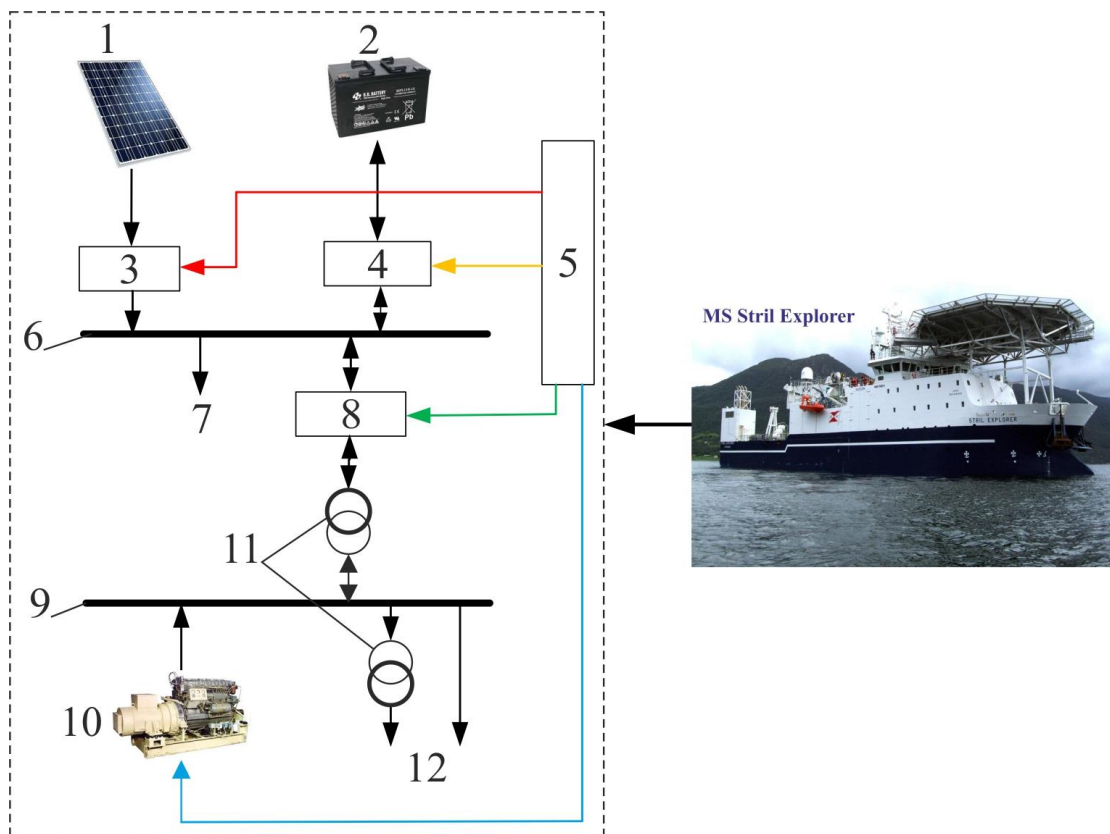


Рис. 1.3 Структурна функціональна схема гібридного ДЕПК: 1 – сонячні генеруючі елементи (СГЕ, англ. *photovoltaic (PV) generation system – PVGS*); 2 – система накопичення енергії (СНЕ, англ. *ESS*); 3, 4 – перетворювач (конвертер) постійної напруги (ППН, англ. *DC/DC converter*); 5 – система керування (СК) гібридним ДЕПК; 6 – ланка постійного струму

[До змісту](#)

(ЛПС, англ. [DC-link](#)); 7 – до споживачів постійного струму, наприклад – гальмівних опорів (англ. *resistor back unit – RBU*); 8 – інвертор напруги (ІН, англ. *voltage source inverter – VSI*) або струму (ІС, англ. *current source inverter – CSI*), 9 – головний розподільний щит високої напруги (ГРЩ ВН, англ. *high voltage switchboard – HVSB*); 10 – суднова електроенергетична система (СЕЕС, англ. *ships power plant – SPP*) з середньо–обертовими дизель–генераторами (СОДГ, англ. *medium speed engine – MSE*); 11 – трансформатори напруги, 12 – до споживачів змінного струму, зокрема – гребних електродвигунів ([ГЕД](#), англ. *propulsion electric motor – PEM*), підрулюючих пристроїв ([ПП](#), англ. *thruster – THR*), головного розподільного щиту низької напруги (ГРЩ НН, англ. *low voltage switchboard – LVSB*).

Силові ППН типу *PSC18*, номінальною потужністю 40 кВт, номінальними струмом і напругою на [DC-link](#), 200 А і 450 В, відповідно, призначені для підвищення та регулювання напруги на виході СГЕ і обмеження вхідного струму, а також для розрядки і зарядки акумуляторних батарей СНЕ. Ці перетворювачі є двонаправленими, дозволяють регулювати вихідну напруга з обмеженням струму і використовуються для перерозподілу потужності між компонентами гібридного ДЕПК.

Силові модулі ІН (*VSI*) типу *PWS-F (PWS-W)*, максимальною сукупною потужністю 300 кВт, напругою 450 В постійного струму, 440 В змінного струму і частотою 50 Гц, які дозволяють регулювати коефіцієнт потужності в залежності від навантаження [СОДГ](#).

Захисні резистори (*RBU*), потужністю 5 кВт кожний, призначені для уникнення перевантаження СГЕ і СНЕ.

Силові трифазні трансформатори відповідної потужності, призначені для узгодження напруг між розподільними щитами ВН і НН (*HVSB* і *LVSB*) СЕЕС (*SPP*) гібридного [ДЕПК](#).

Удосконалення подібних комплексів с точки зору підвищення їх енергоефективності є комплексною проблемою, вирішення якої потребує системного аналізу експлуатаційних режимів КПК.

1.2. Проблеми побудови єдиних електроенергетичних систем і розвиток теорії і методів дослідження експлуатаційних режимів з урахуванням ситуаційних чинників технологічного процесу

Передача потужності до гребних гвинтів при роботі судна у режимі *DP* є найбільш непрогнозованою у зв'язку із відсутністю достатньої інформації щодо залежності вищезначених коефіцієнтів від зміни експлуатаційного режиму. На етапі прогнозування змін ситуаційних чинників та експлуатаційних показників, що мають впливати на коефіцієнти енергоефективності, потрібно визначитися із граничними умовами для виведення залежностей, що використовуються для побудови прогнозів.

Міжнародна морська організація (англ. *International Maritime Organization* – *IMO*) дає визначення: «Система динамічного позиціонування – система, яка автоматично контролює судно для утримання його позиції і курсу виключно засобами активного використання суднових рушіїв». Щоб ефективно справлятися зі своїм головним завданням – утримуватися у заданій позиції, судно повинно мати такий КПК, який здатен виконувати всі завдання, позначені маневрово-технічними характеристиками – відповідно до технологічного призначення судна.

Однокорпусні судна оснащують системою *DP*, яка обладнуються двома головними двигунами і, або гвинтом регульованого кроку (англ. *Controllable Pitch Propeller* – *CPP*), або гвинто-рульовою колонкою (англ. *Azimuth Drive Thrusters*), носовими і кормовим ПП.

Так, самохідні нафтовидобувні напівзаглибні платформи, оснащують системами класу *DP2* або *DP3* і мають 6 – 8 *азимутальних рушіїв*, здатних за будь-яких погодних умов утримувати платформу у заданій позиції.

Дослідження принципів синтезу і функціонування *DP* таких суден, оснащених складним КПК, виявляє широке застосування типових ППД-
[До змісту](#)

регуляторів у різних контурах системи керування, не дивлячись на суттєві результуючі недоліки (складність параметризації, чутливість до шумів, необґрунтовані витрати енергії й інші) [52, 197, 268].

Також відомо [265], що у деяких *DP1* можна «загасити» головний і допоміжний двигуни, *ПП*, і все одно судно утримає позицію навіть у складних погодних умовах. Іноді робота з *DP2* суден, де присутня глобальна навігаційна супутникова система (ГЛОНАСС) (англ. *Global Navigation Satellite System – GNSS*) із виведеним пристроєм *Fanbeam® (DP reference system)* [133] і працюючим автопілотом, зводиться, по суті, до роботи *DP1* [253]. А найсучасніші бета-версії *K-POS (Single Dynamic Positioning system)* [87] не забезпечують керованість судна у деяких режимах. Зрозуміло, що підвищення швидкодії системи *DP* дає суттєві технологічні переваги, але енергетична ефективність таких *DP* дуже сумнівна.

СЕУ КПК, при впливі на судно зовнішніх факторів і зміни у зв'язку з цим експлуатаційних умов, можуть демонструвати різноманітну нелінійну поведінку.

У свою чергу, при експлуатації подібних КПК, реакції на збурення можуть відповідати, як нормальному, так і аномальному або аварійному (перед аварійному) режимам, що змушує розробників шукати шляхи по зниженню негативних наслідків, а в ідеалі – по їх запобіганню [253]. Оцінюючи ризики виходу КПК із стабільного стану при зовнішніх збуреннях виникає необхідність прогнозу його поведінки в звичайних і нормальних умовах за допомогою засобів моделювання.

У якості більш раціонального варіанту забезпечення роботи КПК є використання ГРК. Їх безперечна перевага в тому, що вони дозволяють забезпечити роботу приводного двигуна в номінальному режимі при практично будь-яких умовах плавання за рахунок зміни кута розвороту лопатей. Однак коефіцієнт корисної дії (ККД) ГРК в номінальному режимі завжди менше, ніж у ГФК.

трансформатори; $TV4 - TV7$ – понижуючі трьох-обмоткові трансформатори ($Y/\Delta/Y$); $M1 - M8$ – АД підрулюючих пристроїв (ПП) і вантажних насосів; $CC1 - CC4$ – перетворювачі частоти (ПЧ) з ланкою постійного струму ([DC-link](#)); HV – висока напруга, $3300 \leq HV \leq 11000$ В; LV – низька напруга, $220 \leq LV \leq 690$ В.

У результаті аналізу схеми, наведеної на [Рис. 1.4](#), можна показати, що в сталому режимі роботи судна, коли зміна напрямку вектору руху визначається зовнішніми збуреннями, застосування частково інваріантних до основних збурень регуляторів частоти і напруги на шинах СОДГ дозволить включити «інтегральну складову управління» на усіх ділянках розподільних щитів, що гарантує рівномірне завантаження (астатизм) усіх паралельно-підключених [СОДГ](#).

В якості джерел електричної енергії в СЕУ [КПК](#) використовуються [явнополюсні безщіткові синхронні генератори](#) високої напруги з дизельним приводом. Найбільш зручною формою математичних моделей таких машин є форма подання машини в ортогональній системі координат d, q , яка жорстко пов'язана з ротором і обертається разом з ним з синхронною швидкістю. Дана система координат має переваги перед нерухомою системою координат a, b, c . У нерухомій системі координат при обертанні ротора осі обмоток статора і ротора взаємно переміщуються, тому фазні змінні напруги, струму та потокозчеплення виражаються періодичними величинами. Зображені вектори напруги, струму та потокозчеплення в перпендикулярно розташованих осях d, q є постійними і нерухомими відносно осей, що виключає взаємоіндукцію між ними і спрощує аналіз моделі.

До недоліків моделювання в осях d, q можна віднести неможливість дослідження несиметричних режимів. З метою підвищення наочності моделювання та спрощення аналізу результатів зручно користуватися рівняннями у відносних одиницях [[232](#)].

Функціональні зв'язки, що існують між елементами СЕУ [КПК](#), описуються системами нелінійних алгебраїчних і диференціальних рівнянь високого порядку, що характеризує СЕУ КПК як складну динамічну систему, тому при їх проектуванні необхідно однаково ретельно розглядати процеси як в електричних машинах, так і в ПЧ.

Теорія електричних кіл та електричних машин змінного струму дозволяє записати рівняння основних функціональних елементів СЕУ безвідносно до вибраних координатних осей і систем координат. Ці рівняння враховують баланс напруги статорних і роторних контурів, вирази статорних і роторних потокозчеплень, баланс моментів електричних машин і баланс струмів у вузлах ланцюгів [[231](#)].

Для високоякісного керування [ГЕД](#) в широкому діапазоні регулювання швидкості, в тому числі в зоні нульових швидкостей, необхідно мати можливість швидкого, безпосереднього управління моментом ГЕД. Для отримання необхідного моменту необхідно обчислювати координати ГЕД, які недоступні прямому вимірюванню, і управляти амплітудою і фазою вектору напруги так, щоб підтримувати на заданому рівні потокозчеплення і момент.

Реалізація алгоритмів векторного керування з використанням математичних моделей асинхронного ГЕД базується на інформації про фазні струми, що протікають в обмотках статора електродвигуна і швидкості обертання ротора. Ця ж інформація використовується в якості сигналів зворотного зв'язку. Математична модель в алгоритмах [векторного управління](#) використовується для обчислення деяких неспостережуваних параметрів ГЕД, які потім в процесі управління.

В залежності від способу передачі потужності до гвинта та необхідної її потреби, АГРК підрозділяються на основні дев'ять типів ([Рис. Б.29](#)).

Стандартні модулі *Z-Drive* ([Z-Drive](#)) фірми *Rolls-Royce* з вхідною потужністю від 250 ÷ 3700 кВт ([Рис. Б.29, а](#)) для встановлення на буксирах,

[До змісту](#)

починаючи від 11 до більш ніж 120 тон (однолінійну схему СЕУ [КПК](#) представлено на [Рис. Б.1](#)).

Модульна конструкція дозволяє змінювати конфігурацію, розмір і тип монтажу, щоб як найбільш відповідали вимогам користувача. Вони доступні зі зворотним обертанням гвинтів для забезпечення високої ефективності рушія з малим осіданням або *FPP/CPP* пропелерів, відкриті або каналні, з діаметром відповідно до водотоннажності судна.

АГРК типу *Azipul (azimuthing pulling propeller)* з низьким опором та високою ефективністю, що поєднує в собі переваги тяги гвинта з гнучкістю використання практично будь-якого типу приводу потужністю від 900 ÷ 5000 кВт ([Рис. Б.29, б](#)) відповідно до конкретних вимог суден різного призначення (однолінійну схему СЕУ КПК представлено на

[Рис. Б.2](#)). Такі [ПП](#) призначені для швидкостей до 24 вузлів, зберігаючи при цьому відмінну маневреність. Вони забезпечують високу гідродинамічну і паливну ефективність з низьким рівнем шуму і вібрації. Значна площа керма напряду забезпечує відмінну курсову стійкість, а також, з точки зору мінімізації деградаційних ефектів, блоки також дозволяють оптимізувати кормову частину корпусу для мінімального опору і спрощеної конструкції.

АГРК *Contaz® (thruster with contra-rotating propellers, Рис. Б.29, в)* зі зворотним обертанням гвинтів забезпечують високу ефективність рушія і зниження вібрації для суден з малим осіданням (однолінійну схему СЕУ [КПК](#) представлено на [Рис. Б.12](#)).

Підвищення ефективності може бути в районі 10÷15 відсотків у порівнянні зі звичайними [азимутальними рушіями](#). Кормові ГФК повертають частину втрат енергії в потоці, а також значні втрати обертання, тому є перспективою зменшення нижньої межі потужності. АГРК *Contaz®* мають великий діапазон довжини стебла і ідеально підходять для пасажирських/автомобільних поромів і суден, що працюють в регіонах з обмеженими умовами експлуатаційних режимів.

Надійні надміцні стандартні модулі *L–Drive* (*L–drive*, Рис. Б.29, г) – це АГРК, розроблені спеціально для тривалої і надійної експлуатації у режимах *DP* для бурових суден та морських бурових установок (однолінійну схему СЕУ КПК представлено на Рис. Б.19). Компактна конструкція дає переваги для монтажу у заводських умовах і при технічному обслуговуванні, які мають два способи підключення підйомних приводів для підводного монтажу і зняття: фланцева із середини судна до ПП або зовні на фланці рушія, а засоби управління ГРК доступні з закритого гідравлічного контуру.

Висувні конструкції АГРК моделей *UL* (*azimuth thruster type*) забезпечують швидкий гідравлічний підйом і опускання блоку (Рис. Б.29, д), що дозволяє йому втягуватися в корпус, коли він не використовується, для зниження опору руху судна (однолінійну схему СЕУ КПК представлено на Рис. Б.21). Моделі *UL* призначені для горизонтального приводу із автоматичною системою від'єднання валу. *ULE* моделі призначені для вертикального приводу. Обидві доступні із ГФК або ГРК.

АГРК типу *Swing–UP* (*thrusters type*, Рис. Б.29, є) опущеному положенні діють як *азимутальні рушії* з векторизацією тяги в будь-якому потрібному напрямку для приведення в рух або утримання судном позиції (однолінійну схему СЕУ КПК представлено на Рис. Б.16). У піднятому стані та розташовані у поглиблення в корпусі спеціальної форми, може функціонувати як тунельний рушій (ПП тунельного типу).

АГРК *Rolls–Royce* типу *Mermaid*TM (*azimuth thruster*, Рис. Б.29, ж, з) забезпечує гнучкість в конструкції судна і компонування обладнання (однолінійну схему СЕУ КПК представлено на Рис. Б.8). Вони поєднують в собі функції гребного двигуна, головного гвинта, кермової установки і кормового ПП в одному блоці. Льодові–зміцнені конструкції типу *ICE/HICE* (*Mermaid podded propulsors ICE and HICE*) спеціально розроблені для усіх варіантів комплектації СЕУ КПК, працюючих в найсуворіших арктичних

умовах із забезпеченням гідродинамічної продуктивності у діапазоні потужностей від 4000 до 18000 кВт ([Рис. Б.29, ж](#)).

Моделі типу *PUSH* (*Mermaid Push podded propulsors*, [Рис. Б.29, з](#)) потужністю від 4000 до 12000 кВт призначені для роботи на низьких швидкостях, високого навантаження і високих вимог до якості керування у заданому експлуатаційному режимі (однолінійну схему СЕУ КПК представлено на [Рис. Б.6](#)). Оснащені гідродинамічно оптимізованими соплами для досягнення максимальної ефективності, вони дають можливість операторам максимально використовувати всі переваги економії електроенергії.

ПП на базі АГРК типу *ТТ–РМ* (*Permanent magnet tunnel thruster*, [Рис. Б.29, і](#)) найостанніша конструкція ПП від *Rolls–Royce* з використанням технології електродвигуна змінного струму з постійними магнітами потужністю 1000 і 1600 кВт, розроблених для найвимогливіших потреб режимів *DP* (однолінійну схему СЕУ КПК представлено на [Рис. Б.23](#)).

Математичне моделювання регуляторів обертів ПП СЕУ КПК, працюючих у режимі *DP*, що забезпечують стабільність тяги, обертального моменту на валу у всьому діапазоні регулювання і, власне, підвищення ефективності передачі потужності до гребного гвинта з одночасним утриманням судном позиції проводиться виходячи з нижченаведених припущень.

Кожен тип ПП має свої конструктивні особливості і деякі важливі параметри можуть мати дещо інші значення для різних видів ПП, але, об'єднуючим фактором для них є навколишнє середовище. Згідно плану зони упорів і сил, що діють на судно з ПП *азимутального типу*, стан кожного двигуна задається вектором тяги $u = (u_x, u_y)$. Всі двигуни моделюються в прямокутній системі координат, хоча можна використовувати і полярні координати для зафіксованих двигунів ПП, що не обертаються азимутально, шляхом включення постійного кута в матриці конфігурації.

Використання однакової системи координат для всіх типів двигунів здається менш заплутаним і матиме одне-два додаткових обмеження для кожного зафіксованого двигуна [257]. Одним з головних питань залишається усунення нижчих гармонік вихідної напруги після ПЧ на обмотках ГЕД з урахуванням 10% зниження, або підвищення напруги [260].

Таким чином, вирішення завдання удосконалення функціонування *DP* 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 [260].

Коригування коефіцієнту елементів конструкції судна (f_j) та коефіцієнту доступності інноваційних технологій енергоефективності (f_{eff}) (1.1), (1.2) 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.

1.3. Розвиток теорії багатоконтурних систем управління активними засобами утримання судна у заданій позиції

СОДГ СЕУ КПК зазвичай розраховані на короткочасні перевантаження до 115% від номінального. Генераторні агрегати розташовані по три у двох машинних відділеннях (МВ). Кожне МВ має незалежну систему допоміжних механізмів, що включає в себе паливну систему, систему повітря низького тиску і охолоджуючої води, які мають можливість перехресного підключення. Дві групи з трьох СОДГ підключені до двох основних секцій шин високої напруги. Секції з'єднані між собою секційним вимикачем.

Від ГРЩ високої напруги через знижуючі трансформатори отримує живлення розподільні щити (РЩ) власних потреб, а також трансформатори подачі живлення на електроприводи бурової установки. Система розподілу низької напруги складається з двох основних шин лівого та правого бортів на рівні головної палуби, які живляться від головних трансформаторів високої напруги, з'єднаних між собою вимикачами, що зблоковані з трансформатором фідерних вимикачів (Рис. 1.4).

Кожен СОДГ обладнаний незалежною системою контролю та регулювання потужністю (Рис. 1.5), які містять у своєму складі: реле управління генератором, цифровий модуль синхронізації та розподілу навантаження, програмований логічний контролер (англ. *Programmable Logic Controller* – PLC) з інтерфейсами введення/виводу, силові перетворювачі і пульт управління з панеллю сигналізації. СОДГ укомплектовані дистанційною системою управління (ДАУ, англ. *Electro–Motive Diesel Engine Control system* – EMDEC), яка забезпечує контроль швидкості із замкнутим контуром, інжекторне впорскування, старт/стоп функції і сигналізацію. ДАУ СОДГ живляться від мережі 24/48 В постійного струму виділеної батареї/зарядного пристрою.

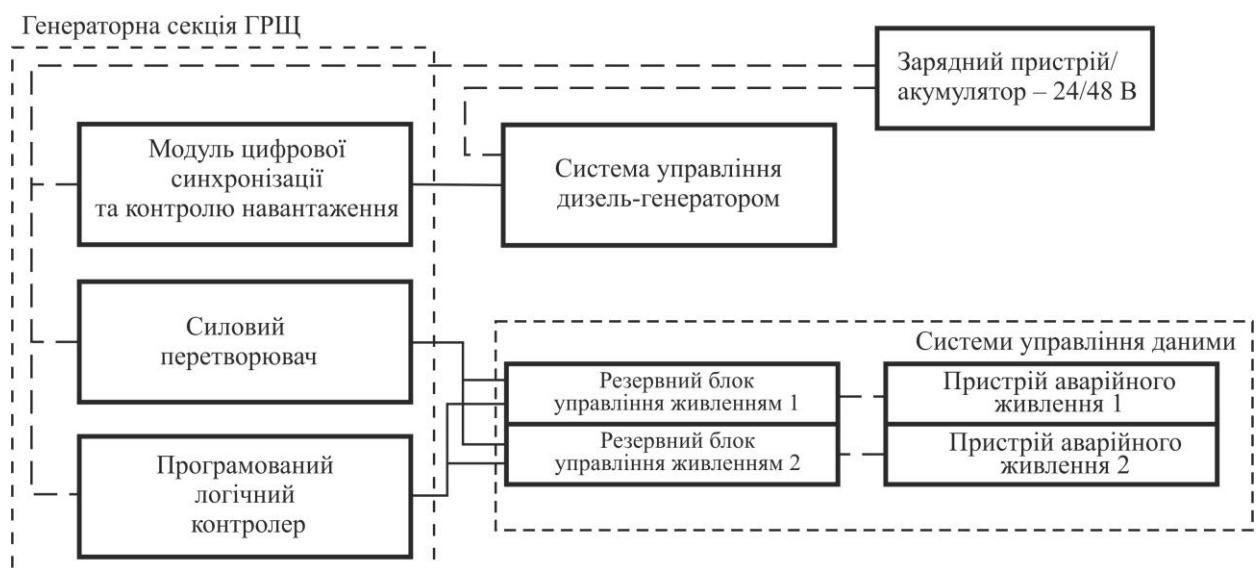


Рис. 1.5 Конфігурація ДАУ СОДГ СЕУ КПК

На кожній генераторній секції встановлено наступне обладнання: управляючий *PLC*; реле зворотної потужності (англ. *Power Management Relay* – *PMR*); силовий перетворювач (англ. *Power Transducers* – *PT*); модуль цифрової синхронізації та контролю навантаження (англ. *Digital Synchronizer and Load Control Module* – *DSLСM*); ДАУ СОДГ (англ. *Electro–Motive Diesel Engine Control system* – *EMDEC*); система управління даними (англ. *Data Management System* – *DMS*); резервний блок управління живленням (англ. *Redundant Power Management Processors Unit* – *RPU*); пристрій аварійного живлення (англ. *Uninterruptible Power Supply* – *UPS*).

СОДГ СЕУ КПК може запускатися з передньої панелі у ручному режимі, або дистанційно у режимі «Авто» системою *DMS*. Розподільчий *PLC* керує функціями двигуна, а модуль цифрової синхронізації та контролю навантаження контролює синхронізацією і розподілом потужності.

Система *DP* КПК є подвійно-резервованою (Рис. 1.6). Дві основних операторських консолі управління (англ. *Automatic Station Keeping* – *ASK1*, *ASK2*) містять керуючі процесори, клавіатури управління і дисплей. Система *DP* може контролювати до восьми двигунами ПП, у звичайному режимі – до чотирьох. Управляючі консолі розташовані у ходовій рубці, де також знаходяться три пристрої обробки сигналів (англ. *Signal Processing Unit* – *SPU1*, *SPU2*, *SPU3*), які представляють собою модулі вводу/виводу сигналів від блоків датчиків положення, гіроскопів, датчиків переміщення і вітру. Кожен окремий блок має незалежний канал зв'язку з основним центральним управляючим комп'ютером.

Два модулі обробки сигналів (*SPU4* та *SPU5*), розташовані на ГРЩ, виконують функцію обробки сигналів управління живленням від двох резервних інтерфейсних пристроїв вводу/виводу.

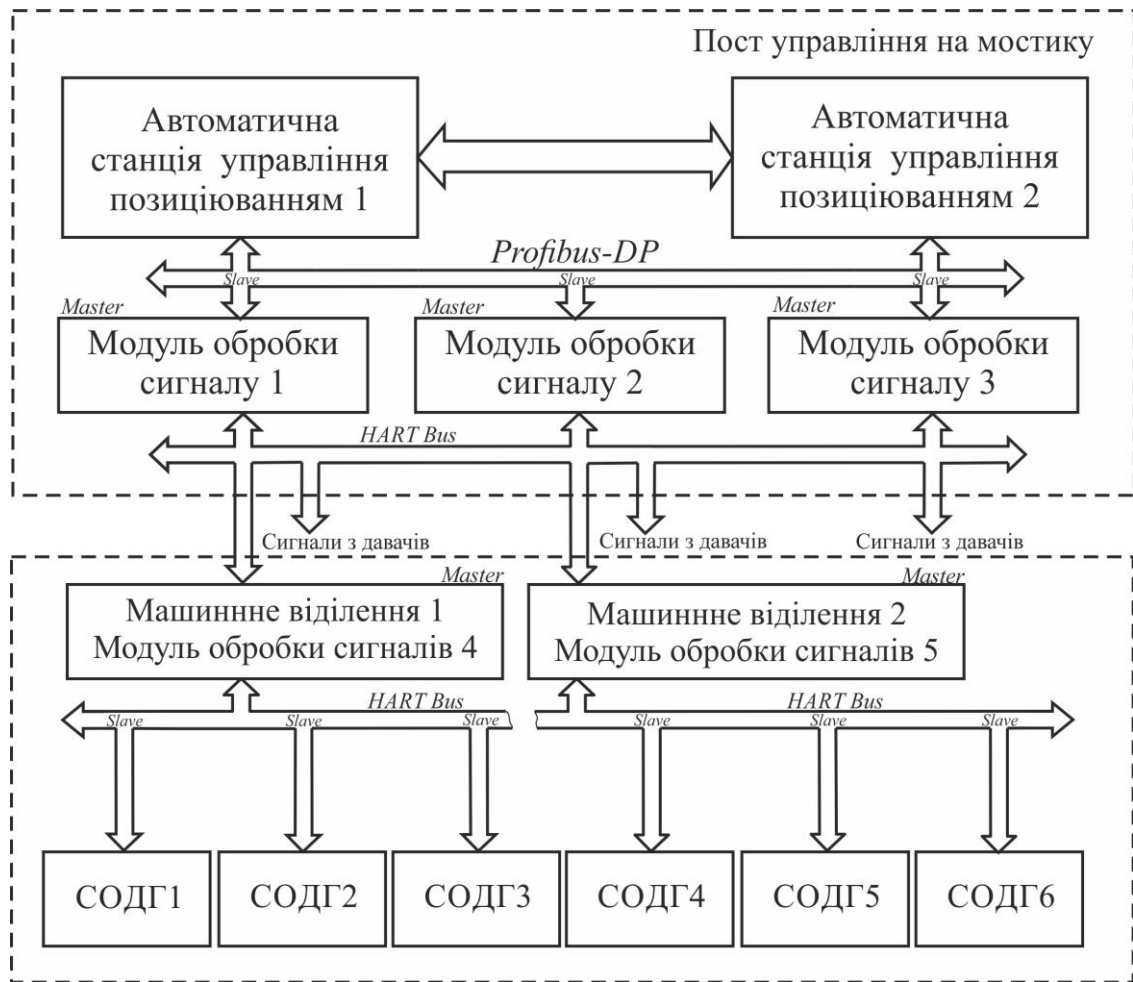


Рис. 1.6 Структура системи *DP КПК* судна: автоматична станція управління позиціюванням (англ. *Automatic Station Keeping* – *ASK*); модуль обробки сигналу (англ. *Signal Processing Unit* – *SPU*); цифровий промисловий протокол передачі даних (англ. *Highway Addressable Remote Transducer Protocol* – *HART*).

Таким чином можна констатувати, що підвищення енергоефективності подібних багатоконтурних СК можливо тільки за умови моніторингу всього перетину енергетичного процесу, що неможливо без розробки відповідної методики складання його вхідно/вихідних характеристик для певної однолінійної схеми СЕУ КПК. Така методологія дозволить урахувати вплив усіх чинників енергетичного процесу на експлуатаційні коефіцієнти енергоефективності (1.1), (1.2), (1.3).

На Рис. Ж.11 наведено фрагмент перетину розподілу енергетичного потоку для СЕУ КПК багатоцільового судна з допоміжними ПП типу *L-Drive*

(Рис. Ж.5). Методика розрахунку відповідних коефіцієнтів енергоефективності на базі наведеної схеми розглядається у підрозділі 2.3.

1.4. Етапи підвищення ефективності функціонування в залежності від експлуатаційного режиму

Експлуатаційні режими СЕЕС і СЕУ КПК взагалі здійснюється при паралельній роботі двох або більшої кількості СОДГ, одному відключеному та одному аварійному дизель-генераторі (АДГ). У штатному режимі, зазвичай, два працюючих СОДГ завантажені до 20 – 45 % своєї номінальної потужності, а при навантаженні будь-якого з цих генераторів до рівня 80%, вмикається до паралельної роботи з мережею третій генератор, АДГ вмикається на протязі 30 секунд після знеструмлення. У деяких СЕЕС, однолінійні схеми яких наведено у додатку Б.3 (Рис. Ж.1 – Рис. Ж.10), штатний режим забезпечується роботою лише одного, основного СОДГ, а другий знаходиться у резерві і готовий до підключення на паралельну роботу з основним генератором.

Для більшості подібних СЕУ КПК зазначена особливість функціонування єдиної СЕЕС обумовлена вимогами безпеки, оскільки при експлуатації судна обов'язково необхідний динамічний резерв електроенергії, чого вимагають Морські реєстри.

Наявність такого істотного (не меншого, ніж 100 %) динамічного резерву енергії пов'язана з необхідністю ефективного демпфування непередбачуваних пікових навантажень у єдиній СЕЕС СЕУ КПК, що можуть призвести до відключення найважливіших споживачів і навіть усього КПК. Така вимога виникає ще й тому, що на запуск відключеного СОДГ з

подальшою його синхронізацією із суднової мережею потрібен хоч і незначний час, але це час, за який із знеструмленим судном може відбутися фатальна аварія.

Таблиця 1.2

Час від подання сигналу на автоматичний пуск до моменту прийому навантаження до номінального значення потужності СОДГ

Потужність, кВт	Час, с
До 100	10
Від 100 до 500 включно	20
Від 500 до 1000 включно	30
Більше 1000	40

Пікові навантаження на єдину СЕЕС СЕУ КПК можуть виникати через особливості експлуатації судна, конкретного типу технологічного процесу здійснюваного судном (динамічне позиціонування, зачеми тралу та ін.), непередбаченим включенням потужних споживачів, особливостями проходження судном вузькостей, складними умовами довкілля, а також недетермінованими навантаженнями, які виникають при зміні експлуатаційного режиму.

Слід зазначити, що СОДГ, обладнанні системами автоматичного пуску (див. підрозділ 5.1), таких як *PMR* (*Power Management Relay*) у складі *PMS* (*Power Management System*), у період очікувань знаходяться у “гарячому резерві”. Це означає, що як мінімум, здійснюється постійний підігрів двигуна (для єдиних СЕЕС з рідинним охолодженням).

Електростанція з автоматичним пуском може прийняти на себе навантаження за декілька секунд (див. Таблиця 1.2) з моменту зникнення напруги на ГРЩ, їй не потрібен час на додатковий прогрів двигуна. Крім того, немає необхідності вручну здійснювати перемикання у ГРЩ – всі необхідні комутації виконуються автоматично, а під час роботи СОДГ

здійснюється автоматична підтримка частоти вихідної напруги і обертів дизеля.

Для особливо складних умов експлуатації, у спеціальних СЕЕС можлива робота СОДГ й у такому режимі, коли двигун працює постійно, але до генератору навантаження не підключене або мінімальне. У такому режимі витрата пального, хоч і не дуже велика, але теж є. Необхідно пам'ятати, що при переключеннях у аварійні режими необхідна гарантована робота акумуляторних батарей. Тому під час нормальної експлуатації СЕЕС необхідно забезпечити й підзарядку акумуляторних батарей (див. підрозділ [1.1](#)), на що теж витрачається пальне.

Також зрозуміло, що сумарна витрата пального для двох частково завантажених [СОДГ](#) істотно вища, ніж у одного СОДГ, працюючого при аналогічному навантаженні [[35](#), [38](#)].

Зміна технічної складової традиційного підходу до побудови єдиних СЕЕС СЕУ КПК, придатних до застосування для багатьох типів суден, засновано на принципі видозміни структури СЕЕС для багатьох практичних випадків експлуатаційних режимів, у яких робота основного СОДГ може здійснюватися при навантаженнях аж до 80 % номінального значення, а динамічний резерв енергії здійснюється від додаткового статичного джерела електричної енергії (див. підрозділ [5.6](#)) [[35](#)].

Такий підхід відомий, проте його технічна реалізація до сьогодення була практично нездійсненна через відсутність високоефективного статичного джерела енергії, яке помітно перевищує за своїми техніко-експлуатаційними характеристиками класичні акумуляторні батареї та забезпечує високу ступінь пікового навантаження й запасу електроенергії.

Визначені у підрозділах [1.1](#) – [1.3](#) проблеми і окремі задачі у напрямку підвищення енергоефективності СЕУ КПК мають деякі локальні несистемні рішення, що дозволяє констатувати необхідність більш детального

[До змісту](#)

дослідження саме енергетичних потоків на усіх перетинах від [СОДГ](#) до рушіїв з урахуванням не стільки стану довкілля скільки ситуаційних чинників та зміни експлуатаційних режимів.

Моніторинг енергетичних процесів у судновій енергетичній установці комбінованого пропульсивного комплексу при застосування альтернативних джерел живлення розглянуто у підрозділі [3.6](#).

1.5. Стан розвитку систем підтримки прийняття рішень у галузях проектування та дослідження

Корегування конструктивного коефіцієнту енергоефективності транспортної технології $K_{KKEE(tr)}$ ([1.1](#)) на етапі проектування необхідно починати із визначення буксировочної і встановленої потужності і буксирувального опору проектованого судна з достатньою для практики точністю. Це можливо тільки за результатами випробувань геометрично подібних моделей в умовах часткової динамічної подоби, що викликало появу різних методів обробки отриманих результатів і перерахунку на натурні умови. Зазначені методики протягом десятиліть застосовуються і удосконалюються в опитових басейнах різних країн, що суттєво ускладнило порівняння отриманих проміжних результатів. Аналогічна картина спостерігається при дослідженнях взаємодії в системі корпус – рушій, СЕУ – [КПК](#) тощо.

Для судження про вплив окремих параметрів, що характеризують форму підводної частини корпусу судна, на зміну опору, або параметрів що мали б підвищити ефективність СЕУ на зміну динамічних характеристик КПК, з початку 20 століття проводяться систематичні випробування серій моделей. В цих випадках на основі базових розробляються і випробовуються групи

моделей, що відрізняються планомірною зміною окремих елементів (прийнятих в суднобудівній практиці), в той час як інші параметри залишалися мало мінливими.

До 70-х років минулого століття результати серійних випробувань оброблялися за прийнятими в певній організації методиками і використовувалися для побудови власних емпіричних методів розрахунку буксирувального опору суден з обводами, встановленої потужності СЕУ, динамічних характеристик КПК тощо, побудованими за правилами даної серії або мало від них відмінними [29].

Прийнятий метод дослідження способом «зміни параметрів по одному» є принципово неточним, оскільки як і форма суднової поверхні, динамічні характеристики КПК, так і ефективність СЕУ є функціями великого числа різною мірою залежних один від одного параметрів, так що зміна одного з них автоматично призводить до зміни інших.

Корегування експлуатаційного коефіцієнту енергоефективності [транспортної стратегії](#) K_{EKEE} (1.3) неможливо без застосування коефіцієнту доступності технології компенсації деградаційних ефектів f_{degr} (1.12), що дозволить вплинути на конструктивний коефіцієнт енергоефективності технології [DP](#) $K_{KKEE(DP)}$ (1.2).

Оскільки проблеми, які характерні для СЕУ КПК, що експлуатуються у режимах *DP*, носять системний характер, то вони потребують відповідного застосування науково-дослідницького апарату.

На лініях рушіїв втрати гребних гвинтів, викликані осьовим припливом води, залежать від наступних ефектів, які сприятимуть зменшенню тяги гвинта і крутного моменту:

– надходження води перпендикулярно до осі гребного гвинта, викликане течією від швидкості судна або потоків з інших двигунів з силою в напрямку припливу через відхилення потоку гвинта. Це часто називають крос-поєднанням опорів;

[До змісту](#)

- наявність кавітації для важких навантажень на гвинти (всмоктування повітря) веде до зменшення тиску на лопаті гвинта та може статися під час малого занурення гвинта за рахунок руху судна поперек хвилям;

- екстремальні умови з великими амплітудами руху судна перпендикулярно поверхні води призводить до раптового падіння тяги й крутного моменту з ефектом гістерезису;

- одночасне зниження тяги і зміна напрямку тяги може статися через взаємодію потоку від ПП з корпусом, викликаного ефектами тиску, коли мала тяга ПП проноситься вздовж корпусу. Це згадується як [ефект Коанда](#);

- втрата упору ПП може бути викликано впливом гребного потоку від одного двигуна на сусідні двигуни, та призвести до значного зниження тяги, якщо відповідні запобіжні заходи не будуть прийняті в алгоритмі розподілу упорів на ПП.

Що стосується СЕУ для конкретного типу КПК, то їхній вибір взагалі ніяк не оптимізовано ні з точки зору ефективності самого КПК, ні з точки зору удосконалення експлуатаційних режимів СЕУ, що можна здійснити тільки інтегральними методами [184].

З появою обчислювальної техніки стало можливим обробити первинні результати серійних і одиночних модельних випробувань з допомогою методів багатфакторного аналізу і представити отримані результати у вигляді багатовимірної поверхні, описуваної в вигляді поліномів другого-третього ступеня від параметрів форми корпусу, критеріїв гідродинамічної подібності і критеріїв ефективності СЕУ.

Виконана за останні десятиліття робота по визначенню коефіцієнтів поліномів дозволила створити десятки методик прогнозування буксировочної і встановленої потужностей суден різних типів, при цьому точність таких прогнозів істотно вище, ніж у традиційних методик, описаних, наприклад у [79, 154].

З огляду на велику трудомісткість обчислень за цими методиками вони реалізуються в основному у вигляді ретельно протестованих комп'ютерних програм, що дозволяє користувачам не сумніватися в точності проведених розрахунків за умови правильного вибору відповідної методичної серії з урахуванням всіх обмежень при правильно введеній вихідній інформації. Аналогічним чином останніми роками обробляються дані за коефіцієнтами взаємодії рушіїв з корпусом судна, коефіцієнтами ефективності використання паливо-мастильних матеріалів тощо, що послужило основою для створення методів оцінки впливу конструктивних чинників на пропульсивні характеристики суден та ефективність експлуатаційних режимів [КПК](#).

Програмні продукти, що з'явилися в останні роки, дають проєктантові можливість проводити не тільки визначення буксировочної і встановленої потужностей, оптимального рушія, а й підбирати необхідні компоненти СЕУ. Використання сучасних методів підвищує культуру проєктування, а при виконанні дослідницьких робіт дає досліднику можливість навчитися кваліфікованої роботи з професійними програмними продуктами, що призводить рівень науково-дослідницьких робіт до міжнародних стандартів.

КПК при русі судна забезпечує безперервні упори на рушії (гребні гвинти) для подолання опору води і інерції корпусу за рахунок вироблюваної СЕУ енергії з дотриманням максимальної ефективності. В режимі, наприклад, [DP](#), ефективність СЕУ відходить на другий, але далеко не на самий останній план. Оскільки в КПК для отримання енергії використовуються різні типи головних двигунів, однак, найбільшого поширення набули СЕУ, що мають в якості джерела механічної енергії – дизель (більше 80%). Для сучасних [КПК](#) можна виділити наступні основні типи СЕУ:

– з тепловими або електричними двигунами, а також їхньою комбінацією, що працюють на гребні гвинти фіксованого кроку (ГФК) – в

цих установках управління поступальним рухом судна зводиться до зміни режимів роботи двигунів;

- з тепловими або електричними двигунами, а також їхньою комбінацією, що працюють на гребні гвинти регульованого кроку (ГРК) – в цих установках управління поступальним рухом судна здійснюється зміною режимів роботи головних двигунів і кроку гвинта;

- з тепловими або електричними двигунами, а також їхньою комбінацією, що працюють на ГФК протилежного обертання;

- з тепловими або електричними двигунами, що працюють на ГФК або ГРК і електричними двигунами, що працюють на ГФК із азимутальним ступенем свободи;

- з електричними двигунами, що працюють на ГФК із азимутальним ступенем свободи.

Наведена градація СЕУ КПК не є остаточною, та має дуже багато перехресних комбінацій, тому на етапі проектування стовідсотково вирішити яким типом СЕУ комплектувати обраний варіант КПК досить складно. Тому побудовані судна через певний час, іноді дуже невеликий, потребують перекомплектування по причині неможливості роботи у деяких експлуатаційних режимах, або ж зниження їх ефективності.

Поступальний рух судна або утримання судна у заданій позиції здійснюється комбінованим способом із застосування систем розподілу потужності (електроенергії) (СРП, СРЕЕ, англ. *Power management system – PMS*) і різноманітних регуляторів та систем стабілізації в залежності від типу встановлених компонентів, що забезпечують процеси пуску, зупинки, реверсу і зміни частоти обертання гвинтів.

Найбільш придатними для розв'язання різноманітних задач проектування СЕУ КПК виявляються системи підтримки прийняття рішень (СППР) (англ. *Decision Support System – DSS*) – інтерактивні комп'ютерні автоматизовані системи (програмні комплекси), що призначені для допомоги та підтримки різноманітних видів дослідницької або проектувальної

діяльності при прийнятті рішень стосовно розв'язання конструкторських або дослідницьких проблем (структурованих або неструктурованих). Застосування СППР повинно забезпечити ґрунтовний та об'єктивний аналіз предметної області при прийнятті рішень в умовах постійного розвитку та ускладнення СЕУ КПК [55, 166, 205].

За підтримки обчислювальних засобів СППР у різноманітні підходи повинна надати можливість безпосередньо проектувати, обирати та порівнювати альтернативні варіанти рішень.

1.6. Висновки до розділу

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 якоюсь швидкістю або працює у режимі *DP* із кутом нишпорення визначено приблизну *схему* розрахунку коефіцієнтів енергоефективності.

З іншого боку 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 (f_j) та коефіцієнту доступності інноваційних технологій енергоефективності (f_{eff}) (1.1), (1.2) 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 розрахункове 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);
- 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 *DP* 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 експлуатаційного коефіцієнту енергоефективності транспортної стратегії K_{EKEE} (1.3) неможливо без застосування коефіцієнту доступності технології компенсації деградаційних ефектів f_{degr} (1.12), що

[До змісту](#)

дозволить вплинути на конструктивний коефіцієнт енергоефективності технології DP $K_{KKEE(DP)}$ (1.2).

Підвищення продуктивності СЕУ КПК з архітектурними рішеннями структур, що представлені на Рис. Ж.1 – Рис. Ж.10, можливо за рахунок кореляції коефіцієнту коригування елементів конструкції судна f_j (1.10) 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} (1.13). Подібні кореляції передбачають у перспективі застосовування інтелектуальних стратегій управління ПП і судном у цілому.

Значення коефіцієнту доступності інноваційних технологій енергоефективності f_{eff} (1.11) 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.

РОЗДІЛ 2. СТРУКТУРИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК КОМБІНОВАНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ

2.1. Обґрунтування тематики дисертаційних досліджень

Вибір теми дослідження позначимо як дію, яка повинна надати науковому дослідженню цілеспрямованість, що має ряд особливостей, пов'язаних, в числі інших факторів, із необхідністю формалізації понять, невизначеністю наслідків на момент прийняття рішень та динамізмом реалізації отриманих результатів.

Як констатовано у вступній частині, 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 базується на проведеній експертній оцінці факторів реальності експлуатаційних потреб, виконання та отримання рішення розглянутих у першому розділі проблем і базується на перевірці глибин знання кожної проблеми, визначеної в результаті інформаційного пошуку, здійсненого за наступними показниками:

- актуальність формованої проблеми;
- передбачувана наукова новизна;

[До змісту](#)

- економічна ефективність планового дослідження;
- відповідність дослідження основним напрямкам певної наукової спеціальності та наукової школи;
- можливість реалізації дослідження.

З іншого боку, 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.

Дослідження 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 розроблено структурну схему процесу визначення тематики ([Рис. М.1](#)) 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 (1.1), (1.2), (1.3), 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 нишпорення ψ .

З іншого, боку, при вирішенні проблем системного підходу при прийнятті рішень у дослідницьких роботах при проектуванні СЕУ КПК виникає ряд невизначеностей [189], таких як:

- проблема вибору адекватних цілей та мети при дослідженні енергетичних процесів при передачі потужності у СЕУ КПК з багатьма взаємозалежними критеріями;
- невизначеність впливу неідентифікованого стану факторів довкілля, що є неконтрольованими і такими, які впливають на експлуатаційні режими;
- відсутність або нестача достатніх знань про природу походження збурюючих факторів та їхній вплив на енергетичні процеси;
- неоднозначність очікувань розвитку СЕУ КПК з перспективою на модернізацію; невизначеність напрямів і стратегії розвитку компонентів СЕУ КПК, або так звана різноманітність підходів різних виробників при оцінюванні параметрів і характеристик СЕУ КПК;
- нечіткість та різноманітність інформаційного простору у освітленні і трактуванні результатів досліджень процесів, а також відсутність або недоступність авторитетних підтверджень про достовірність існуючої інформації.

Інноваційність КПК подібних суден зумовлюється роботою у прибережній зоні та необхідністю використання АДЕ у складі СЕУ, що співпадає із пріоритетами розвитку морського транспорту, а саме: створення та упровадження енергозберігаючих технологій на об'єктах автономного енергопостачання.

Формулювання задач у галузі удосконалення застосування АДЕ при проектуванні СЕУ КПК має за мету удосконалення системи контролю та управління енергетичними процесами у суднових гібридних дизель-електричних пропульсивних комплексах (ДЕПК), виконаних із застосуванням АДЕ (Рис. 2.1). Основним завданням при цьому є визначення

– система управління розподіленням електроенергії (СРЕЕ, [PMS](#)); 6 – берегова мережа живлення; 7 – СОДГ; 8 – розподільний щит (РЩ) живлення з берегу; 9 – автоматичний зарядний пристрій (АЗП, англ. charger, *AC/DC converter*); 12 – ЛПС з ППН; 13 – СК гібридним [ДЕПК](#); 14 – ІН або ІС; 15 – ГРЩ ВН; 16 – СЕЕС зі споживачами змінного струму, зокрема – [ГЕД](#), [ПП](#), ГРЩ НН.

Враховуючи вищесказане та на підставі структуризації процесу дослідження ([Рис. М.1](#)) визначено, що функціонування СЕУ [КПК](#) потребує всебічного удосконалення, а **тематика дисертаційних досліджень**, пов’язана із цими проблемами, є адекватною сьогоденню.

На підставі експертної оцінки було обрано тему дисертаційних досліджень та виконано її декомпозицію на комплексну, головні та додаткові завдання і розроблено технологічну карту дослідження ([Рис. К.1](#), [Рис. К.2](#)).

2.2. Декомпозиційна систематизація процесу дослідження

Якщо розглядати сучасну СЕУ [КПК](#) як виділену із сукупності інших типів СЕУ пропульсивних комплексів, то вона виступає цілим по відношенню до навколишнього середовища, що має свої специфічні функції і розвивається за властивими йому законами. При цьому необхідність вивчення окремих важливих сторін СЕУ [КПК](#) може стати наразі більш вагомим чинником у побудові [СППР](#) аніж створення програмного середовища для реалізації останніх.

У 1950 році Йозефом Беккером була розроблена і проведена установка з [азимутальною гвинто-рульовою колонкою](#) (АГРК). За наступний період ці

[До змісту](#)

установки себе позитивно зарекомендували на судах, що вимагають підвищеної маневреності в умовах обмеженого простору. У 1990 році фірма «ABB Group» помістила високомоментний електродвигун всередині корпусу гондоли АГРК і встановила його на буксир «Seilin» зареєструвавши його під брендом Azipod®. З цього моменту цей тип установок почав широко застосовуватися і на інших типах суден. Сьогодні АГРК потужністю до 20 МВт є чудовим пропульсивним рішенням для широкого спектра суден [13, 74, 87, 103].

Останнім часом з розвитком технологій і підвищенням вимог до точності режиму *DP* суден, а також для спрощення маневрів в умовах обмеженого простору роботи, судна все частіше обладнуються АГРК. Вони можуть бути встановлені як додатково, так і в якості основної рушійної установки [14]. Головне завдання полягає в тому, щоб забезпечити стійкість судна і керованість в широкому діапазоні цих типів суден.

Виходячи із принципу складності аналізу енергетичних процесів у СЕУ КПК як об'єкту, необхідно послідовно спрощувати його уявлення зі збереження всіх його істотних властивостей (Рис. М.1).

У [98] розробка і реалізація СЕУ КПК в режимі *DP* за допомогою моделювання апаратної петлі у контролері регулювання оборотів гребного двигуна реалізована, але залишилася проблема динамічного навантаження математичної моделі та практичної реалізації роботи.

Проблема топології та проектування силових перетворювачів розглядається авторами у [30], але оцінка ефективності, дизайн і потенційні експлуатаційні характеристики при застосування у СЕУ КПК залишилися невирішеними. Також без відповіді залишилися питання порівняння з іншими типами перетворювачів потужності, щоб встановити, чи має конкретний тип перетворювача за своєю топологією потенціал для поліпшення експлуатаційних характеристик СЕУ і КПК.

На сьогодні не існує єдиної стратегії побудови СППР при проектуванні і дослідженні СЕУ КПК, але основні принципи уже сформовані. Таким чином:

– СППР, що розробляється повинна бути: на рівні користувача – кооперативною, такою, що дозволяє проектувальнику або досліднику (людині, що приймає рішення – ЛПР) змінювати, удосконалювати та доповнювати рішення, які пропонує система, посиляючи ці зміни у зворотному напрямку для перевірки;

– на технічному рівні – локальною системою, яку можливо встановити на один комп'ютер, що зумовлено необхідністю мобільності ЛПР;

– на концептуальному рівні – керованою моделями (англ. *Model-Driven DSS*) і забезпечувати доступ для дослідження математичних моделей (статистичних, *DMI*-моделей, оптимізаційних, імітаційних);

– в залежності від типів даних, з якими СППР буде працювати – стратегічною, орієнтованою на аналіз значних обсягів різноманітної інформації з альтернативних джерел [140].

У [203] питання розробки сучасної СППР СЕУ КПК розвинуті у напрямку визначення вимог до загальної структури системи проектування і навчання ЛПР, але одночасне моделювання конструкцій СЕУ і КПК та їх реалізація визвали у авторів труднощі до застосування СППР на практиці.

Зокрема у [80] ця проблема була частково вирішена в аспекті застосування нового покоління САПР, щоб забезпечити більш широкий спектр можливих рішень і зниження витрат, але вибір критеріїв ефективності та їх приближення до динаміки фізичних моделей не дали бажаних результатів.

І нарешті у [193] авторами підняте питання оптимізації динамічних характеристик і започатковано розробку стратегії керування СЕУ КПК, але дослідження моделей нелінійних регуляторів та імітаційних моделей СЕУ КПК у *Matlab/Simulink* виконано без адаптації програмного забезпечення до інших СППР. Також не була розглянута проблема узгодження і розосередження параметрів що досліджуються в разі відхилення навантаження СЕУ.

Найважливішою метою створюваної СППР є удосконалення найбільш раціональних варіантів комплектації СЕУ КПК із урахуванням впливу різноманітних факторів, з можливістю достатньо глибокого урахування даних, свідомо перетворених для зручного використання у процесі прийняття рішень та відпрацювати правила прийняття рішень, які на основі об'єднаних відповідним чином даних дадуть можливість ЛПР обґрунтовувати прийняті рішення, використовуючи удосконалюючи фактори при модернізації СЕУ КПК і підвищувати їх ефективність. СППР повинна будуватися на багатовимірних принципах представлення та аналізу даних [155].

На другому етапі після обґрунтування актуальності і доцільності досліджень виконано опис формату процесу прийняття рішення у СППР, яка розробляється.

Виконуючи декомпозицію головної мети виділено ситуаційну ціль – дослідження та виділення математичних моделей експлуатаційних режимів СЕУ КПК у існуючих програмних комплексах, інших СППР з метою виявлення недоліків та існуючих припущень і критеріїв, на підставі чого сформувалась динаміка вирішення задач у спосіб послідовного інтерактивного аналізу ситуативних даних, коли сформована проблема, або її відсутність, розглядається як наслідок вирішення або ускладнення (уточнення) попередньої.

2.3. Принципи декомпозиції енергетичних процесів з урахуванням коефіцієнтів енергоефективності, ситуаційних чинників і маркерів деградаційних ефектів

Відповідно до відомих принципів побудови динамічних моделей [70, 77, 84, 121, 134] декомпозиція [145, 207] об'єкта дослідження – СЕУ КПК –

по суті є розчленуванням на взаємодіючі частини. Уявімо автономну суднову енергетичну систему як сукупність двох підсистем: «СОДГ – джерела енергії» і «споживачі» (СП). При такому цілком очевидному розбитті недетермінованим впливом на СП є вектор діючого значення поміж фазної напруги $\dot{U}_{ph-ph}$, що генерується, а вихідним – вектор струму навантаження $\dot{I}$. Відповідно для СОДГ входом є струм навантаження I , а виходом – напруга U . Вхідні і вихідні впливи виділених підсистем можуть інтерпретуватися по-різному.

Наприклад, при дослідженні енергетичних процесів у ланці постійного струму (*DC-link*) СЕУ КПК (див. підрозділ 5.6) параметри U і I – середні значення напруги і струму, які виражаються з урахуванням коефіцієнта допустимих пульсацій k_{puls_max} . При дослідженні енергетичних процесів у ланках змінного струму $\dot{U}_{ph-ph}$ і $\dot{I}$ – вектори діючих значень напруги і струму, причому вектор струму $\dot{I}$ характеризується модулем I і аргументом фазного зсуву φ , а форма кривих напруги і струму може легко враховуватися коефіцієнтом несинусоїдальності напруги k_{THD} при роботі під навантаженням [72, 99, 224].

Характеристики вхід/вихід для кожного СОДГ повинні бути включені в модель для дослідження процесу передачі потужності до гребних гвинтів. Фрагмент перетину розподілу енергетичного потоку для СЕУ КПК багатоцільового судна з допоміжними ПП типу *L-Drive* (Рис. Ж.5), а також з урахуванням характеристик судна і рушія представлена на Рис. Ж.11, де:

- R_u – опір морської води руху судна, Н;
- v_s – Абсолютна швидкість судна;
- k_p – кількість гвинтів;
- t_s – коефіцієнт горизонтального утримання;
- w_s – коефіцієнт попутного потоку;
- V_a – швидкість руху гвинта відносно води;

[До змісту](#)

- T_p – упор гвинта;
- M – момент гвинта на вільній воді;
- n – частота обертання гвинта;
- M_P – ефективний момент гвинта;
- P_D – загальна постачальна пропульсивна потужність всіх гвинтів;
- k_e – кількість машин, які забезпечують необхідну потужність (наприклад – дизелів);
- P_S – потужність механічна на валопроводі;
- M_S – момент на валопроводі;
- M_B – ефективний момент МОД;
- $\dot{Q}_f$ – вхідний тепловий потік МОД, зумовлений згорянням палива, Дж/с;
- M_{AD} – момент на валі АД, зумовлений різницею моментів на валопроводі і моментом МОД;
- P_{loss_AD} – потужність втрат у АД;
- S_{dc} – електрична потужність автономних інверторів струму (АІС);
- $U_{dc_igct_N}$ – напруга постійного струму на “ключах” АІС відносно нейтралі;
- I_m – струм фази АД;
- P_{loss_PWM} – потужність втрат у перетворювачі частоти з ланкою постійного струму;
- P_{bus_AD} , – електрична потужність АД;
- PF_{AD} – коефіцієнт потужності АД ($\cos\phi$);
- P – електрична потужність СОДГ;
- T_e – електромагнітний момент СГ;
- PF_{bus} – коефіцієнт потужності навантаження;
- T_m – момент на валу СОДГ;
- P_{bus} , Q_{bus} – активна і реактивна потужності загального навантаження.

Навантаження СЕУ **КПК** визначається властивостями і параметрами окремих споживачів, особливо при роботі джерел енергії на споживачі

[До змісту](#)

сумірної потужності, а також і закономірностями випадкових процесів формування групових навантажень, що представляють собою функції великого числа випадкових чинників і їх різноманітного поєднання. Навантаження можуть приймати будь-які значення з обмеженою, заздалегідь відомою, областю та представлять собою будь-яку реалізацію з класу функцій, обумовлених властивістю ДЕПК. Тому при побудові динамічної функціональної моделі СЕУ КПК доцільно описувати підсистему СП областю допустимих значень навантажень і класами відповідних функцій $I(t)$.

Якщо прийняти припущення, що в задачі (6.15) впливи $x(t)$ мають природу кусочно-постійної функції, цілком правомірно, що основні збурення при зміні експлуатаційного режиму СЕУ КПК зазвичай виникають внаслідок зміни показників довкілля, або зміни навантажень на технологічні агрегати на будь-якій ділянці енергетичного потоку. І в тому і в іншому випадках параметри збурюючих впливів зберігаються незмінними досить тривалий час і змінюються стрибкоподібно. З урахуванням даного припущення стає можливим зведення динамічної задачі (6.15) до статичних завдань, що розв'язуються послідовно:

$$F_{obj_seu_cpc}(x, \delta, y) \rightarrow \max_{\delta(t) \in U}$$

$$U_F = \left\{ \delta : \begin{array}{l} g(x, \delta, y) = 0 \\ \varepsilon(x, \delta, y) \geq 0 \end{array} \right\}. \quad (2.1)$$

Такий спосіб вирішення завдань типу (6.15) досить поширений. При цьому структура завдання (2.1) зазвичай передбачається незмінною. Змінюються лише вихідні дані, які враховуються при вирішенні задачі. Якщо завдання ускладнене для вирішення через великі розмірності і високу

складність, до неї можуть бути застосовані методи декомпозиції для статичних задач [12, 69, 91].

Пропонований метод ґрунтується на тому, що завдання (2.1), в процесі прийняття керуючих рішень (підрозділ 5.2), модифікується за складом змінних, цільової функції, що використовується, математичних моделей (Додаток В) і врахованих обмежень (підрозділ 2.4). Така модифікація здійснюється з метою максимального спрощення задачі, за рахунок зведення до мінімуму числа змінних і відповідного перетворення цільової функції і умов завдання. При цьому модифіковане завдання зберігає еквівалентність вихідної задачі. Результатом модифікації повинна стати можливість ефективного вирішення перетвореного завдання з використанням методів нелінійного програмування [11, 41, 46, 135, 200].

Ухвалення управлінських рішень (підрозділ 6.3) в даному випадку проводиться на основі рішення задачі (2.1) змінної структури. При цьому можна говорити про її своєрідну декомпозицію, оскільки вихідна задача зводиться до сукупності спрощених часткових завдань, що вирішуються окремо, а їх координації відповідає вибір часткового завдання. Зазначена декомпозиція може трактуватися як тимчасова, тобто здійснювана в часі. Однак це не означає прямого обліку у завданні фактору часу. Тут він відображає лише чергову модифікацію завдання в момент прийняття керуючих рішень (підрозділ 6.5).

Необхідно зауважити, що модифікація задачі (2.1) і перетворення її в більш просту часткову задачу означає її деяке спрощення. При цьому в загальному випадку не можна гарантувати повний збіг рішень вихідної і модифікованої задач. Воно можливе лише з деякою погрішністю. Тому, кажучи про еквівалентність даних завдань, слід мати на увазі, що вона може мати універсальні рішення у певних межах.

Дана обставина, однак, не є перешкодою для застосування запропонованого методу. При чисельному рішенні аналогічних завдань при дослідженні СЕУ КПК зазвичай визначається не оптимум, що шукають, а

його деяке наближення, тобто рішення завжди відшукується з деякою погрішністю. У зв'язку з цим вказана розбіжність у рішеннях вихідної і модифікованої задач цілком допустима. Важливо тільки, щоб воно не перевищувало заданого граничного значення.

Крім того, в реальних умовах не потрібно отримання точних рішень задач ще й тому, що їх відтворення на об'єкті дослідження з використанням автоматичних систем регулювання (САР) та технічних виконавчих пристроїв завжди здійснюється з похибкою, що істотно перевершує похибки рішення задач перерозподілу потужності у СЕУ КПК.

В основі модифікації задачі (2.1) лежить оцінка експлуатаційного режиму, у якому знаходиться об'єкт дослідження в момент прийняття керуючого рішення. 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.

В найбільш простому випадку, коли прийняття керуючих рішень пов'язується тільки з виникненням збурюючих впливів на СЕУ та КПК взагалі, в якості оцінки експлуатаційного режиму може використовуватися поточне значення вхідної змінної x . У пропонованому методі, на основі аналізу поточного режиму СЕУ КПК визначається склад ефективних змінних завдань, відповідна структура цільової функції, математичної моделі і умови в обмеженнях. Всі несуттєві змінні відкидаються, цільова функція, моделі і обмеження спрощуються, що призводить до спрощення основної задачі в цілому.

Важливою перевагою методу є те, що він не пред'являє особливих вимог до структури завдань, як це має місце у випадку звичайних методів декомпозиції. У зв'язку з цим він може бути використаний практично у будь-якій задачі оцінки експлуатаційного режиму. Важлива лише можливість

[До змісту](#)

поділу і розпізнавання ситуаційних комбінацій змінених координат об'єкта дослідження або управління.

Розглянемо змістовну сторону пропонованого методу, названого декомпозицією за станом СЕУ КПК або ситуаційною декомпозицією. Завдання (2.1) зводиться до сукупності часткових задач, які відповідають певним експлуатаційним режимам об'єкта – СЕУ КПК. При цьому виникає додаткове завдання розпізнавання поточної ситуації, яка визначає відповідну часткову задачу.

Дане завдання трактується як завдання координації, тоді як часткове завдання розглядається, як аналог локальної задачі. Задача розпізнавання поточного експлуатаційного режиму, яку ототожнюють із завданням координації, сформулюється таким чином:

$$\begin{pmatrix} x \\ \delta \\ y \end{pmatrix} \xrightarrow{R_F} i, \bar{C}_i, \quad (2.2)$$

де: $\begin{pmatrix} x \\ \delta \\ y \end{pmatrix}$ – 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 (2.1), 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 $\begin{pmatrix} x \\ \delta \\ y \end{pmatrix}$ у відповідності до $i, \bar{C}_i$.

Сенс сформульованої задачі (2.2) полягає в тому, що вектор поточних значень змінних x , δ , y в момент прийняття керуючого рішення імплементується за допомогою оператора R_F у відповідності до ідентифікатору експлуатаційного режиму i у множину $\bar{C}_i$ змінних завдань

(2.1), 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:

$$\begin{aligned}
 & F_{i(obj_seu_cpc)}(x_i, \delta_i, y_i) \rightarrow \max_{\delta_i(t) \in U_i \subset U} \\
 & U_{i(F)} = \left\{ \delta_i : \begin{cases} g_i(x_i, \delta_i, y_i) = 0 \\ \varepsilon_i(x_i, \delta_i, y_i) \geq 0 \end{cases} \right\} \\
 & \bigcup U_{i(F)} = U \\
 & i = 1, 2, \dots, N_F.
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

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.

Задачі (2.2), (2.3) припускають багаторівневу когнітивну схему прийняття керуючого рішення (див. підрозділ 6.5).

2.4. Формулювання вимог до способів дослідження процесів передачі потужності

Ґрунтуючись на співвідношення (1.1), (1.2), (1.3) можна зробити висновок, що основними втратами при роботі ГЕД СЕУ КПК, тенденції розвитку котрих, технічні проблеми забезпечення типових режимів роботи та вимоги до способів дослідження процесів у них під впливом недетермінованих навантажень представлено у підрозділах 5.1 та 3.1 є взаємодія потоків гребних гвинтів (*thruster-thruster interaction*) з корпусом судна (*thruster-hull interaction*). Ці ефекти отримали в дослідженнях загальну назву – деградаційні ефекти на лініях потоків гребних гвинтів (*degradation effects*).

Для оцінки і дослідження подібних фізичних явищ використовується поряд з експериментальними даними результати обчислень методами обчислювальної гідродинаміки (англ. *Computational Fluid Dynamics – CFD*).

Базою досліджень в області обчислення гідродинамічних процесів на лініях гвинтів ГЕД ПП СЕУ КПК є рівняння Нав'є-Стокса:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \nabla) \vec{v} + \nu_w \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla P_v + \vec{f}_m; \quad \nabla \cdot \vec{v} = 0, \quad (2.4)$$

- де:
- ∇ – оператор набла;
 - Δ – векторний оператор Лапласа;
 - t – час, [с];
 - ν_w – коефіцієнт кінематичної в'язкості, $\times 10^{-6}$ [м²/с];
 - ρ – щільність доквілля, [кг/м³];
 - P_v – тиск потоку, [Па];
 - $\vec{v} = (v^1, \dots, v^n)$ – векторне поле швидкостей;
 - $\vec{f}_m$ – векторне поле масових сил.

Можна припустити, що для турбулентних потоків води від гребних гвинтів ГЕД [ПП](#) СЕУ КПК узагальнено спирається на рівняння Нав'є-Стокса (2.4), яке справедливо як при ламінарному, так і при турбулентному режимі руху рідини; проте використовувати дане рівняння Нав'є-Стокса для турбулентного режиму руху практично неможливо. 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 [[28](#), [64](#), [146](#), [206](#)].

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, засновані на припущенні про існування для будь-якого турбулентного руху такого інтервалу усереднення, що виконані по ньому, дають величину незмінних при повторному усередненні [[49](#), [139](#)].

Пульсуючі складові змінних характеризуються частотою і амплітудою, а середні амплітуди пульсації характеризуються відповідними коефіцієнтами пульсацій [[164](#)].

Наприклад, для рівняння Рейнольдса (англ. *Reynolds-averaged Navier-Stokes* – *RANS*), 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. У разі стаціонарної течії нестисливої ньютонівської рідини рівняння Рейнольдса записуються у вигляді:

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_{mi} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{P}_v \delta_{ij} + \mu_R \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j \right]. \quad (2.5)$$

Змінні, усереднені за часом, відзначені в цьому рівнянні рисою зверху, а пульсації складові – апострофом. Ліва частина рівняння (нестационарний член) описує зміну кількості руху потоку води від гребного гвинта, внаслідок зміни в часі усередненої складової його швидкості.

Ця зміна компенсується усередненими зовнішніми силами збурення

$$\rho \bar{f}_{mi}, \text{ усередненими силами тиску } \bar{P}_v \delta_{ij} \text{ і в'язкістними силами } \mu_R \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right),$$

де μ_R – коефіцієнт в'язкості середовища або коефіцієнт грузлого тертя, який при певних експлуатаційних режимах зумовлює завдання меж числа Рейнольдса для досягнення формалізації фізичної моделі багатофункціонального комбінованого пропульсивного комплексу з урахуванням ситуаційних факторів довкілля і ідентифікаційних чинників експлуатаційних режимів (5.7).

Крім того, в праву частину входять напруги, що здаються (напруги Рейнольдса, турбулентні напруги) $\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j$, які враховують додаткові втрати і перерозподіл енергії в турбулентному потоці на границі з ламінарним потоком при виникненні так званих деградаційних ефектів (*Degreffect*) (5.1, 3.1)[54].

2.5. Висновки до розділу

При розробці 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

певних експлуатаційних режимів. Подібні методи називаються методами високого порядку, і не дивлячись на свою ефективність і точність, рідко зустрічаються у вітчизняній практиці.

У роботі будемо ґрунтуватися на двох подібних методах, заснованих на обчислювальній гідродинаміці: метод розрахунку обтікання довільних 3-х мірних тіл, який використовується для розрахунку обтікання систем крил і спеціалізований метод розрахунку обтікання системи симетричних тіл і кільцевих крил неоднорідним і нестационарним потоком. В цьому випадку вдається 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 є підґрунтям для подальшого розвитку сучасних систем управління [ПП](#) та їх експлуатації. Отримані результати будуть покладені 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-бузових, підйомно-транспортних та вантажно-розвантажувальних робіт.

На рівні технічної реалізації у ланках орієнтації, стабілізації, навігації та управління планується застосування таких елементів, як твердотілі хвильові гіроскопи та п'єзоелектричні давачі, які динамічно налаштовуються на відміну від традиційно використовуваних приладів у [DP](#), можуть працювати у незалежних режимах виміру кута і швидкості.

Запропоновані методи дозволяють, на основі застосування незалежного від характеристик вхідної напруги формування моменту [ПП](#), 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](#).

Удосконалення експлуатаційних режимів роботи гібридних [ДЕПК](#) буде 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 3.1](#), можна зробити висновок, що при застосуванні класичного *PI* управління з регулюванням ступеню заряду батарей [СНЕ](#) можливо зменшення споживання потужності споживачами, підключеними до [DC-link](#) і компенсація реактивної потужності.

Якщо застосовувати управління за критерієм мінімуму споживання електроенергії, то в цьому випадку можливо підвищити коефіцієнт 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.

Вищевказані проблеми напряду зумовили формулювання трьох головних задач дослідження (див. [Додаток К](#), [Рис. К.1](#)): розробка системи моніторингу деградаційних ефектів на лініях гребних потоків рушіїв із ідентифікацією відповідних маркерів, стратегії всережимних регуляторів потужністю, моментом та частотою обертання електродвигунами [ПП КПК](#) і методології побудови багатокритеріальних стратегій управління розподілом потужності [СЕУ КПК](#). В свою чергу вирішення цих задач призвело до формулювання ще двох головних задач, а саме: розробки [СППР](#) для

проектування, дослідження і удосконалення СЕУ КПК та створення фізичної моделі багатфункціонального комбінованого пропульсивного комплексу зі змінною структурою.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ДЕГРАДАЦІЙНИХ ЕФЕКТІВ НА ЛІНІЯХ ГРЕБНИХ ПОТОКІВ РУШІВ ІЗ ІДЕНТИФІКАЦІЄЮ ВІДПОВІДНИХ МАРКЕРІВ

3.1. Розширення масиву даних щодо досвіду експлуатації СЕУ [КПК](#) в різних експлуатаційних умовах

В ході експлуатації АГРК виникають ситуації, при яких знижується безпечна і ефективна їхня робота [108]. Так одним з варіантів є випадок повільного руху по курсу для суден-кабелеукладачів і фіксації позиції для НЗБУ та інших типів суден. Для утримання об'єкта на позиції АГРК направляє потік води під днище судна і в цьому випадку існує ймовірність виникнення ефекту Коанда, при якому потік "прилипає" до днища судна [54]. При цьому сила, що діє на гвинт, призводить до відхилення гребного валу, що тягне за собою підвищений знос дейдвудного, упорного і опорних підшипників.

У зв'язку з конструктивною особливістю знаходження АГРК нижче ватерлінії під днищем судна ускладнений доступ до діагностики, планового обслуговування і ремонту. Робота бурових суден заснована на тривалому терміні експлуатації і передчасний вихід з ладу однієї з АГРК, що входять до складу систему динамічного позиціонування, може призвести до трагічних наслідків, багатомільярдних втрат і техногенної катастрофи [68, 115].

На жаль, передбачити і прорахувати процес з деталізацією всіх параметрів не представляється можливим, тому що на виникнення ефекту Коанда впливає безліч факторів, таких як: швидкість судна; швидкість і напрямок обертання гвинтів; стан довкілля; хімічний склад і глибина водної поверхні; швидкість і напрямок потоків води від інших АГРК, які працюють

спільно і входять в систему динамічного позиціонування. Ці фактори не дозволяють точно передбачити момент появи цього ефекту.

Всі двигуни, які установлюються на бурових суднах, можуть працювати у режимах регулювання моменту (упору) або частоти обертання, але кожен тип підрулюючого пристрою (ПП) має свої особливості і деякі важливі параметри будуть мати дещо інші значення для різних видів ПП.

[Рис. Ж.12](#) дає схематичний огляд дії упорів різних конструкцій ПП.

Втрати гребних гвинтів [\[168\]](#), викликані осьовим припливом води, залежать від наступних ефектів, які сприятимуть зменшенню тяги гвинта і крутного моменту:

- надходження води перпендикулярно до осі гребного гвинта, викликане течією від швидкості судна або потоків з інших двигунів з силою в напрямку припливу через відхилення потоку гвинта. Це часто називають крос–поєднанням опорів [\[5, 43, 151\]](#);

- наявність кавітації для важких навантажень на гвинти (всмоктування повітря) веде до зменшення тиску на лопаті гвинта та може статися під час малого занурення гвинта за рахунок руху судна поперек хвилям [\[42, 179, 202\]](#);

- екстремальні умови з великими амплітудами руху судна перпендикулярно поверхні води призводить до раптового падіння тяги й крутного моменту з ефектом гістерезису [\[2, 95\]](#);

- одночасне зниження тяги і зміна напрямку тяги може статися через взаємодію потоку від ПП з корпусом, викликаного ефектами тиску, коли мала тяга ПП проноситься вздовж корпусу. Це згадується як [ефект Коанда](#) [\[9, 10, 162, 167, 184\]](#);

- втрата упору ПП може бути викликано впливом гребного потоку від одного двигуна на сусідні двигуни, та призвести до значного зниження тяги, якщо відповідні запобіжні заходи не будуть прийняті в алгоритмі розподілу упорів на ПП [\[45, 130\]](#).

[До змісту](#)

Чутливість СЕУ КПК до різних втрат залежить від типів гвинтів і двигунів, що використовується, застосуванням різноманітних стабілізаторів у конструкції корпусу судна і оперативних принципів зміни алгоритмів управління в залежності від експлуатаційних умов.

3.2. Аналіз методів реєстрації деградаційних ефектів на перетинах енергетичних потоків

Реєстрація поєднання зусиль на лініях валів у СЕУ КПК дає підстави стверджувати, що сенсори, як деякі узагальнені елементи, повинні мати більш значні діапазони виміру входних 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 [213].

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;
- ν_C – коефіцієнт кінематичної пружності матеріалу підкладки;
- μ_S – коефіцієнт внутрішнього 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:

$$(m_{cS} + m_{ncS}) \cdot \frac{d\bar{v}_S(t)}{dt} + \mu_S \bar{v}_S(t) + \mu_R \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon} \bar{v}_S(t) dt = F_S(t), \quad (3.1)$$

- 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 [109, 122, 188].

Електропровідність інтерфейсу давачів з контактною зоною з електропружних матеріалів вважається поляризованим у напрямку, перпендикулярному до площини і завантажується віддаленими силами (6.1), (6.2), (6.3), а також електричними і магнітними полями, що діють паралельно з цими силами.

Передбачається, що електричне поле всередині давача дорівнює нулю і магнітні величини безперервні поперек площини. Використовуючи спеціальні вирази (див. підрозділ 6.6) для величин за допомогою кусково-аналітичних функцій, запропонованих у роботі [122].

Крайові задачі для визначення коефіцієнтів пропорційності для збурюючих сил, а також ситуаційні чинники і ідентифікаційні параметри експлуатаційних режимів, будуть формулюватися і вирішуватися аналітично. Явні аналітичні вирази для характерних механічних, електричних і магнітних властивостей представлені у розділі 3.4.

Прості трансцендентні рівняння для визначення довжини зони

[До змісту](#)

контакту, напруги, електричного і магнітних полів, коефіцієнти інтенсивності та довжини зони контакту будемо визначати для різних випадків навантаження (5.4), із спостереженням за впливом чинників електричних полів на довжину зони контакту. Результати, що мають бути отримані, матимуть потенційне застосування у розробці багат шарових електро–пружних структур і пристроїв для реєстрації збурюючих впливів на перетинах енергетичних потоків у СЕУ КПК, що знаходяться під впливом недетермінованих навантажень у різних експлуатаційних режимах.

Спираючись на це будь-який сенсор, що знаходиться під впливом збурюючої сили, можна представити у вигляді чотириполусника, де:

- $U_S(t)$ і $I_S(t)$ характеризують електричну сторону сенсору;
- $F_S(t)$ і $x(t)$ – механічну.

Якщо датчик працює в лінійному сталому режимі, то можна записати:

$$\begin{cases} U_S(t) = I_S(t) \cdot Z_{SE} + t_{EM} \cdot \bar{v}_S(t), \\ F_S(t) = I_S(t) \cdot t_{ME} + Z_{SM} \cdot \bar{v}_S(t), \end{cases} \quad (3.2)$$

- де:
- Z_{SE} – імпеданс перетворювача з електричного боку, [Ом];
 - Z_{SM} – імпеданс перетворювача з механічного боку, [Ом];
 - t_{EM} – постійна часу електромеханічного перетворення, [с];
 - t_{ME} – постійна часу механо–електричного перетворення, [с].

Загальним рішенням для системи рівнянь (3.2) буде знаходження коефіцієнтів поліному для сталого режиму дії збурюючих сил, що визначаються якістю потоку згідно рівняння (2.5), на певний датчик (сенсор) за умови незмінності експлуатаційного режиму СЕУ КПК продовж інтервалу часу розрахунку.

$$\begin{cases} \bar{U}_S(Z) = \bar{I}_S(t) \cdot Z_{SE} + t_{EM} \cdot \bar{v}_S(t), \\ \bar{F}_S(Z) = \bar{I}_S(t) \cdot t_{ME} + Z_{SM} \cdot \bar{v}_S(t), \\ (m_{cs} + m_{ncs}) \cdot \frac{d\bar{v}_S(t)}{dt} + \mu_s \bar{v}_S(t) + \mu_R \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon} \bar{v}_S(t) dt = \bar{F}_S(Z), \end{cases} \quad (3.3)$$

де: $-F_s(Z) = (F_{s1}(Z^1), F_{s2}(Z^2), F_{s3}(Z^3), F_{s4}(Z^4), \dots, F_{si}(Z^m))^{T_{matrix(i)}}$;

– комплексний імпеданс визначається матрицями активної та індуктивної складових схеми заміщення комплексного навантаження $Z^m = R^m + p_{ij}L^m$ (3.10);

– $T_{matrix(i)}$ – матриця конфігураційних параметрів підрулюючих пристроїв, де $(i = 0 \dots k)$ – номер відповідної конфігурації (див. підрозділ 6.6).

3.3. Визначення ймовірнісно-статистичних параметрів розподілів навантажень та аналіз етапів застосування методів обчислювальної гідродинаміки

Будь-яке застосування обчислювальної гідродинаміки складається з наступних послідовних етапів, які виконуються з використанням спеціального програмного забезпечення.

На підготовчому етапі формується геометрія моделі, формулюються необхідні фізичні умови, геометрія дискретизується (створюється сітка), задаються початкові і граничні умови диференціальних рівнянь.

На розрахунковому етапі машина, підкоряючись заданому алгоритму, чисельно вирішує основні рівняння з точки зору фундаментальних фізичних параметрів, а також записує результати рішення у пам'ять.

Результати рішення відображаються у вигляді графіків, таблиць, а також контурних/векторних схем, прив'язаних до вихідної геометрії.

Застосування обчислювальної гідродинаміки для аналізу ефектів деградації потоку від гвинта (*Degreffect*) [азимутального рушія](#), як і раніше, в значній мірі є недослідженою областю. Ці ефекти мають важливе значення для проектування суден, особливо для суден, що працюють у режимі

динамічного позиціонування. Випробування реальних моделей є відносно дорогими і, як правило, стають доступними на пізніших стадіях процесу проектування технічного засобу.

В якості альтернативи, із застосуванням обчислювальної гідродинаміки різних конструкцій суден і рушіїв на ранній стадії процесу проектування ефекти взаємодії можуть бути досліджені економним способом.

Як пакет обчислювальної гідродинаміки в роботі [123] авторами застосовується пакет *Marin ReFRESCO (Reliable&Fast Rans Equations (solver for) Ships, Cavitation (and) Offshore)*, який широко використовується в цілях візуалізації потоків навколо різних об'єктів. *ReFRESCO* вирішує *RANS*-рівняння (усереднені рівняння Рейнольдса Нав'є-Стокса) для багатофазних нестационарних нестискуваних потоків, доповнених моделями турбулентності і об'ємно-дробовими рівняннями конвективної дифузії для кожної фази, або як їх ще називають – рівняння масообміну на кордоні розділу фаз.

Рівняння дискретизуються з використанням методу скінченних об'ємів у фізичному просторі. Реалізація поверхнево-орієнтована, що дозволяє генерувати сітки з довільним числом граней або локально очищені сітки із висячими вузлами.

При візуалізації потоку від азимутального рушія [ПП](#) [СЕУ](#) [КПК](#) прийнята модель, при якій гвинт представлений у вигляді диска силового приводу (англ. *Actuator Disk – AD*) [143, 172, 176, 183]. 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 закінчення корпусу судна.

Згідно з аналізом відомостей про судна, застосовані типи гвинтів, модифікації [ПП](#), схеми розташування [СОДГ](#) [СЕУ](#) та їх структури, як багатоштинних конструкцій з нерівномірним розподілом імпедансу ([Рис. 1.4](#)), які будуються за технологією гнучких (керованих) систем змінного струму

(англ. *Flexible Alternative Current Transmission Systems – FACTS*) і являють собою єдині електроенергетичні системи (англ. *Western System Coordinating Council – WSCC*), застосуванню методів обчислювальної гідродинаміки для відстежування деградаційних ефектів на лініях потоків гребних гвинтів передуює систематизація необхідних ідентифікаційних параметрів і ситуаційних чинників (Таблиця Д.1).

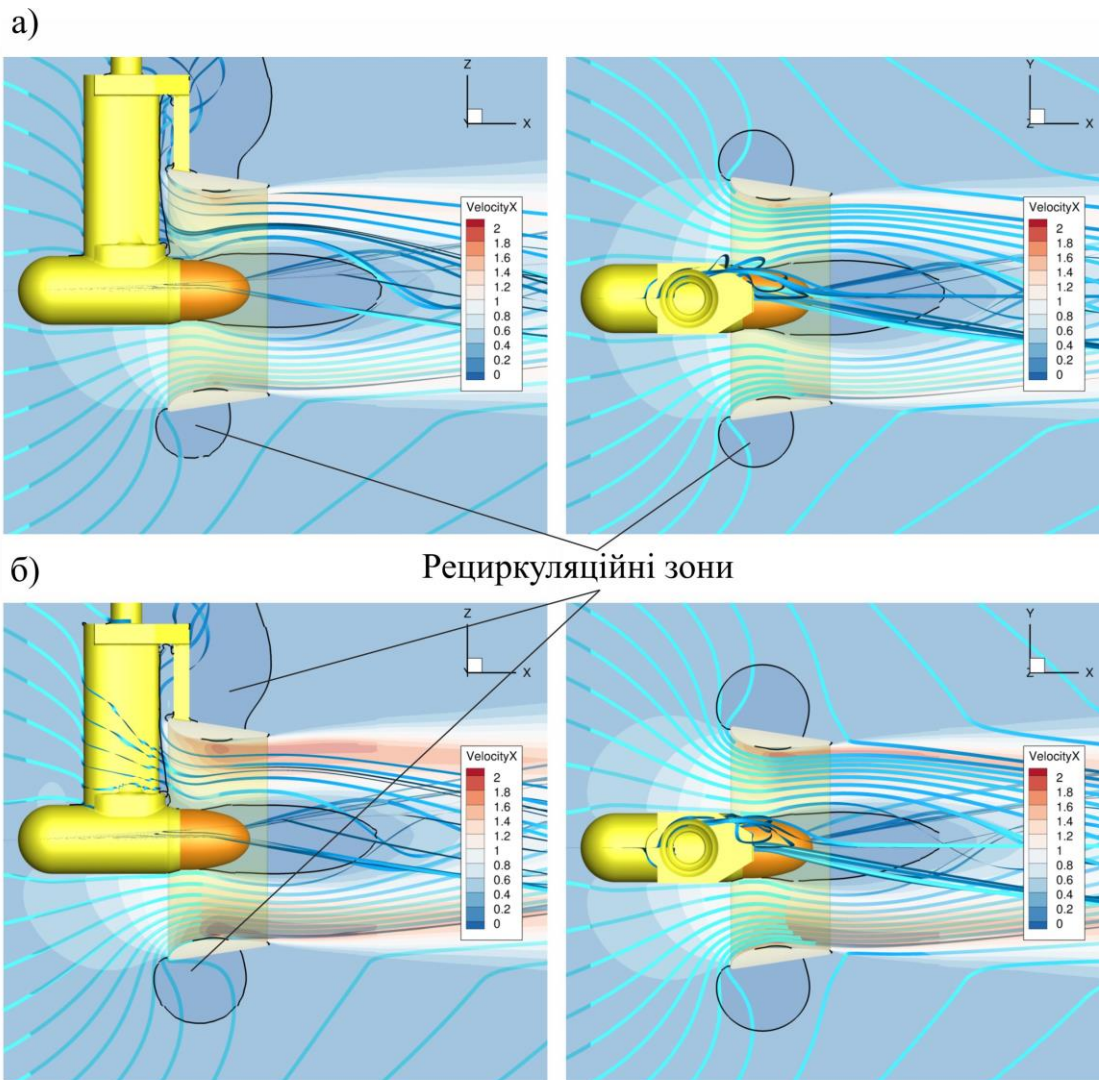


Рис. 3.1 Характеристики потоків і складових x -швидкостей підрулюючого пристрою моделі UL/ULE потужністю 1500 кВт: а) 70% і б) 100% номінальної потужності

На [Рис. 3.1](#) представлені характеристики потоків і складових x -швидкостей ПП моделі *UL/ULE* (*UL/ULE thruster type*, [Рис. Б.29, д](#)) потужністю 1500 кВт для судна, ідентифікаційні параметри і ситуаційні чинники якого (для режиму на вільній воді) наведено у [Таблиця Д.1](#), які демонструють значні рециркуляційні зони біля кільватерної стійки, що зумовлює значні навантаження на обертаючу ось (баллер) і зовнішнє сопло і підтверджує необхідність застосування складних функцій розрахунку енергетичних показників на перетинах потоків енергії від СОДГ до рушіїв ПП СЕУ КПК.

На [Рис. 3.2](#) наведено візуалізацію силових потоків від азимутального рушія ПП СЕУ [КПК](#), зробленої за вищенаведеною методикою у вигляді диска силового приводу (англ. *Actuator Disk – AD*), де видно ([Рис. 3.2, в](#)) захоплення вихідного потоку до ліній рециркуляційної зони вздовж обертючих напрямлюючих, що призводить до появи ([Рис. 3.2, г](#)) рециркуляційних зон на u -площині та ідентифікації турбулентних областей із відносними коефіцієнтами вихрової в'язкості μ_t/μ_w .

З іншого боку, згадані вище рециркуляційної зони призводять до виникнення одного з деградаційних ефектів – ефекту Коанда. На [Рис. Г.1](#) наведено порівняльний аналіз траєкторій складових x -швидкостей потоку гвинта ПП за результатами вимірювань, які здійснюються на перетині потоку азимутального гвинта вздовж осі обертання з розмірами в одиницях діаметра гвинта D_p . Але, слід зауважити, що в супереч можливості збільшувати кількість перетинів вимірювань, деякі точки траєкторії залишаються недоступними, що унеможливує повноцінно проаналізувати ефективність запропонованих методів боротьби з вищевказаними ефектами.

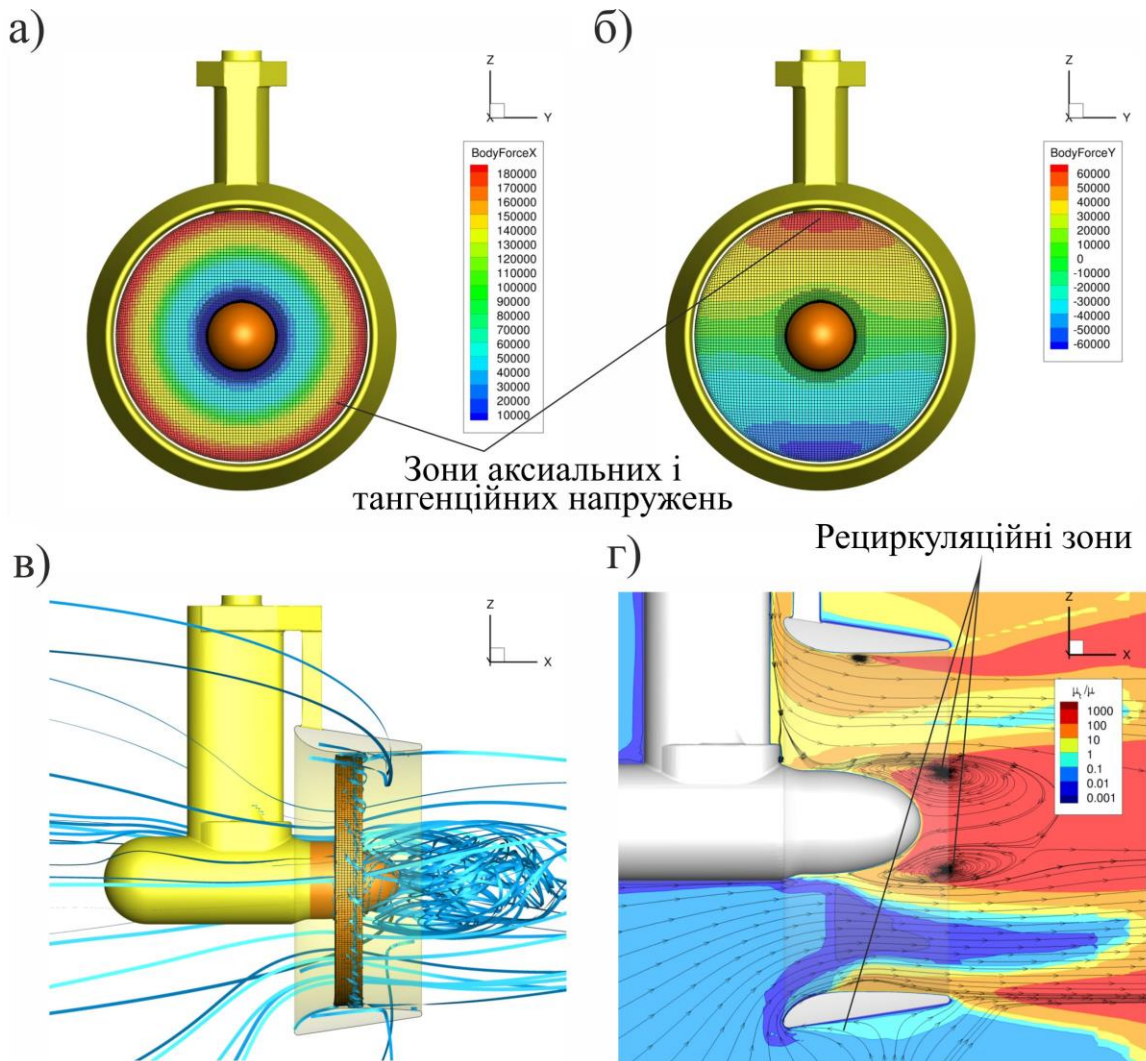


Рис. 3.2 Візуалізація потоку від азимутального рушія ПП СЕУ КПК у вигляді диска силового приводу (англ. *Actuator Disk – AD*): а) осьові і б) тангенціальні складові силових потоків з ідентифікованими зонами напружень; в) захоплення вихідного потоку до ліній рециркуляційної зони на обертових направляючих, що призводить до появи г) рециркуляційних зон на у-площині та ідентифікації турбулентних областей із відносними коефіцієнтами вихрової в'язкості μ_t/μ_w

Аналізуючи попередні результати аналізу видно, що на лінії потоку від гребного гвинта ПП присутні значні тангенціальні сили і явище «притягання» потоку до корпусу судна, що створюють деградацію тяги,

[До змісту](#)

зменшення коефіцієнту корисної дії гвинта η_{pF} (4.17) для даного значення K_F та збільшення коефіцієнт відносної вихрової в'язкості μ_v/μ_w . Це призводить до зайвого навантаження на підвісну конструкцію ПП, що створює механічні напруги, які пошкоджують найбільш критичні деталі конструкції: підшипники, ущільнення, вал.

Крім того, це погіршує такого експлуатаційного режиму судна як динамічне позиціонування. Як видно з результатів аналізу і практики виробництва подібних агрегатів найпоширенішим, але далеко не оптимальним, явищем для боротьби з цими ефектами є використання сопел, нахилених приблизно на 7 градусів відносно площини днища корпусу.

Це рішення так само не уникає подібних ефектів, а також істотно знижує ефективність установки, що пов'язано з підвищеною витратою палива і забруднень навколишнього середовища.

Основною досі досконально не дослідженою проблемою у цьому напрямку залишається перешкоджання на лінії потоку від гребного гвинта вільному надходженню рідини з одного боку потоку, створюючи турбулентність в зоні зниженого тиску, що сприяє появі значних тангенціальних сил, що діють на баллер ПП перпендикулярно напрямку потоку в напрямок корпусу судна.

Також повністю не вирішують проблеми збільшення радіусу скруглення корпусу трюму (Рис. Г.1, б), переміщення точки закріплення баллеру ПП ближче до краю корпусу (Рис. Г.1, в) і застосування трюмного кілю на огинаючій корпусу (Рис. Г.1, г).

Принципи формалізації фізичної моделі підрулюючого пристрою, основні характеристики якого представлені на Рис. 3.3, Рис. 3.4, Рис. 3.5 та Рис. Е.1, у рамках створення моделі багатofункціонального пропульсивного комплексу розглядається у підрозділі 5.7.

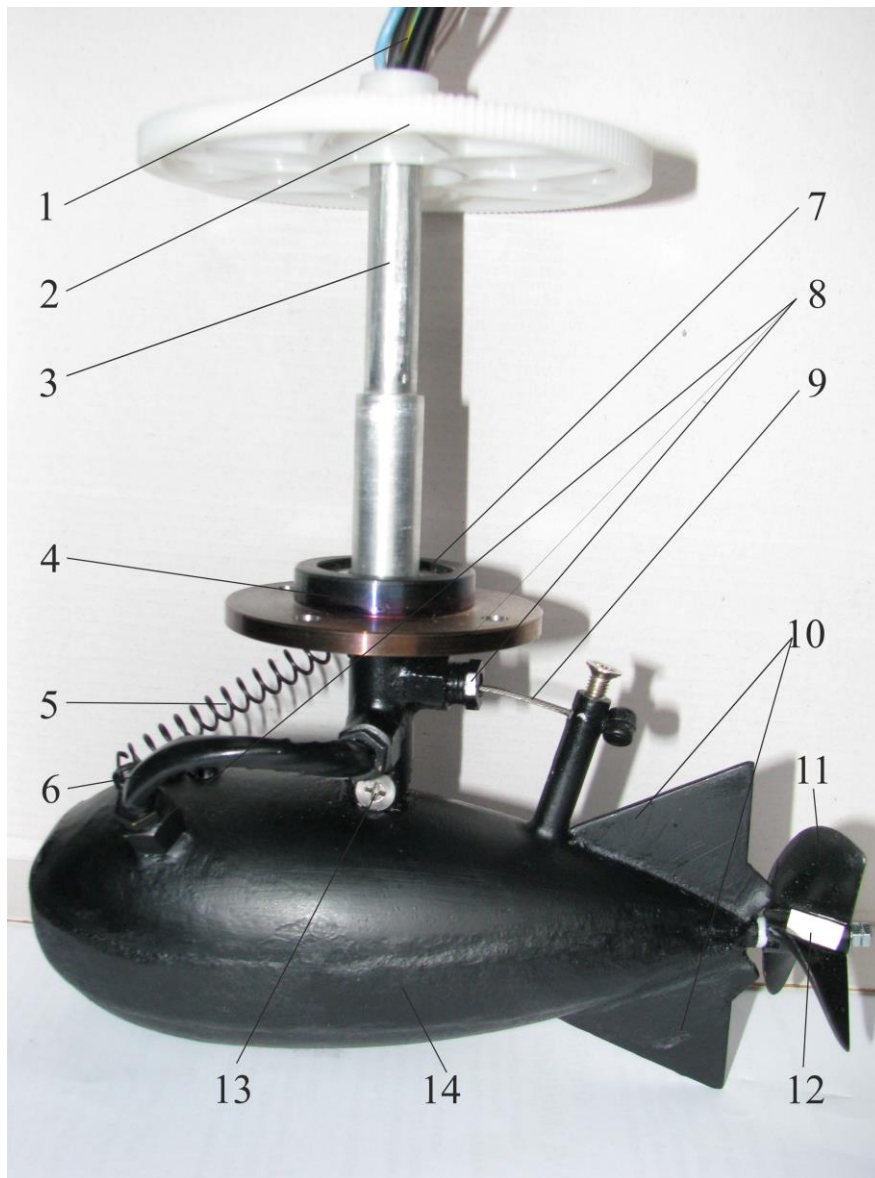
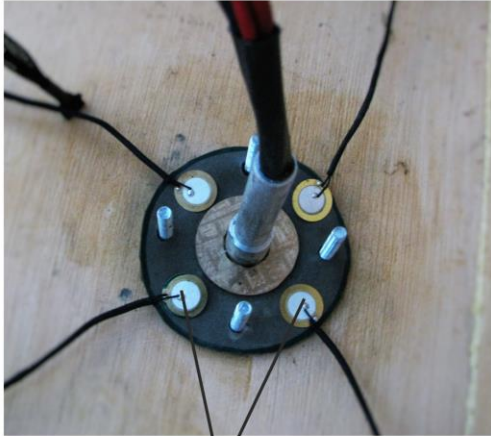
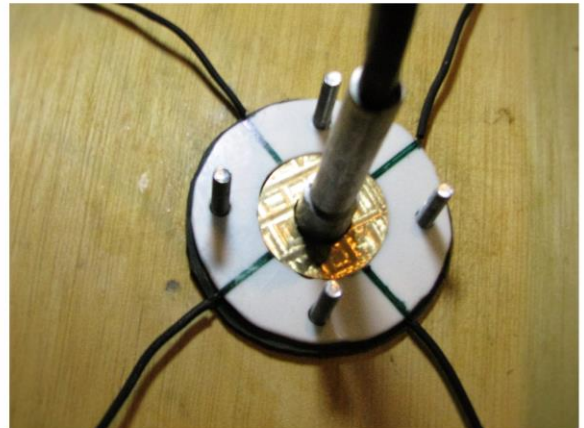


Рис. 3.3 Фізична модель підрулюючого пристрою з двома ступенями свободи: 1 – живлячий кабель гребного АД і тросик приводу зміни кута нахилу; 2 – ведуча шестерня приводу повороту баллеру; 3 – баллер; 4 – підшипниковий щит; 5 – пружина зворотного зв’язку приводу зміни кута нахилу; 6 – живлячий кабель; 7 – опорний підшипник; 8 – сальникові вводи; 9 – тросик приводу зміни кута нахилу; 10 – стабілізаційні крила; 11 – ГФК; 12 – люмінесцентна мітка для дистанційного виміру частоти обертання ГФК; 13 – місце з’єднання баллеру з корпусом ПП; 14 – корпус ПП з розташованим у середині АД ПП

а)



б)



в) П'єзоелектричні датчики



г)



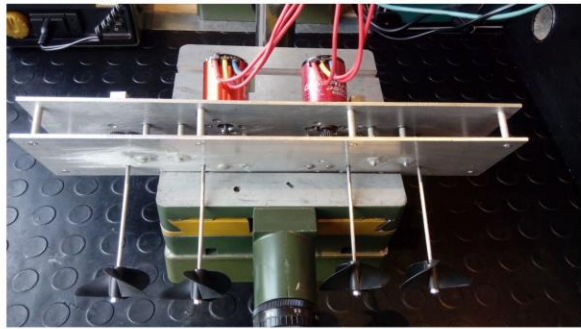
Рис. 3.4 Фізичне моделювання системи моніторингу деградаційних ефектів:

а), б) – монтаж п'єзоелектричних датчиків; в), г) монтаж підшипникового
шита і головної шестерні [ПП](#)

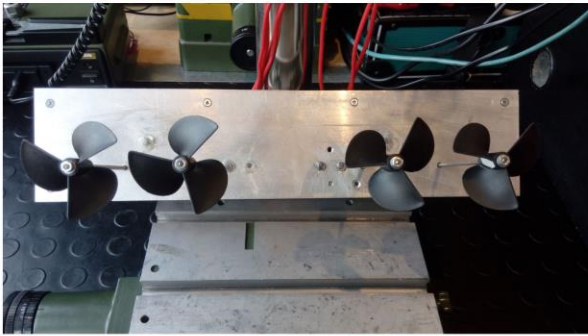
а)



б)



в)



г)



Рис. 3.5 Фізичне моделювання головних гребних електродвигунів: а), б) – головні електродвигуни, інстальовані до редуктору; в) – гребні гвинти; г) редукторна передача

3.4. Формалізація фізичної моделі з урахуванням ситуаційних факторів довкілля і ідентифікаційних чинників експлуатаційних режимів

Формалізація фізичної моделі підрулюючого пристрою, основні характеристики якого представлені на [Рис. 3.3](#), [Рис. 3.4](#), [Рис. 3.5](#) та [Рис. Е.1](#), у рамках створення моделі багатофункціонального пропульсивного комплексу, засновується на застосуванні методів обчислювальної гідродинаміки, які розглянуто у підрозділі [3.3](#).

Розрахунок діючих тягових зусиль на гвинтах є складною умовою, так як не існує пріоритетного напрямку потоку в більшій частині області, тому ітераційна процедура рішення нелінійних рівнянь [\(2.4\)](#), [\(2.5\)](#) є нестійким для сталих режимів. Тому потрібно застосовувати підхід, при якому відбувається накладання дії потоку [ІІІ](#) в напрямку низької швидкості руху судна, таким чином наближаючи діюче тягове зусилля до встановлених граничних чисельних умов.

Для цього, коефіцієнти упору гвинтів K_T і коефіцієнти моменту гвинтів K_F [\(4.14\)](#) для поточної швидкості судна v_i будемо визначати за умови заздалегідь рівними відповідними коефіцієнтами для абсолютної швидкості судна [\(4.16\)](#) і швидкості притоку води [\(4.15\)](#), які повинні бути формалізованими згідно з рівняннями подібності [\(6.8\)](#), [\(6.9\)](#), [\(6.10\)](#), [\(6.11\)](#) для визначених чисел Рейнольдса і Фруда і коефіцієнтом попутного потоку w_s : $v_a = (1 - w_s)v_s$, де, як правило $0 < w_s < 0,4$:

$$F_p = \frac{v_i}{n \cdot D_p}, \quad (3.4)$$

де: – n – частота обертання гвинта, об/с;
– D_p – діаметр гвинта, м.

Відносний крок гвинта та його ефективність на відкритій воді визначаються як відношення виконаної гвинтом роботи для отримання сили тяги до роботи, необхідної для подолання крутного моменту опору на валу. Значення чисел Рейнольдса і Фруда для меж граничних умов повинні бути такими, щоб потоки функції і сили, що діють на ПП, не повинні бути під впливом збурюючих сил.

Відповідну (3.4) силу поштовху гвинта (ГФК або ГРК) ПП будемо розраховувати, 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 (6.1), (6.2), (6.3) відповідно до упору (4.14), (4.18) і крутному моменту гвинта, що моделюється (4.14) будемо визначати виходячи з наступних міркувань: осьові сили F_x , F_y , F_z (6.1), (6.2), (6.3) як алгебраїчне розподілення, що масштабується та інтегрується до необхідної тяги (3.4), а тангенціальна співвідноситься до властивостей гребних гвинтів, таких як крокове відношення гвинта p_D (H_p/D_p) (4.14) і визначається діючим значенням упору гребного гвинта T_d (4.18).

Тобто, всі попередні розрахунки крутних моментів, що діють на лініях гребних валів ПП СЕУ КПК для Таблиця Д.1 будемо робити, як наводиться нижче:

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

$$\hat{r} = \frac{r - r_p}{R_p - r_p}, \quad (r_p \leq r \leq R_p) \quad (3.5)$$

$$T_p = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^1 F_x(\hat{r}), F_y(\hat{r}) d\hat{r} d\theta. \quad (3.6)$$

Розподіл осьових сил (3.4) параметризуються відповідно до значень ідентифікаційних коефіцієнтів a , b , m , n , або, так звані характеристичні маркери енергетичного потоку (ситуаційні чинники) характеризують певний експлуатаційний режим. Ненульовий розподіл осьової складової сили може бути встановлений у всьому діапазоні ($r_p \leq r \leq R_p$) шляхом ретельного підбору параметрів a і b . Значення інтегральних складових відповідає вибраному напрямку упору гвинта, T_p (6.14). В свою чергу тангенціальні складові упорів і моментів розраховуються наступним чином:

$$\frac{F_\theta}{F_x, F_y}(\hat{r}) = \frac{H_p / D_p \times R_p}{\pi \times r}, \quad (3.7)$$

$$M_p = \int_{-\pi}^{\pi} \int_{r_p}^{R_p} r \times F_\theta(\hat{r}) d\hat{r} d\theta. \quad (3.8)$$

На Рис. 3.6, Рис. 3.7 представлені порівняльні результати двох наборів параметрів для силових компонентів радіального розподілення упорів **ПП** у рухомій системі координат. Значення компонентів сил на графіках не представлені, оскільки розподілення масштабується для заданих тяги й крутного моменту.

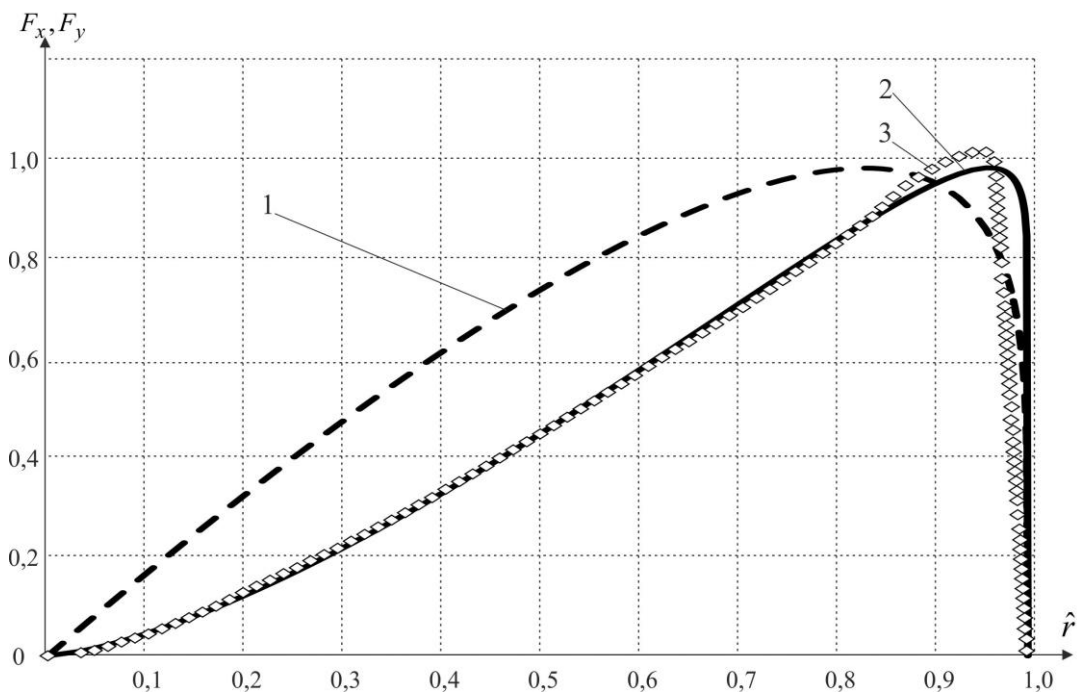


Рис. 3.6 Компоненти аксіальних сил, пропорційні радіусу огибаючої лопатей гвинта: 1 – початкові параметри згідно граничних умов експлуатаційного режиму і ситуаційних чинників (Таблиця Д.1); 2 – підібрані параметри; 3 – згідно паспортних значень

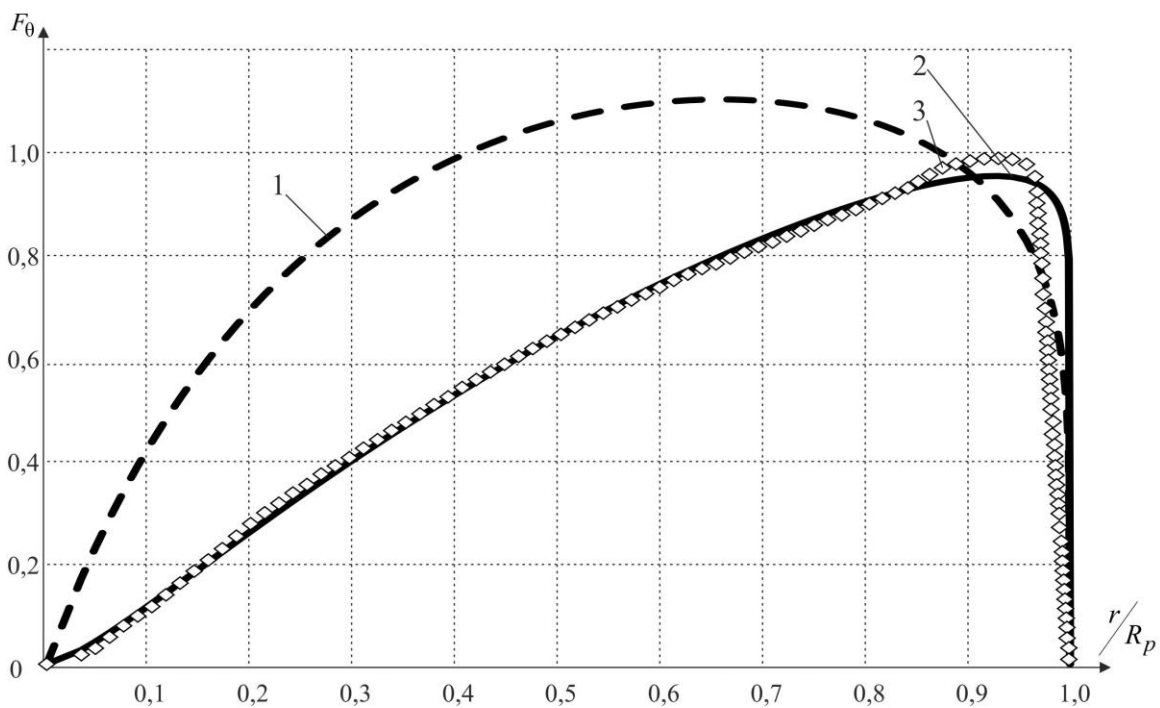


Рис. 3.7 Компоненти тангенціальних сил, пропорційні радіусу гвинта: 1 – початкові параметри згідно граничних умов експлуатаційного режиму і ситуаційних чинників (Таблиця Д.1); 2 – підібрані параметри; 3 – згідно паспортних значень

3.5. Ітераційна координація оцінювання експлуатаційних режимів

Представимо алгоритм формування керуючих впливів g_i та ε_i відповідного експлуатаційного режиму КПК судна, функціональна схема СЕУ якого приведена на Рис. 1.3, з метою досягнення здійсненності нерівностей (6.13) при вирішенні задачі (6.14) (див. підрозділ 6.3), структурно модифікованої у задачу (2.3) з урахуванням найбільш значущих обмежень (див. підрозділ 6.5).

Наприклад, при вирішенні задачі сталого експлуатаційного режиму підсистеми СП СЕУ КПК (див. Рис. 1.3) відомим оператором відображення, що зв'язує залежності зміни напруги U від струму I навантаження, є $\mathbf{R}_{(\Psi)F}$:

$(x_i, \delta_i, y_i) \xrightarrow{\mathbf{R}_{(\Psi)F}} i, \bar{I}_i$, керуючі впливи g_i та ε_i можуть бути сформовані з метою надання СОДГ, як джерелу енергії, властивостей одиничного оператора $\mathbf{E}_F$: $\mathbf{I} = \mathbf{E}_F \times \mathbf{I}$ і $\varphi = \mathbf{E}_F \times \varphi$.

У даному випадку покомпонентний склад векторів змінних x_i, δ_i, y_i для задачі (2.3) може бути різним і являти собою деяку підмножину $\bar{I}_i$ множини повного складу змінних $\bar{I}$. Відібрані таким чином компоненти векторів x_i, δ_i, y_i є найбільш ефективними у даній ситуації.

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 $\mathbf{E}_F$ повинен бути з двома керованими координатами $I^m(t)$ та $\varphi^m(t)$, значення яких відповідають:

$$\dot{I}^m(t) = \left[-\mathbf{R}_{(\Psi)F}^m \cdot I^m(t) + E_F^m(t) + \beta_x \cdot \mathbf{X}_F(t) + \beta_\delta \cdot \delta_F(t) + \beta_\varphi \cdot \mathbf{Y}_F(t) \right] / L_{(\Psi)F}^m \quad (3.9)$$

та

$$\dot{\varphi}^m(t) = c_I \cdot I_F^m(t) + c_U E_F^m(t) + c_{\varphi(U)} \cdot \delta_{(\varphi)F}(t) + c_{\varphi(I)} \varphi_F(t), \quad (3.10)$$

де: R^m и L^m – матриці активної і реактивної складових еквівалентних електричних схем заміщення СП; β_x , β_δ , β_φ – середньозважені постійні конструктивні коефіцієнти системи самозбудження СОДГ, давачів збурюючих 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 АІН або АІС (див. рис. [Рис. 1.3](#), [Рис. Б.28](#)) по струму і напрузі відповідно (для СЕУ КПК з однолінійною схемою, зображеною на [Рис. Ж.1](#)).

Керуючі впливи на систему самозбудження СОДГ для часткової локальної задачі підтримки експлуатаційного режиму постійності на шинах ГРЩ та ланці постійного струму, знаходяться при спільному вирішенні рівнянь (2.3), що будуть описувати у даному випадку реалізацію стохастичного процесу зміни навантаження СЕУ КПК, і (3.9), (3.10).

Розглянутий принцип вирішення часткової задачі може розглядатися як аналог адаптації математичних моделей багатоконтурної СК СЕУ КПК. Різниця полягає в тому, що замість ідентифікації математичної моделі об'єкта дослідження, здійснюється ідентифікація експлуатаційного режиму, у якому перебуває об'єкт, з наступною заміною вихідної задачі модифікованим завданням, відповідно до поточної ситуації. Причому, якщо в разі адаптації структури моделі і завдання в цілому залишається незмінними, структура модифікованої задачі (2.3) може змінюватися.

Таким чином, математична модель СК набуває властивість моделі зі змінною структурою, а об'єкт дослідження стає декомпозованим відповідно експлуатаційному режиму. СК СЕУ КПК у цьому випадку стає і централізованою і розподіленою одночасно, об'єднуючи в собі принцип централізованого управління в рамках поточного експлуатаційного режиму з декомпозицією об'єкта дослідження по ситуації у певному експлуатаційному режимі, що обумовлює децентралізацію в цілому. Основна проблема, пов'язана з реалізацією даного підходу, полягає в побудові оператора

[До змісту](#)

відображення $R_{(\Psi)F}$ (3.9) для ідентифікації поточного експлуатаційного режиму. Завдання його в аналітичному вигляді, зокрема, у вигляді функції $R(x_i, \delta_i, y_i)$, як правило, не представляється можливим, оскільки складно виявити закономірності, що зв'язують значення змінних завдань, які безперервно змінюються, з дискретними значеннями ідентифікаторів експлуатаційних режимів.

З цієї причини основним способом завдання оператора $R_{(\Psi)F}$ стає використання чисельних процедур селективного відбору ознак ситуаційних чинників даного експлуатаційного режиму. Оскільки в загальному випадку число можливих ситуаційних чинників виявляється надзвичайно великим, до того ж, повна специфікація кожної ситуації вимагає врахування великої кількості ознак, це призводить до складних обчислювальних схем або необхідності побудови експертних систем.

Інша проблема полягає у виділенні значущих змінних $\bar{C}_i$, що підлягають обліку в модифікованій задачі (2.3) для кожного ідентифікатору експлуатаційного режиму i . Таке виділення передбачає проведення оцінки чутливості вихідних змінних y_i на допустимі у i -ой ситуації експлуатаційного режиму зміни керуючих змінних δ_i при заданому значенні x_i , або рішення додаткового завдання ідентифікації моделі об'єкта дослідження з визначенням оптимальної структури його моделі.

Для вирішення зазначених проблем пропонується враховувати не всі можливі ситуаційні чинники, а тільки типові, яких істотно менше. Виникаючі поточні ситуаційні чинники співвідносяться з типовими i , при дотриманні певних умов, прирівнюються до конкретних типових ситуаційних чинників.

Якість цих визначень може бути підвищено за рахунок одночасного обліку двох і більше типових ситуаційних чинників, коли поточна ситуація, що виникає, не може бути однозначно віднесена до однієї з типових ситуацій у певному експлуатаційному режимі. На цей випадок повинен бути передбачений механізм виявлення загальних змінних для пересічних ситуаційних чинників, з яких формується склад змінних модифікованої

задачі, з додаванням до них окремих змінних врахованих ситуацій. Такий підхід з використанням типових ситуаційних чинників наближений, наприклад, до технологічного процесу керування СЕУ **КПК** судна, що знаходиться у режимі **DP**, у ручному режимі.

Використання повного складу параметрів тут спостерігається швидше у виняткових випадках, ніж у одному з автоматичних режимів. При цьому, ЛПР керується накопиченим досвідом і систематизованими типовими ситуаційними чинниками, з якими співвідносять поточні ситуації, що виникають (див. підрозділ 6.3).

Процес формалізації фізичних моделей наведено на **Рис. 3.8**

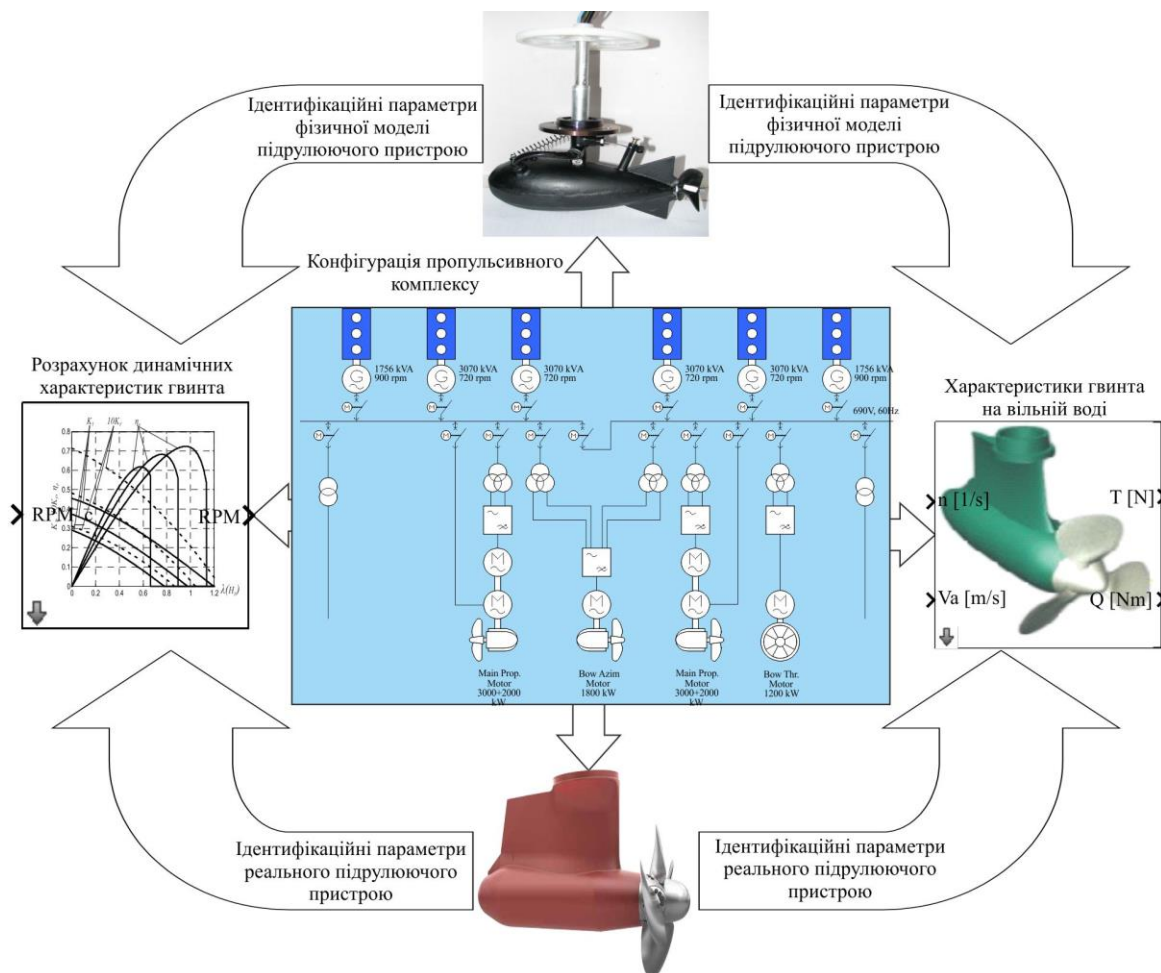


Рис. 3.8 Візуалізація процесу формалізації фізичних моделей підрулюючих пристроїв із визначенням конфігурації комбінованого пропульсивного комплексу

[До змісту](#)

3.6. Моніторинг енергетичних процесів при застосування альтернативних джерел живлення

Пропонується використання у єдиній СЕЕС СЕУ КПК, етапи удосконалення яких розглянуто у підрозділі 1.4, додаткової батареї, котра складена з двошарових електрохімічних конденсаторів (англ. *Electric double-layer capacitor – EDLC*) [101, 221].

Ядром системи моніторингу та управління єдиною СЕЕС СЕУ КПК із *EDLC* як джерелом динамічного живлення є модуль оцінки напруги *EDLC* і ступеню надлишкового заряду (*SOC*). Тому що залежність між напругою *EDLC* і розрахунковою величиною *SOC EDLC* є приблизно лінійною, отже, точність детектування рівня напруги на конденсаторі буде безпосередньо визначати точність інформації про стан *EDLC*.

Блок-схема запропонованої системи моніторингу стану *EDLC* для одного з гібридних ДЕПК, однолінійні схеми яких наведено у додатку Б.3 (Рис. Ж.1 – Рис. Ж.10), представлено на Рис. 3.9.

Енергія розряду конденсаторних модулів (Рис. 3.9) у СЕУ КПК (див. підрозділ 5.6) для характеристик збурюючих сил, параметризація дій яких визначаються рівняннями (3.2), (3.3), за умови знаходження усіх ПП у координатній площині безпосереднього регулювання моменту задається рівнянням (3.11) за оцінкою інтеграції загальної площі поверхні усіх модулів *EDLC* під гальванічну криву розряду або заряду:

$$E_{int/SOC}(t) = I_{EDLC} \int_{U_{EDLC_max}}^{U_{EDLC_min}} U_s(t) dt \quad (3.11)$$

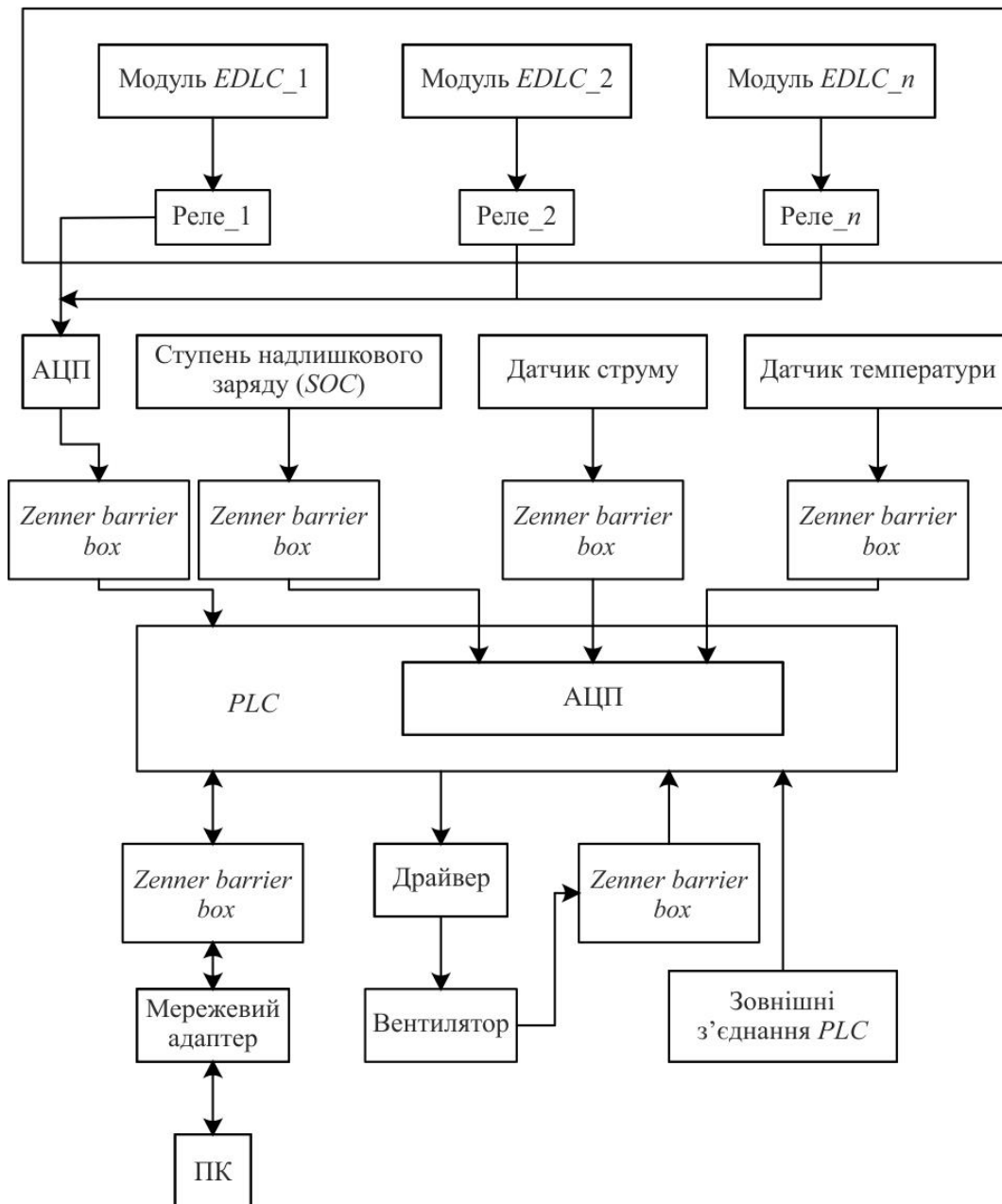


Рис. 3.9 Блок-схема системи моніторингу стану *EDLC* для гібридного **ДЕПК**: АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ПК – персональний комп'ютер.

Формула (3.11) дозволяє розрахувати потужність зарядного пристрою, необхідного для забезпечення необхідного ступеню заряду *EDLC* для певного експлуатаційного режиму СЕУ КПК під час динамічних навантажень. Звідкіля ємність усіх конденсаторних модулів будемо визначати за формулою:

[До змісту](#)

$$C_{int/EDLC} = \frac{2E_{int/SOC}}{(U_{EDLC_max})^2}. \quad (3.12)$$

Силові конденсатори *EDLC* гібридних **ДЕПК** формуються у модулі за рахунок визначення необхідної енергії заряду/розряду і потужності розрахованих зарядних пристроїв (Рис. 5.4). Беручи до уваги велику кількість силових пристроїв, високовольтних і потужних ліній електропостачання між модулями і СЕЕС СЕУ КПК, електромагнітне середовище є складним. Програма функціонування моніторингової системи (Рис. 3.9) складається в основному з двох частин: СК і інтегрований блок управління моніторингом ємності.

Інтегрований блок управління несе відповідальність за відстежування та обробку сигналів від модулів *EDLC*, наприклад: загальну напругу ємності, рівень зарядного і розрядного струмів, інформацію про температуру навколишнього середовища тощо. СК відслідковує алгоритми і зберігання даних у модулях *EDLC*, стан системи моніторингу та управління, силових пристроїв і управління схеми інтерфейсу людина-машина.

Для обміну інформацією в різних пристроях управління в якості вузла зв'язку у СЕУ КПК використовується мережа *network*, для того, щоб посилати команди на блок моніторингу від модулів *EDLC* по системній шині, та отримання завантажених даних. Кожен блок моніторингу у модулях *EDLC* несе відповідальність за: отримання сигналу стану одного *EDLC* по напрузі і температурі.

Для вибору кількості і ємності *EDLC* відповідно до типу СЕУ **КПК** і особливостей експлуатаційного режиму, на початку необхідно згідно із складовими комплексного імпедансу визначити параметри матриць активної та індуктивної складових схеми заміщення комплексного навантаження $Z^m = R^m + p j L^m$ (3.10) (Рис. 3.10).

А для значення величини упору для режиму безпосереднього управління моментом визначити коефіцієнти матриці конфігураційних

параметрів підрулюючих пристроїв $T_{matrix(i)}$, де $(i = 0 \dots k)$ – номер відповідної конфігурації (див. підрозділ 6.6).

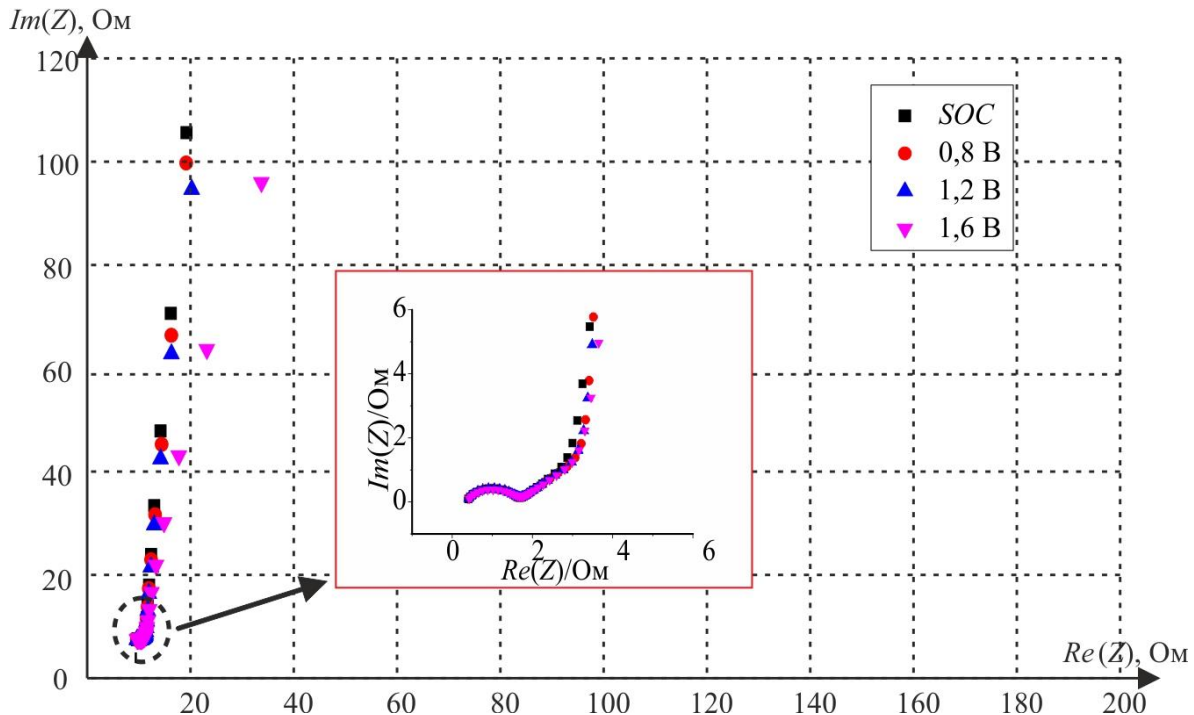


Рис. 3.10 Параметри комплексного навантаження для визначення ємності *EDLC* для певного експлуатаційного режиму СЕК КПК: ступеню заряду *EDLC* (англ. *State-of-Charge* – *SOC*)

Потім, у відповідності до типу *EDLC* розраховується амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) (Рис. 3.11) і початкові параметри заряду/розряду у заданих межах *SOC* (Рис. 3.12).

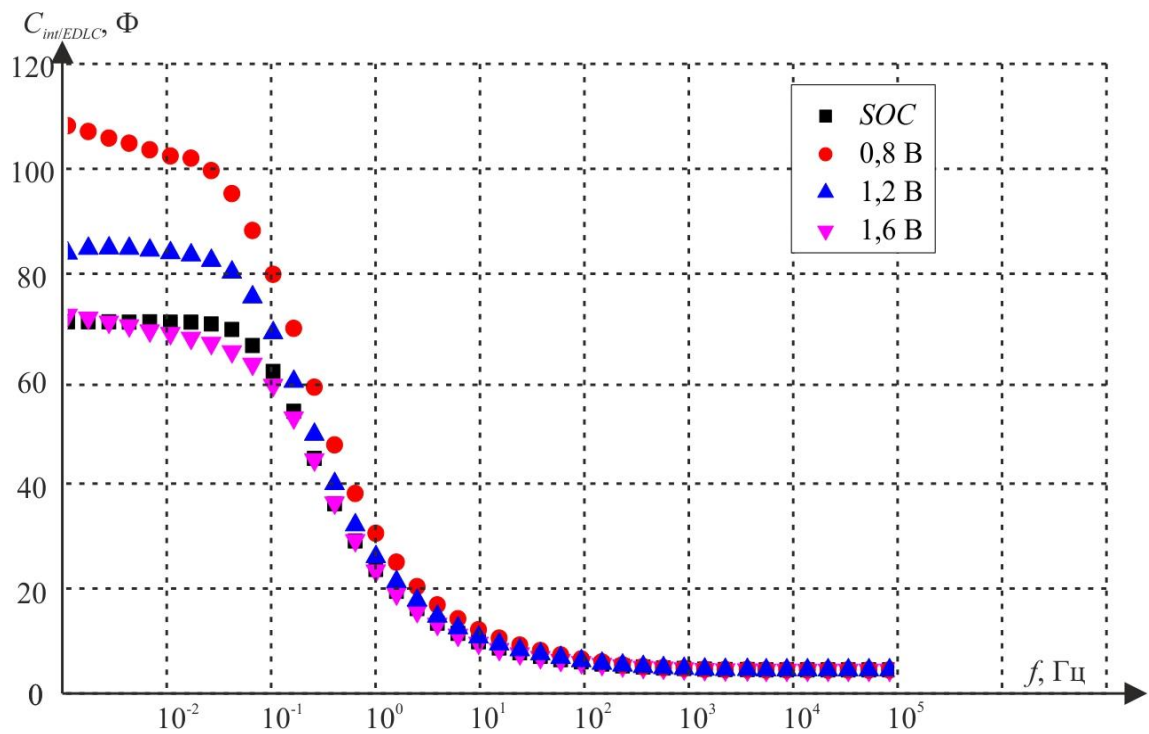


Рис. 3.11 Амплітудно-частотна характеристика обраних *EDLC*

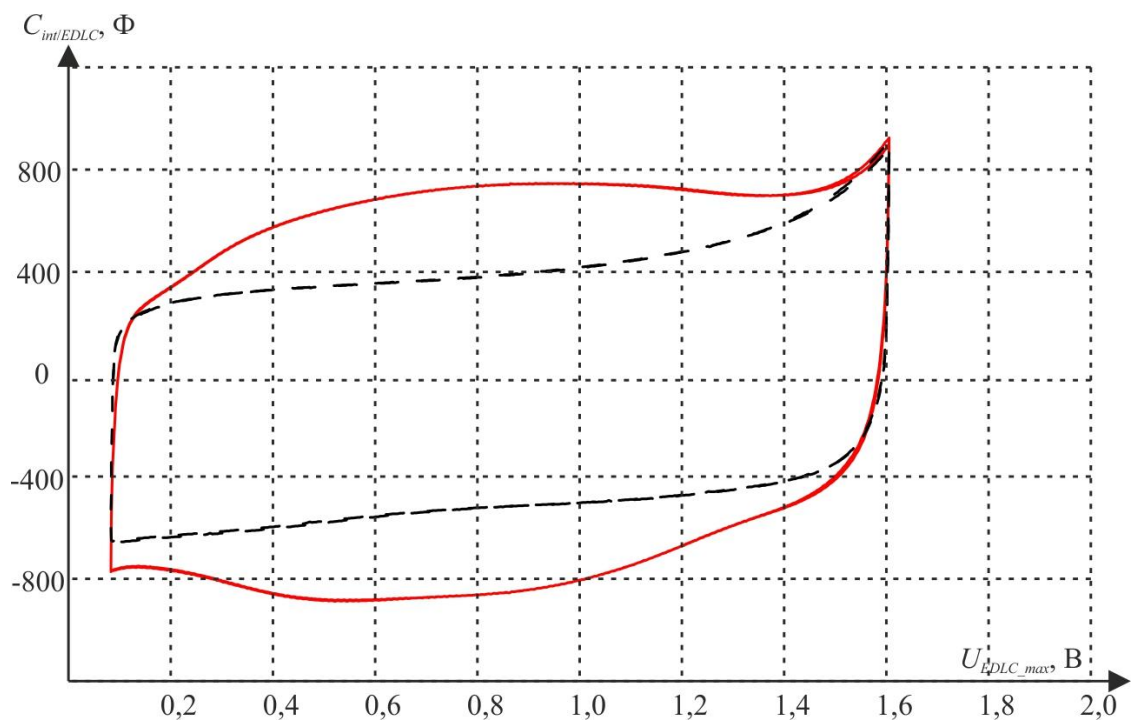


Рис. 3.12 Параметри заряду/розряду обраних *EDLC* у заданих межах *SOC*

І нарешті, розраховується ефективність запропонованої комплектації СЕУ **КПК** динамічними джерелами живлення типу *EDLC* для певного

експлуатаційного режиму (Рис. 3.13) з урахуванням множини ситуаційних чинників $\bar{C}_i$ експлуатаційного режиму СЕУ КПК конкретного судна, наприклад, типу *Supply Vessels* (Додаток Ж), однолінійну схему якого представлено на Рис. Ж.1. Зазначені чинники враховуються у завданні (2.3) вирішення локальної задачі ідентифікації експлуатаційного режиму, кожному з яких відповідає свій склад ефективних змінних.

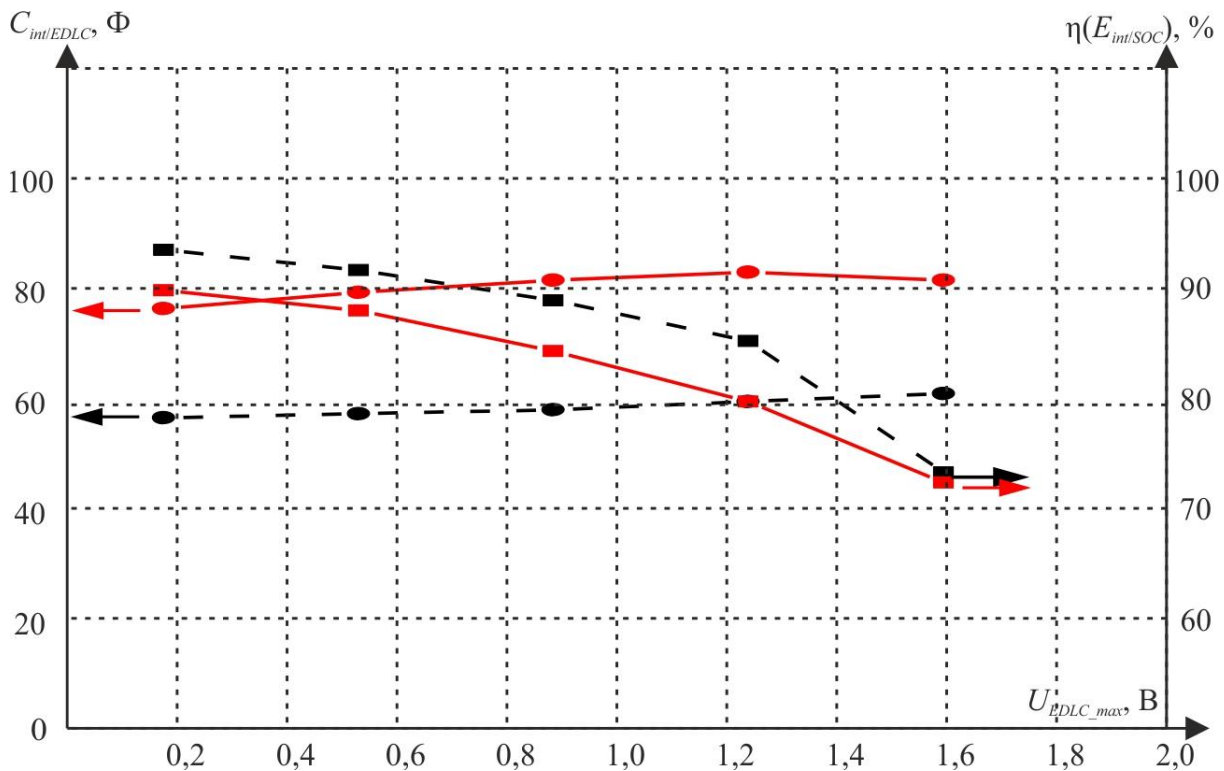


Рис. 3.13 Порівняльні характеристики ефективності циклів заряду/розряду *EDLC* запропонованої комплектації СЕУ КПК динамічними джерелами живлення для двох експлуатаційних режимів: повна комплектація – 4 СОДГ (червона суцільна лінія); часткова комплектація – 3 СОДГ (чорна пунктирна лінія)

3.7. Висновки до розділу

У рамках вирішення першої головної задачі, у результаті дослідження засобів діагностики та прогнозування технічного стану СЕУ КПК удосконалено метод обчислювальної гідродинаміки за рахунок застосування п'єзоелектричних датчиків на лініях валопроводів азимутальних ПП, що дозволило відстежувати деградаційні ефекти від взаємодії потоків гребних гвинтів між собою і корпусом КПК.

Отримали подальший розвиток теоретичні положення формування рівнянь енергетичних процесів в КПК під час аналізу поведінки багатофазних нестационарних нестискуваних потоків гребних гвинтів методами високого порядку із використанням спеціальних законів розподілу шуканих інтенсивностей найбільш впливових деградаційних ефектів. В роботі представлені два подібних методи: метод розрахунку силових потоків від азимутальних рушіїв у вигляді диска силового приводу (англ. *Actuator Disk* – *AD*) та ідентифікації турбулентних областей із відносними коефіцієнтами вихрової в'язкості μ_t/μ_w .

І спеціалізований метод розрахунку складових x -швидкостей на перетині потоку гвинта азимутального ПП вздовж осі обертання із розмірами в одиницях діаметра гвинта D_p . Зазначений метод побудований на основі реалізації методу поверхнево-орієнтованого усереднення рівняння Рейнольдса Нав'є-Стокса для масообміну на кордоні розділу фаз. В цьому випадку вдалося уникнути ряду труднощів, пов'язаних з нелінійністю методу і враховувати реальну форму азимутального ПП без будь-яких апроксимацій.

Також, за рахунок можливості збільшувати кількість перетинів вимірювань, вдається повноцінно проаналізувати ефективність запропонованих методів боротьби з вищевказаними деградаційними ефектами.

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.

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.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТРАТЕГІЇ ВСЕРЕЖИМНИХ РЕГУЛЯТОРІВ ПОТУЖНІСТЮ, МОМЕНТОМ ТА ЧАСТОТОЮ ОБЕРТАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ ПІДРУЛЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ КОМБІНОВАНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ

4.1. Удосконалення математичного апарату при моделюванні енергетичних процесів в різних експлуатаційних режимах

Згідно з [Рис. 1.4](#) для багатошинної конструкції ГРЩ форма вихідної напруги на обмотках [ГЕД](#) формується за допомогою імпульсів управління, розрахунок оптимізованої моделі яких почнемо із основної форми хвилі вихідної напруги ПЧ, яка може бути подана за допомогою змісту в ній гармонік у такий спосіб:

$$U(\varphi, t) = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{U_d}{2} \cdot \sum_{n_g=1,3,5,\dots} \frac{1}{n_g} \cdot \sin(n_g \cdot \frac{\pi}{2}) \times [\cos(n_g \cdot (\omega t + \varphi)) + \cos(n_g \cdot (\omega t - \varphi))] \quad (4.1)$$

де:

- U – напруга на виході ПЧ, В;
- U_d – напруга на ланці постійного струму ПЧ (*DC link*), В;
- n_g – номер гармоніки;
- ω – циклічна частота даної гармоніки, рад/с;
- φ – початкова фаза максимального значення даної гармоніки відносно основної, рад.

Основне рівняння, що базується на (4.1), може бути визначено для форми хвилі напруги з багатократними рівнями. Кути управління для моделі з вісьма рівнями за напівперіод, обумовлені довільно обраними дев'ятьма гармонійними складовими, визначені в такий спосіб:

$$\begin{aligned}
 U(\varphi_{11}, \varphi_{12}, \varphi_{21}, \varphi_{22}, \varphi_{31}, \varphi_{32}, \varphi_{41}, \varphi_{42}, \varphi_{51}, t) = & \frac{4}{\pi} \cdot \frac{U_d}{2} \cdot \sum_{n_g=1,3,5,\dots} \frac{1}{n_g} \cdot \sin(n_g \cdot \frac{\pi}{2}) \times \\
 & \times \left\{ \begin{aligned} & \left[\cos(n_g \cdot (\omega t + \varphi_{11})) + \cos(n_g \cdot (\omega t - \varphi_{11})) \right] - \\ & - \left[\cos(n_g \cdot (\omega t + \varphi_{12})) + \cos(n_g \cdot (\omega t - \varphi_{12})) \right] + \\ & + \left[\cos(n_g \cdot (\omega t + \varphi_{21})) + \cos(n_g \cdot (\omega t - \varphi_{21})) \right] - \\ & - \left[\cos(n_g \cdot (\omega t + \varphi_{22})) + \cos(n_g \cdot (\omega t - \varphi_{22})) \right] + \\ & + \left[\cos(n_g \cdot (\omega t + \varphi_{31})) + \cos(n_g \cdot (\omega t - \varphi_{31})) \right] - \\ & - \left[\cos(n_g \cdot (\omega t + \varphi_{32})) + \cos(n_g \cdot (\omega t - \varphi_{32})) \right] + \\ & + \left[\cos(n_g \cdot (\omega t + \varphi_{41})) + \cos(n_g \cdot (\omega t - \varphi_{41})) \right] - \\ & - \left[\cos(n_g \cdot (\omega t + \varphi_{42})) + \cos(n_g \cdot (\omega t - \varphi_{42})) \right] + \\ & + \left[\cos(n_g \cdot (\omega t + \varphi_{51})) + \cos(n_g \cdot (\omega t - \varphi_{51})) \right] \end{aligned} \right\}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Отримані рівняння можуть бути перетворені у вид, де кожна гармоніка подається окремо. Рівняння кожної гармоніки, які базуються на (4.2), включаючи основну можуть бути описані одним. Амплітуда n_g -ої гармоніки може бути подана в загальній формі (після тригонометричних перетворень):

$$\begin{aligned}
 U(\varphi_{11}, \varphi_{12}, \varphi_{21}, \varphi_{22}, \varphi_{31}, \varphi_{32}, \varphi_{41}, \varphi_{42}, \varphi_{51}, t) = & \frac{4}{\pi} \cdot \frac{U_d}{2} \cdot \sum_{n_g=1,3,5,\dots} \frac{1}{n_g} \cdot \sin(n_g \cdot \frac{\pi}{2}) \times \\
 & \times \left\{ \begin{aligned} & \left[2 \cos(n_g \cdot \varphi_{11}) \cdot \cos(n_g \cdot \omega t) \right] - \\ & - \left[2 \cos(n_g \cdot \varphi_{12}) \cdot \cos(n_g \cdot \omega t) \right] + \\ & + \left[2 \cos(n_g \cdot \varphi_{21}) \cdot \cos(n_g \cdot \omega t) \right] - \\ & - \left[2 \cos(n_g \cdot \varphi_{22}) \cdot \cos(n_g \cdot \omega t) \right] + \\ & + \left[2 \cos(n_g \cdot \varphi_{31}) \cdot \cos(n_g \cdot \omega t) \right] - \\ & - \left[2 \cos(n_g \cdot \varphi_{32}) \cdot \cos(n_g \cdot \omega t) \right] + \\ & + \left[2 \cos(n_g \cdot \varphi_{41}) \cdot \cos(n_g \cdot \omega t) \right] - \\ & - \left[2 \cos(n_g \cdot \varphi_{42}) \cdot \cos(n_g \cdot \omega t) \right] + \\ & + \left[2 \cos(n_g \cdot \varphi_{51}) \cdot \cos(n_g \cdot \omega t) \right] \end{aligned} \right\}
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

Похідна амплітуди n -ої гармоніки:

$$\hat{U}_{n_g} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{U_d}{2} \cdot \frac{1}{n_g} \cdot \sin(n_g \cdot \frac{\pi}{2}) \cdot \left\{ \begin{array}{l} 2 \cos(n_g \cdot \varphi_{11}) - \\ - 2 \cos(n_g \cdot \varphi_{12}) + \\ + 2 \cos(n_g \cdot \varphi_{21}) - \\ - 2 \cos(n_g \cdot \varphi_{22}) + \\ + 2 \cos(n_g \cdot \varphi_{31}) - \\ - 2 \cos(n_g \cdot \varphi_{32}) + \\ + 2 \cos(n_g \cdot \varphi_{41}) - \\ - 2 \cos(n_g \cdot \varphi_{42}) + \\ + 2 \cos(n_g \cdot \varphi_{51}) \end{array} \right\} \quad (4.4)$$

Ці основні рівняння, що описують гармоніки напруги, використовуємо для обчислення оптимізованої моделі імпульсів управління, із метою стабілізації основної гармоніки напруги й усунення 5-ої, 7-ої, 11-ої, 13-ої, 17-ої, 19-ої, 23-ої і 25-ої.

У результаті половина рівня напруги постійного струму *DC-link* для, наприклад, 6600 В вихідної напруги дорівнює:

$$U_{dc_igct_N} = \frac{1}{\text{modind_N}} \cdot \frac{6600 \text{ В} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 5389 \text{ В},$$

що є базовою для всіх розрахунків.

Генерація імпульсів управління, з точки зору отримання синусоїдальної форми напруги на АД, підвищить ефективність передачі потужності до гвинта і виходить з основної форми хвилі вихідного напруги ПЧ:

$$U(\varphi - \alpha, (t - t_{\text{ПЧ}}) / s_U) = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{U_{DC_N}}{2} \cdot \sum_{n_g=1,3,5,\dots} \frac{1}{n_g} \cdot \sin(n_g \cdot \frac{\pi}{2}) \left[\cos(n_g (\omega \times \right. \\ \left. \times ((t - t_{\text{ПЧ}}) / s_U) + (\varphi - \alpha))) + \cos(n_g (\omega ((t - t_{\text{ПЧ}}) / s_U) - (\varphi - \alpha))) \right] \quad (4.5)$$

де: s_U – необхідна шпаруватість напруги, [в.о.], яка залежить від інтенсивності завдання упору T_p (4.23) або моменту гвинта M_p (4.25), а значить і споживаної АД активної потужності P_p (4.26).

Для визначення розмірів фільтра повинно враховуватися таке: реактор на стороні інвертора визначений таким чином, щоб згладжувати пульсації струму інвертора; сервісний вторинний реактор на стороні ГЕД повинний бути обраний так, щоб обмежити будь-які струми короткого замикання; конденсатор фільтра обраний таким чином, що резонансна частота була близька до дев'ятикратного значення основної гармоніки напруги в кожній робочій точці.

Моделювання виконувалося в *MatLab/Simulink*. Генератори $G1 - G3$, АД ПП $M2, M7$ і потужних вантажних насосів $M4, M6$ (Рис. 1.4) – стандартні блоки з бібліотеки *Simulink*, ініціалізовані за методикою [259, 266] (див. підрозділ 5.7)

4.2. Принципи систематизації рівнянь різних технологічних процесів

Для суден з КПК існує ряд суднових підйомно-транспортних механізмів (ПТМ), на яких встановлюються тиристорні електроприводи постійного або змінного струму: потужні мостові крани, перевантажувачі, високопродуктивні баштові крани.

Для таких механізмів завдання мінімізації розгойдування вантажу можна ефективно вирішувати шляхом формування спеціальних законів керування електроприводом, оскільки системи керування (СК) побудовані за гнучкою технологією.

В даний час існує ряд рішень, які дозволяють знизити механічні коливання вантажу [86]. Ці рішення спрямовані на обмеження прискорень в перехідному процесі та отримання плавної зміни контрольованого параметру.

До таких рішень можна віднести використання задавачів інтенсивності, застосування фільтрів на виходах регуляторів, введення зворотних зв'язків по

похідних контрольованих параметрів, зміну коефіцієнтів передачі регуляторів, регулювання часу пуску і гальмування [158].

При використанні перерахованих способів значне обмеження розгойдування вантажу досягається шляхом істотного збільшенні часу перехідних процесів переміщення вантажу, що призводить до зменшення продуктивності механізмів. Існує необхідність розробки таких систем керування електроприводами ПТМ, використання яких дозволить найбільш ефективно обмежувати коливання вантажу при високій продуктивності електроприводу і можливості гнучкого управління механізмами із застосуванням регресивних методів [173].

Для ПТМ КПК особливим експлуатаційним режимом є такий, в якому є потреба зміни принципу управління продовж процесу підйому вантажу, що пов'язано, насамперед, із постійним впливом на об'єкт автоматичного керування (ОАК) довкілля.

При чому, під ОАК розуміється підсистема, сформована для виконання таких умов: СК дозволяє цілеспрямовано змінювати значення керованих величин з певною періодичністю; цілеспрямоване коригування керованих величин оцінюється за допомогою вимірів в реальному масштабі часу. Безаварійне протікання різних технологічних, виробничих і транспортних процесів у СЕУ КПК може бути забезпечено лише тоді, коли ті чи інші суттєві для цих процесів фізичні величини змінюються певним чином. Завдання до дотримання позиції полягає в забезпеченні практичної зміни керованої величини відповідно до заданої дії при впливі збурення на процес керування.

Узагальнено будь-яку систему автоматичного керування (САК) можна побудувати з двох функціонально-закінчених підсистем (ФЗП): ОАК і пристрою автоматичного керування (ПАК), з'єднаних між собою відповідно до використовуваного принципу керування.

САК, що виконують протирозгойдувані функції підрозділяються на дві основні групи: із замкнутим і розімкнутим контурами керування [24]. Перші

засновано на сигналах зворотного зв'язку від поточного навантаження, кутового відхилення, положення елементів електроприводу і його швидкості, які вимірюються за допомогою додаткових датчиків.

Системи з відкритим контуром працюють із застосуванням попередження факту виходу контрольованого параметру за межі, та їх принцип дії засновано на спробі усунути похибку до того, як вона відбувається.

На цей час існують різні підходи щодо пом'якшення наслідків виходу вантажу що переміщується із усталеного стану.

У [18] застосовано інтелектуальний підхід із введенням сформованого сигналу, щоб запобігти розгойдування, так званий метод компенсації із похідною, пропорційною контрольованому параметру. Аналогічний принцип керування із застосуванням нейронного контролера, заснованого на принципі компенсації невизначеності запропоновано у [7].

Управління на основі спостерігача розроблено і випробувано у реальному мостовому крані [198].

У [83], при дослідженні двовимірній моделі порталного крану із *PD fuzzy*-контролером, використано затримання сигналу зворотного зв'язку із компенсацією сформованого вхідного сигналу похибки.

На цьому етапі необхідно зауважити, що дестабілізація руху ПТМ КПК залежить насамперед від неузгодження процесів керування у самій САК з іншими процесами: енергетичними у СЕУ; технологічними на судні, і гідродинамічними у КПК, як об'єкту, що знаходиться під впливом довкілля. А якщо розглядати СЕУ КПК у режимі *DP*, то не враховувати дестабілізаційні чинники є прямим шляхом у невирішеність проблеми розгойдування вантажів взагалі [231, 253].

Аналізуючи, наприклад, стійкість по Ляпунову, в першу чергу необхідно приділяти увагу опису СК просторовими рівняннями з урахуванням збурюючих чинників довкілля, що впливає на КПК. Тобто,

[До змісту](#)

можна констатувати за потрібне удосконалення методів Ляпунова, оскільки визначення стійкості динамічної системи, якою є САК, без урахування впливу на неї поведінки КПК, не має сенсу [254].

Існує багато критеріїв стійкості САК, але, для КПК взагалі і для СЕУ зокрема, як для керованих об'єктів, характерна нелінійна нестационарна структура, що накладає обмеження на застосування цих критеріїв для інваріантних у часі нелінійних САК судовими ПТМ.

Тому, хоча другий метод Ляпунова, з іншого боку, і посягає на універсальність, і є необхідною умовою для аналізу стабільності нелінійних динамічних САК, точні рішення від його застосування годі й чекати, бо вони можуть бути недосяжними, а отримання успішного результату може бути нелегким завданням, якщо не сказати – нездійсненим [232].

Наступним є той факт, що для стаціонарних лінеаризованих САК властива проблема оптимізації коефіцієнтів передачі регуляторів з одночасним дотриманням продуктивності всього електроприводу, як частини СЕУ **КПК**. Це досягається шляхом послідовного ітераційного зменшення коефіцієнтів передачі за методом Ляпунова, як правило, використовуючи диференційні рівняння, записані у формі матриць лінійних нерівностей, щоб гарантувати продуктивність електроприводу [225].

Чисельні приклади показують, що метод є ефективним при ідентифікації контролерів САК із занадто зниженими коефіцієнтами передачі, які задовольняють типовим обмеженням продуктивності, і що, як основний метод, він може бути розширений для обробки нелінійних САК і контролерів [224].

На **Рис. Б.30** представлено фрагмент вантажно-розвантажувальної системи модернізованого КПК судна, призначеної для забезпечення, паралельного основному на верхній палубі, технологічного процесу вантажно-розвантажувальних робіт (ВРП).

Виконуючи першу і другу задачі на базі рівнянь руху твердого тіла для судна з КПК (див. підрозділ 5.5) складено систему рівнянь для визначення

відносного вертикального переміщення вантажу вантажно-розвантажувальної системи судна (Рис. 4.1).

Оскільки такий параметр як вага судна є визначальним у нестационарності КПК і СЕУ зокрема, то параметрами вантажних електроприводів верхньої палуби можна знехтувати. При цьому урахування коливань судна, зміни параметрів СЕУ і КПК взагалі здійснювалося на базі застосування так званих *DMI*-моделей суден в залежності від водотоннажності, збурюючих чинників і коефіцієнтів передачі всережимних регуляторів, враховуючих перехід судна на інший експлуатаційний режим.

При чому, під ОАК розуміється підсистема, сформована для виконання таких умов: СК дозволяє цілеспрямовано змінювати значення керованих величин з певною періодичністю; цілеспрямоване коригування керованих величин оцінюється за допомогою вимірів в реальному масштабі часу. Безаварійне протікання різних технологічних, виробничих і транспортних процесів у СЕУ КПК може бути забезпечено лише тоді, коли ті чи інші суттєві для цих процесів фізичні величини змінюються певним чином. Завдання до дотримання позиції полягає в забезпеченні практичної зміни керованої величини відповідно до заданої дії при впливі збурення на процес керування.

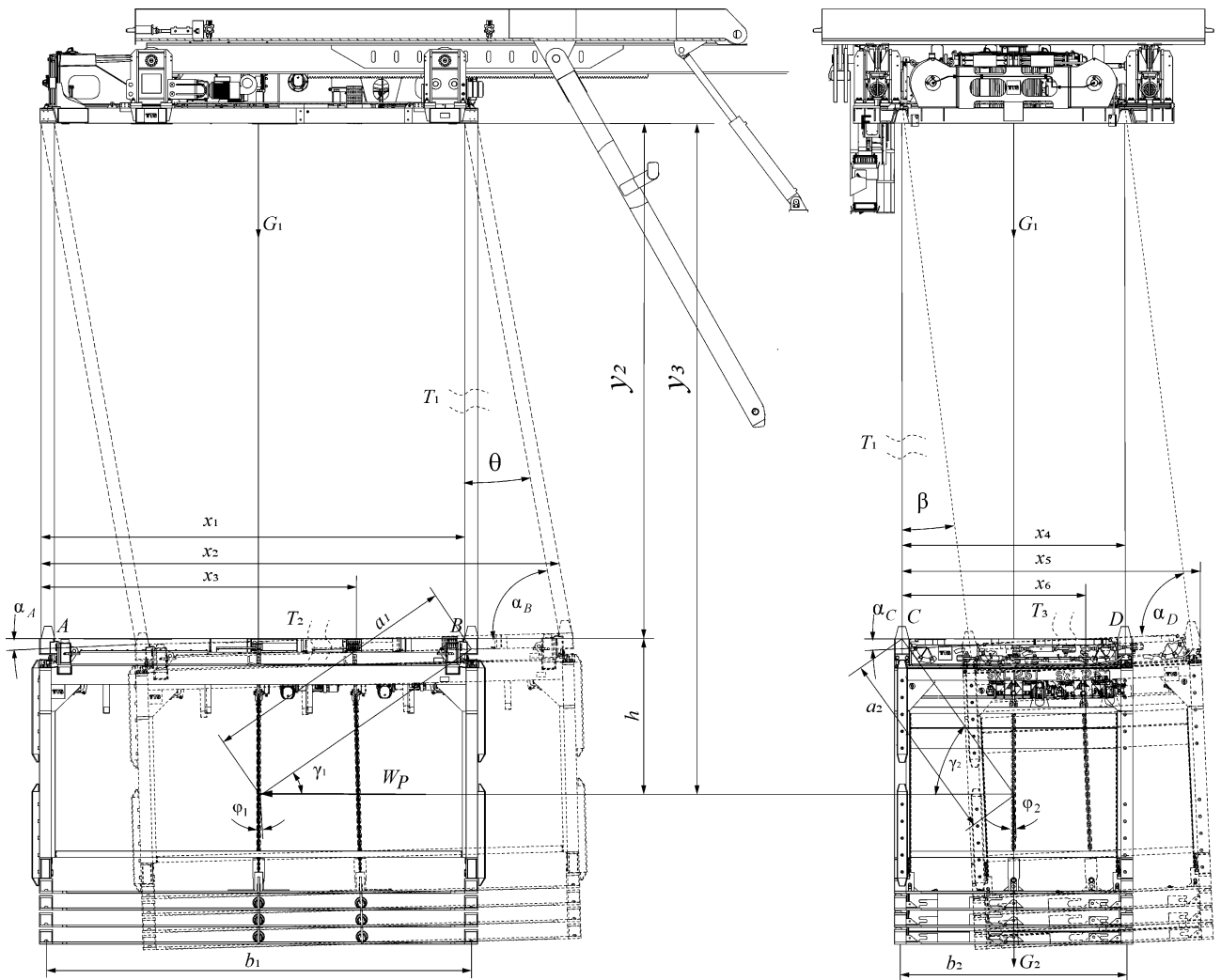


Рис. 4.1 Схема динаміки руху вантажопідйомного механізму: m_1 – маса вантажопідйомної рамки; F_T – сумарне тягове зусилля; W_P – сила опору руху рамки; T_1 – сила натягу периметральних тросів; T_2 , T_3 – сили натягу поперечних тросів; G_1 – сила тяжіння вантажопідйомної рамки; G_2 – сила тяжіння утримувача вантажу; G_3 – сила тяжіння вантажу; $\varphi_{1,2}$ – кут повороту рамки; $\alpha_{A,C}$, $\alpha_{B,D}$ – кути між вантажем і тросами; θ , β – кути відхилення відповідних тросів від початкового положення; h – вертикальна відстань між точками закріплення тросів і центром тяжіння вантажу; $b_{1,2}$ – відстані між точками закріплення тросів; $a_{1,2}$ – відстані між точками закріплення тросів і центром тяжіння вантажу.

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x}_{1,4} = \frac{1}{m_1} (-T_{1,4} \times \sin(\theta, \beta) + F_T - W); \\ \ddot{y}_1 = 0; \\ \ddot{x}_{2,5} = \frac{1}{m_2} (T_{1,4} \times \sin(\theta, \beta) - T_{2,3} \times \cos(\alpha_A, \alpha_C) + T_{3,2} \times \cos(\alpha_B, \alpha_D)); \\ \ddot{y}_2 = \frac{1}{m_2} (T_{1,4} \times \cos(\theta, \beta) - T_{2,3} \times \sin(\alpha_A, \alpha_C) - T_{3,2} \times \sin(\alpha_B, \alpha_D) - G_2); \\ \ddot{x}_{3,6} = \frac{1}{m_3} (T_{2,3} \times \cos(\alpha_A, \alpha_C) - T_{3,4} \times \cos(\alpha_B, \alpha_D) - W_p); \\ \ddot{y}_3 = \frac{1}{m_3} (T_{2,3} \times \sin(\alpha_A, \alpha_C) + T_{3,2} \times \sin(\alpha_B, \alpha_D) - G_3); \\ \varphi_{1,2} = \frac{1}{m_3} (T_{2,3} \times a_{1,2} \times \cos(\alpha_A, \alpha_C - \gamma_{1,2}) - T_{3,4} \times a_{1,2} \times \cos(\alpha_B, \alpha_D - \gamma_{1,2})); \end{array} \right. \quad (4.6)$$

де: $T_1 = k \times \Delta l_1 + \beta \times \Delta \dot{l}_1$ – сила натягу периметральних тросів;

$k = \frac{E \times S}{l_1}$ – коефіцієнт жорсткості тросу;

E – модуль абсолютної пружності матеріалу підвісу;

$S = \frac{\pi \times d^2}{4} \times c$ – площа перерізу тросу;

d – діаметр тросу;

c – коефіцієнт заповнення перерізу тросу;

$\Delta l_1 = l_1 - l_{10}$ – подовження периметральних тросів;

l_1 – довжина периметральних тросів під час руху;

l_{10} – довжина периметральних тросів в положенні рівноваги;

$\Delta \dot{l}_1 = \frac{(x_1 - x_2) \times (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + (y_1 - y_2) \times (\dot{y}_1 - \dot{y}_2)}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}$ – швидкість зміни довжини

периметральних тросів;

β – коефіцієнт втрат енергії;

$T_2, T_3 = k \times \Delta l_2, \Delta l_3 + \beta \times \Delta \dot{l}_2, \Delta \dot{l}_3$ – сила натягу поперечних тросів;

$\Delta l_2, \Delta l_3, \Delta l_5, \Delta l_6 = l_2, l_3, l_5, l_6 - l_{20}, l_{30}, l_{50}, l_{60}$ – зміна довжини поперечних

тросів;

[До змісту](#)

$$- l_2, l_3, l_5, l_6 = \sqrt{(x_{2,5} - x_{A,C}, x_{B,D})^2 + (y_2 - y_{A,C}, y_{B,D})^2} - \text{довжина поперечних}$$

тросів під час руху;

– $l_{20}, l_{30}, l_{50}, l_{60}$ – довжина поперечних тросів при рівноважному положення вантажу;

$$- \Delta i_2, \Delta i_3, \Delta i_5, \Delta i_6 = \frac{(2 \times (x_{2,5} - x_{A,C}, x_{B,D}) \times (\dot{x}_{2,5} - \dot{x}_{A,C}, \dot{x}_{B,D}) + (2 \times (y_2 - y_{A,C}, y_{B,D}) \times (\dot{y}_2 - \dot{y}_{A,C}, \dot{y}_{B,D}))}{2 \times \sqrt{(x_{2,5} - x_{A,C}, x_{B,D})^2 + (y_2 - y_{A,C}, y_{B,D})^2}} -$$

швидкість подовження поперечних тросів;

– G_1 – сила тяжіння рамки утримувача вантажу;

– G_2 – сила тяжіння траверси;

– m_3 – маса вантажу;

$$- \theta, \beta = \arctan\left(\frac{x_{1,4} - \dot{x}_{1,4}}{x_{2,5} - \dot{x}_{2,5}}\right) - \text{кут відхилення периметральних тросів від}$$

початкового положення;

$$- \alpha_A, \alpha_C = \arcsin\left(\frac{(x_{2,4} - x_{A,C})(y_{B,D} - y_{A,C}) - (x_{A,C} - x_{B,D})(y_2 - y_{A,C})}{b \times l_2}\right) - \text{кут між}$$

траверсою і вантажем;

$$- \alpha_B, \alpha_D = \arcsin\left(\frac{(x_{2,4} - x_{B,C})(y_{A,C} - y_{B,D}) - (x_{B,D} - x_{A,C})(y_2 - y_{B,D})}{b \times l_3}\right) - \text{кут між}$$

діаметральною площиною судна і вантажем;

$$- a_{1,2} = \sqrt{h^2 + \left(\frac{b_{1,2}}{2}\right)^2} - \text{відстань між центром тяжіння і точками}$$

закріплення вантажу у рамці;

– h – вертикальна відстань між центром тяжіння і точками закріплення вантажу у рамці;

– $b_{1,2}$ – відстані між точками закріплення вантажу;

$$- W_p = 1000 \times \frac{1}{2} \times \rho \times \dot{x}_{3,6} \times c_A \times n \times b_{1,2} \times h - \text{сила опору при русі вантажу};$$

– ρ – щільність доквілля;

– c_A – коефіцієнт урахування аеродинамічної сили;

– n – перевантажувальна спроможність.

4.3. Формалізація принципу декомпозиції енергетичних процесів у експлуатаційному режимі по ситуаційним чинникам

Позначимо через $\bar{C}_i$ – множину ситуаційних чинників експлуатаційного режиму СЕУ КПК судна типу *Supply Vessels* (Додаток Ж), однолінійну схему якого представлено на (Рис. Ж.1), що враховуються у завданні (2.3), кожному з яких відповідає свій склад ефективних змінних.

Припустимо, що 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 певної множини $\bar{C}_{ik}$, $k = 1, 2, \dots, L$, а завдання (2.3) замінюється еквівалентно завданням для типової ситуації $\bar{C}_{ik}$.

У найбільш простому випадку типові ситуації не будуть мати перетину, тобто:

$$\begin{aligned} \bar{C}_{ik} \cap \bar{C}_{ij} &= \emptyset, k = 1, 2, \dots, L; \\ j &= 1, 2, \dots, L; k \neq j. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Однак таке розмежування представляє швидше виняток, ніж правило. У більш загальному випадку умова (4.7) не виконується, тобто типові ситуаційні чинники можуть перетинатися за окремими ознаками різних експлуатаційних режимів. Тоді в задачі повинні бути враховані всі типові ситуаційні чинники, за якими має місце перетин.

Віднесення поточної ситуаційних чинників до типових здійснюється на основі обчислення всіх характерних ознак поточного експлуатаційного режиму, з подальшим порівнянням їх із системами ознаками для різних

типових ситуаційних чинників. Їм буде відповідати така типова ситуація, для якої має місце збіг за всіма ознаками.

Відсутність такої типової ситуації означатиме приналежність поточних ситуаційних чинників до пересічних, тобто наявність характерних ознак поточних ситуаційних чинників, які належать одночасно до різних експлуатаційних режимів.

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

$$\dot{I}(t) = [-R_{(\Psi)F} \cdot I(t) + E_F(t)] / L_{(\Psi)F} \quad (4.8)$$

$$\dot{I}^m(t) = [-R_{(\Psi)F}^m \cdot I^m(t) + E_F^m(t) + \beta_x \cdot X_F^i(t) + \beta_\delta \cdot \delta_F^i(t) + \beta_\varphi \cdot Y_F^i(t)] / L_{(\Psi)F}^m \quad (4.9)$$

З урахуванням обставини завдання координації для найбільш загального випадку, первинна задача (2.3), яка ототожнює у даному випадку пріоритети (4.8) і (4.9), може бути сформульована як задача визначення характерних ознак поточних ситуаційних чинників, що належать різним експлуатаційним режимам, з наступним об'єднанням пересічних ситуацій. Дане завдання може бути сформульована таким чином:

$$\begin{aligned} d_i &= 0; a_{ij} = 0; j = 0; j = 1, 2, \dots, L; \\ \exists k &= 1, 2, \dots, L; p_{is} \in P_{ik}, s = 1, 2, \dots, S \Rightarrow \\ \Rightarrow d_i &= 1; b_{ks} = 1; a_{ik} = 1; \\ \bar{C}_{ik} \cup \bar{C}_{ij}, &j = 1, 2, \dots, L; \end{aligned} \quad (4.10)$$

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 організовано тільки по модулю струму навантаження $I(t)$.

Тоді, наразі відсутності пересічних ознак завдання зводиться до послідовного перебору системних ознак типових ситуаційних чинників P_{ik} з метою відшукування таких, які повністю збігається з ознаками k -того типового ситуаційного чинника для i -го ідентифікатору експлуатаційного режиму. Спільне рішення (4.8), (4.9), (4.10) виглядає наступним чином:

$$\begin{bmatrix} I(s) \\ E_F(s) \\ C_{ik}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_I^i(s) & W_E^i(s) & W_k^C(s) \\ k & 1/s & 0 \\ 0 & i & 1/s \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_k^C(0) \\ E_{k(F)}^C(0) \\ C_{ik}(1) \end{bmatrix}, k \neq i; \quad (4.11)$$

$$\begin{bmatrix} I(s) \\ E_F(s) \\ X_F^i(s) \\ Y_F^i(s) \\ \delta_F^i(s) \\ C_{ik}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_I^I(s) & W_i^E(s) & W_i^X(s) & W_i^Y(s) & W_i^\delta(s) & W_k^C(s) \\ k & 1/s & i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k & 1/s & i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k & 1/s & i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k & 1/s & i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k & 1/s \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_k^C(0) \\ E_{k(F)}^C(0) \\ X_F^C(0) \\ Y_F^C(0) \\ \delta_F^i(0) \\ C_{ik}(1) \end{bmatrix}; \quad (4.12)$$

де: – s – оператор диференціювання;

– $W^I(s)$; $W^E(s)$; $W^X(s)$; $W^Y(s)$; $W^\delta(s)$;

[До змісту](#)

– $W^C(s)$ – передавальні функції, відповідно за складовими впливів I , E , X , Y , δ , C .

Керуючи впливи δ_I , що забезпечує 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, мають бути сформовані згідно теоретичних положень, викладених у підрозділі 4.4, за співвідношеннями (4.30), (4.31), які отримані у результаті спільного рішення (4.11), (4.12), (4.13) з урахуванням всережимності регуляторів оборотів ПП (підрозділ 4.4).

$$\begin{aligned} d_i = 1 &\Rightarrow \sum_{s=1}^S b_{ks} \rightarrow \max_k k = 1, 2, \dots, L; \\ \bar{C}_j &= \bar{C}_k, j = 1, 2, \dots, L. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Так як наведені описи джерела і споживача 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 кожного електродвигуна ПП задається вектором тяги $u = (u_x, u_y)$ (Рис. Ж.12), і тому електродвигуни можуть бути змодельовані, наприклад, в прямокутній системі координат засобів *Matlab/Simulink*.

4.4. Синтез математичних моделей всережимних регуляторів

Для ГФК взаємодія між моментом гвинта M_p , який зумовлюється силою поштовху F_p , упором T_p і потужністю P_p гвинта знаходимо на підставі діаграми вільної води і рівнянь динаміки щодо частоти обертання валу і діаметра гвинта [175]:

$$\left. \begin{aligned} T_p &= \rho \cdot D_p^4 \cdot K_T \cdot n \cdot |n|; \\ M_p &= \rho \cdot D_p^5 \cdot K_F \cdot n \cdot |n|; \\ P_p &= 2\pi \cdot n \cdot M_p, \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

де: – n – частота обертання гвинта, об/с;
 – ρ – щільність води, кг/м³;
 – D_p – діаметр гвинта, м;
 – K_T – коефіцієнт упору гвинта;
 – K_F – коефіцієнт моменту.

Відносний крок гвинта $\lambda (H_p) = v_a/(nD_p)$, де v_a – швидкість притоку води на гребний гвинт. Ефективність використання гвинта на відкритій воді визначається як відношення виконаної гвинтом роботи для отримання сили тяги до роботи, необхідної для подолання крутного моменту на валу:

$$\eta_p = \frac{v_a \cdot M_p}{2\pi n T_p} = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{K_T}{K_F}. \quad (4.15)$$

Значення K_T , K_F і η_p для конкретного конструктивного кроку H_p/D_p гребного гвинта [ПП](#) можна визначити, наприклад з роботи [147, табл. 5], виходячи з того, що число Рейнольдса $R_n = 2 \times 10^6$, кількість лопатей гвинта $Z = 4$, $D_p = 3,1$ м, дискового співвідношення $A_E/A_0 = 0,52$ ([Рис. 4.2](#)).

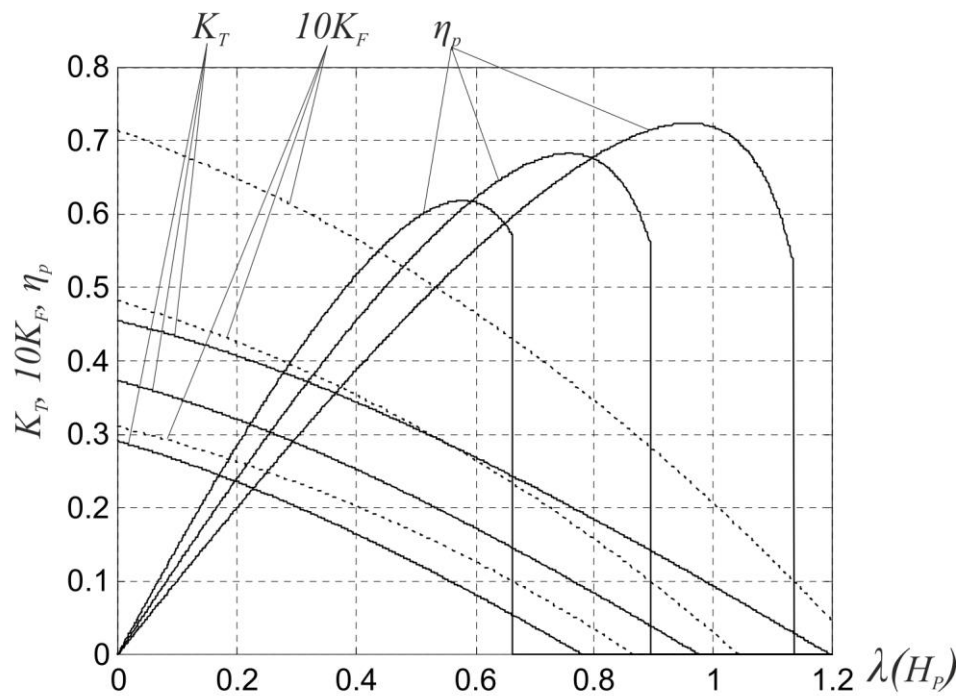


Рис. 4.2 Графіки залежності параметрів гребного гвинта [ПІП](#) від відносного кроку гвинта: — — — — — K_T при $H_p/D_p = 0,7$; — K_F при $H_p/D_p = 0,89$;
- - - - - η_p при $H_p/D_p = 1,1$

Відносна залежність швидкості руху гвинта від абсолютної швидкості руху судна характеризується коефіцієнтом попутного потоку w_s : $v_a = (1 - w_s)v_s$, де як правило, $0 < w_s < 0,4$. В результаті всмоктування знижується тиск за гвинтом, що призводить до збільшення опору. При цьому відносна залежність загального упору всіх гвинтів від опору руху судна характеризується коефіцієнтом горизонтального утримання (засмоктування) t_s :

- $k_p T_p = R_u / (1 - t_s)$ ($0 < t_s < 0,2$);
- k_p — кількість гвинтів;
- R_u — опір руху судна, Н.

Коефіцієнт t_s залежить від швидкості руху судна і обводів корпусу в районі розташування гвинта, що призводить до зниження тиску. У деяких випадках t_s може мати від'ємне значення. За допомогою коефіцієнта w_s враховується зміна попутного потоку в порівнянні з відкритою водою, а за

допомогою коефіцієнта K_F – його залежність від зміни припливу в кормовій частині.

Загальний пропульсивний ККД комплексу судно – двигун – гребний гвинт обчислюємо за формулою:

$$\eta_{pr} = \frac{R_u \cdot v_s}{2\pi n T_p} = \eta_p \cdot \eta_h \cdot \eta_r \cdot \eta_m, \quad (4.16)$$

Тут $\eta_h = \frac{1-t_s}{1-w_s}$ – ККД корпусу; η_m – ККД валопроводу і реверс-редукторної передачі, $\eta_m = 0,9 \div 0,95$;

$$\eta_r = \frac{\eta_{pF}}{\eta_p} = \frac{\frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{K_T}{K_F}}{\eta_p} = \frac{K_F}{K_{FF}}; \quad (4.17)$$

де η_{pF} – ККД гвинта для даного значення K_F (див. [Рис. 4.2](#)).

Чутливість СЕУ [КПК](#) до втрат залежить від типу гвинта і двигуна, застосування різних стабілізаторів в конструкції корпусу судна і зміни алгоритмів управління в залежності від експлуатаційних умов.

Діючі значення упору і моменту гвинта знаходимо з співвідношень:

$$\begin{aligned} T_d &= h_T(n, x, \theta)(1-t)T_p = f_T(n, x, \theta), \\ M_d &= h_F(n, x, \theta)F_p = f_F(n, x, \theta), \end{aligned} \quad (4.18)$$

де: – x – динамічні параметри судна;
– θ – залежні параметри гвинта.

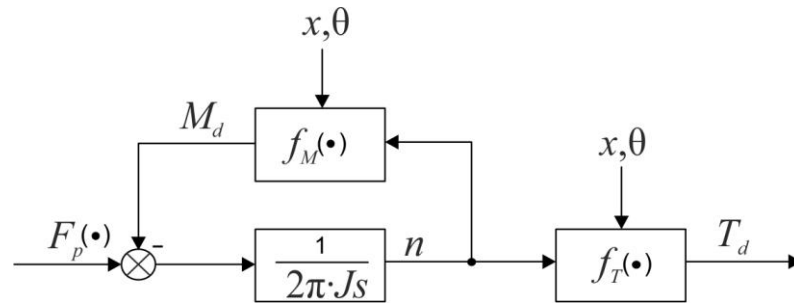


Рис. 4.3 Схема балансу діючих моментів гвинта: J_s – момент інерції судна

Потужність двигуна [ПІІ](#) визначаємо по формулам

$$\begin{aligned} P_d &= \omega T_d = 2\pi n T_d, \\ P_p &= \omega T_p = 2\pi n T_p. \end{aligned} \quad (4.19)$$

На підставі [\(4.14\)](#) і [\(4.19\)](#) отримуємо вирази для розрахунку упору гвинта в залежності від потужності на його валу:

$$\begin{aligned} T_d &= \text{sgn}(n) \frac{\rho^{1/3} \cdot D_p^{2/3} \cdot K_T \cdot h_T (1 - t_s)}{(2\pi \cdot K_F \cdot h_F)^{2/3}} P_d^{2/3}, \\ T_d &= \frac{K_T}{K_F D_p} \cdot M_d. \end{aligned} \quad (4.20)$$

Управління моментом є невід'ємною частиною конструкції більшості прикладних схем управління регулюванням швидкості систем електроприводів. Для регулювання моменту вимірюються струми двигуна і розраховується пропускна здатність з високою точністю ([Рис. 4.4](#)) .

Теоретично час наростання обертаючого моменту в перетворювачі частоти (ПЧ) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) обмежується індуктивністю двигуна в залежних інверторах струму з ланкою постійного струму [\[233\]](#).

Однак на практиці контролер обмежує швидкість зміни обертаючого моменту для запобігання пошкодження механічної частини електроприводу.

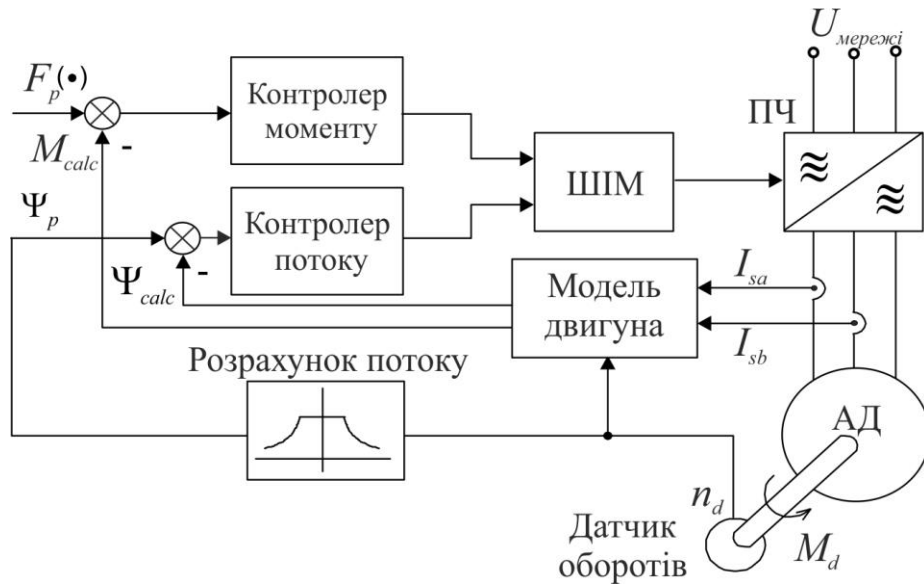


Рис. 4.4 Блок-схема замкнутої системи регулювання моментом асинхронного двигуна (АД) ПЧ: Ψ_p і Ψ_{calc} – значення заданого і розрахункового потоків, I_{sa} , I_{sb} – виміряні значення струмів статора

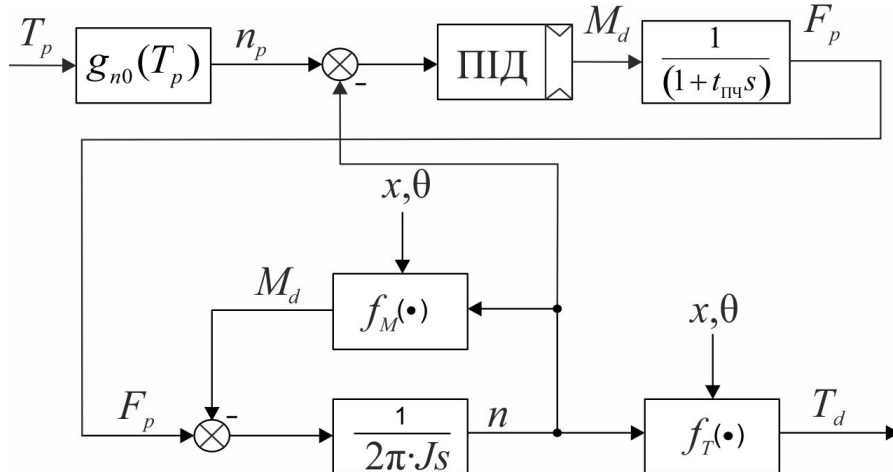


Рис. 4.5 Блок-схема регулятора швидкості

Таким чином, передавальну функцію контролера моменту можна описати залежністю

[До змісту](#)

$$F_p(s) = \frac{1}{(1 - t_{\text{ПЧ}}s)} M_d(s), \quad (4.21)$$

де $t_{\text{ПЧ}} = 20 \div 200$ мс.

У разі застосування ГФК регулятор швидкості використовується для забезпечення упору гвинта (Рис. 4.5) Швидкість обертання гвинта n_p (команда) задаємо, виходячи зі стандартної функції:

$$n_p = g_{n0}(T_p) = \text{sgn}(T_p) \sqrt{\frac{T_p}{\rho \cdot D_p^4 \cdot K_{T0}}}, \quad (4.22)$$

яка є зворотною відносно номінальної вентиляторної характеристики, зазначеної в (4.14), зазвичай для $K_{T0} = K_T (J_s = 0)$.

Номінальна потужність P_N відповідає номінальному обертаючому моменту. Регулятор швидкості є ПІД-регулятором (див. Рис. 4.5) з межами насичення, який обчислює необхідний крутний момент для збільшення (зменшення) швидкості. Максимальний крутний момент становить: $M_{\max} = \mu M_N$, де $\mu = 1,1 \div 1,2$.

Стратегія управління моментом полягає в заміні зовнішнього контуру зворотного зв'язку за швидкістю петлею контролю крутного моменту за допомогою функції розрахунку моменту (Рис. 4.6) з уставкою F_p , розраховується як похідна від стандартної функції:

$$F_p = g_{T0}(T_p). \quad (4.23)$$

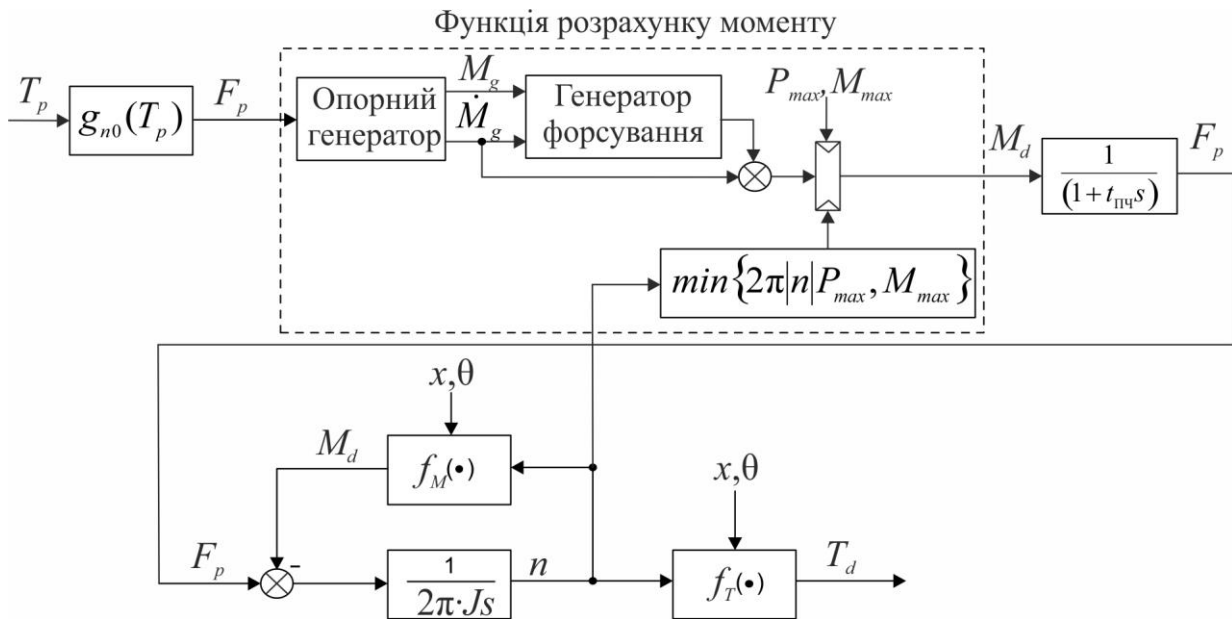


Рис. 4.6 Блок-схема регулятора моменту гвинта

Звідси після підстановки отримаємо

$$M_p = \rho \cdot D_p^5 \cdot K_{F0} \cdot |n| \cdot n, \quad (4.24)$$

де $K_{F0} = K_F (\lambda=0)$.

Згідно (4.14) і (4.24) відношення між осьовим упором і моментом має вигляд

$$M_p = \frac{D_p K_{F0}}{K_{T0}} T_p = g_{T0}(T_p). \quad (4.25)$$

Обмежені по максимуму значення M_{max} , P_{max} , тобто скориговані значення обертаючого моменту M_g і $\dot{M}_g$ (Рис. 4.6), визначаються на підставі функції розрахунку моменту гвинта (див. Рис. 4.7) і характеристик опорного генератора і генератора форсування при заданому T_p . Залежність обертаючого моменту від оборотів гвинта накладає обмеження на максимальну потужність, що враховується при визначенні перевантажувальної спроможності електродвигуна і ПЧ.

При цьому зона обмеження потужності зумовлена допустимою потужністю СОДГ і може змінюватися в залежності від його завантаження. Таким чином, обмеження потужності електроприводу ПП дозволяє уникнути знеструмлення СЕЕС.

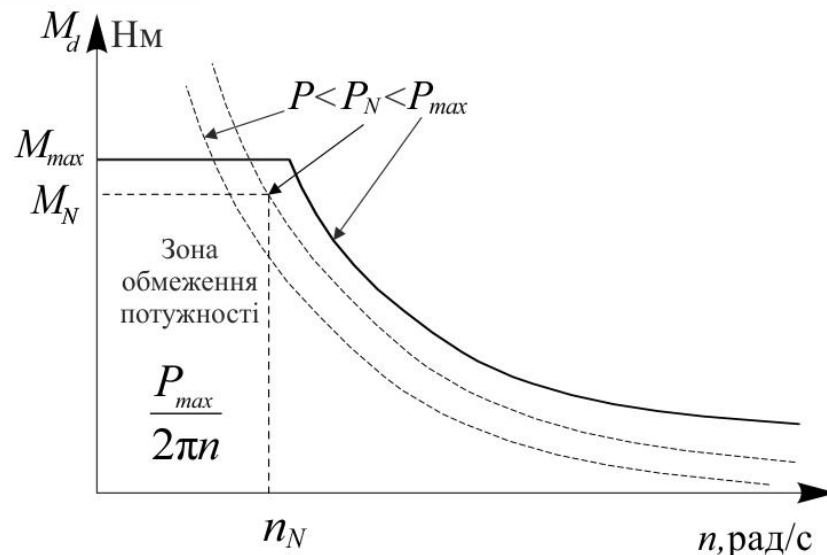


Рис. 4.7 Визначення обмеження максимального моменту

Альтернативною стратегією управління ПП з вентиляторної характеристикою на валу є управління на основі регулювання потужності. При заданому контурі управління обертаючим моментом величина упору замінюється відповідним значенням потужності P_p (Рис. 4.8). Використовуючи (4.22) і (4.24), знаходимо співвідношення між заданим осьовим упором і потужністю:

$$P_p = g_p(T_p) = \text{sgn}(T_p) \frac{2\pi \cdot K_{F0}}{\sqrt{\rho \cdot D_p \cdot K_{T0}^{3/2}}} |T_p|. \quad (4.26)$$

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 $\dot{P}_g$.

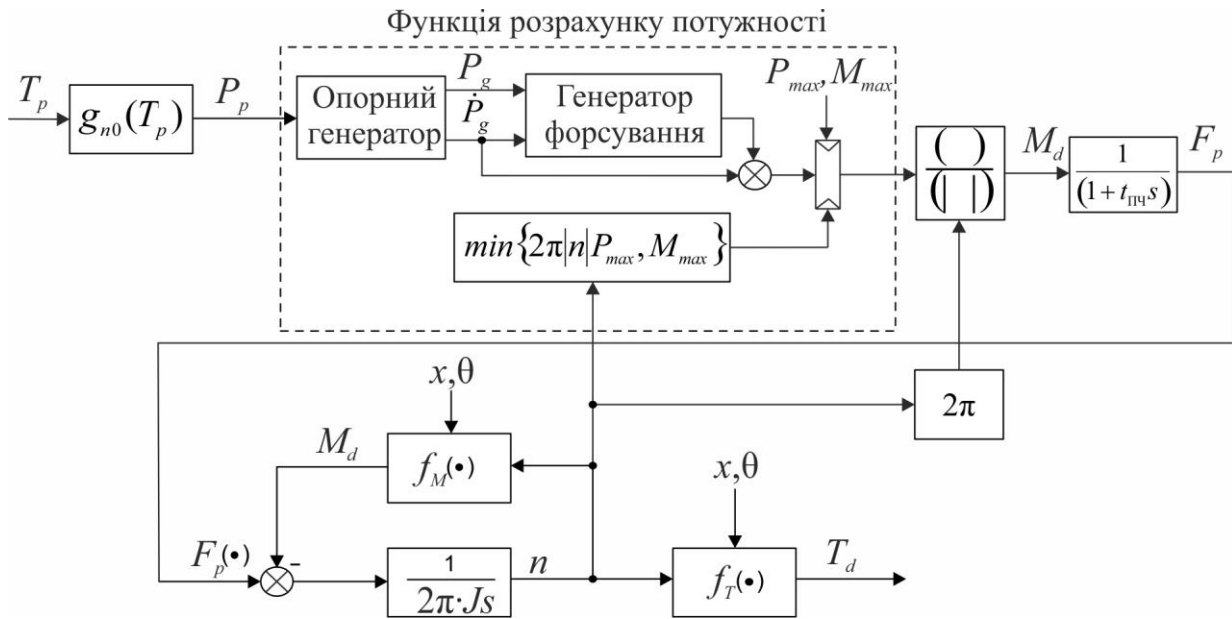


Рис. 4.8 Блок-схема регулятора потужності ПП

Для порівняльного аналізу різних схем управління необхідно визначити найбільш значимі властивості управління швидкістю, контролюючого моменту і управління потужністю. Управління кроком гвинта не вивчено, але для отримання об'єктивної картини необхідно аналізувати поведінку схем управління швидкістю. Припустимо, що швидкість обертання валу дорівнює заданій швидкості n_p в сталому режимі (див. Рис. 4.5).

Використовуючи (4.14), (4.18) і (4.22), запишемо залежність між фактичною тягою гвинта і заданою:

$$T_d = h_T(n, x, \theta)(1 - t_s) \frac{K_T}{K_{T0}} T_p = s_n(x, \theta) T_p. \quad (4.27)$$

Згідно зі схемою управління крутним моментом, представленою на Рис. 4.4, припустимо, що обертаючі моменти двигуна і гребного гвинта дорівнюють заданому зусиллю F_p в сталому режимі. Тому з урахуванням (4.14), (4.18), (4.22) і (4.24) отримуємо

$$T_d = \frac{h_T(n, x, \theta)(1-t)}{h_M(n, x, \theta)} \frac{K_{F0}}{K_F} \frac{K_T}{K_{T0}} T_p = s_M(n, x, \theta) T_p. \quad (4.28)$$

Для схеми управління потужністю, представленої на [Рис. 4.8](#), як правило, потужність дорівнює P_p в сталому режимі. Тому аналогічно, використовуючи (4.14) – (4.22), (4.24) і (4.26), отримуємо

$$T_d = \frac{h_T(n, x, \theta)(1-t)}{h_M^{2/3}(n, x, \theta)} \left(\frac{K_{F0}}{K_F} \frac{K_T}{K_{T0}} \right)^{2/3} \cdot T_p = s_P(n, x, \theta) T_p. \quad (4.29)$$

Дослідження енергетичних процесів при передачі потужності до рушіїв у СЕУ КПК при застосуванні всережимного регулятора [ПП](#) для судна типу *АНТС*, технічні характеристики якого представлені у додатку [Б.1](#), наведено у підрозділу [6.6](#).

4.5. Визначення принципів формування управління інваріантного до збурення з урахуванням ситуаційних чинників експлуатаційного режиму

Керуючі впливи δ_I ([4.12](#)), ([4.13](#)), що забезпечують адекватність процесів у СЕУ [КПК](#) при утриманні судном позиції, і для котрих сума значущих ознак типових ситуаційних чинників b_{ks} (підрозділ [4.3](#)) максимальна формуються згідно співвідношень ([4.26](#)), ([4.30](#)) і ([4.31](#)) ([Рис. 4.8](#)), а також критерію максимальної суми значущих ознак типових ситуаційних чинників b_{ks} ([4.11](#)) (підрозділ [4.3](#)).

Відповідно, множина, що враховує змінні модифікованого завдання управління, а також, коли $I = E_F \times I$ ([3.9](#)) і $\varphi = E_F \times \varphi$ ([3.10](#)) виконується. Наведені у [4.3](#) описи джерела і споживача є ідеалізованими математичними моделями і 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 $\varphi(t)$ [231].

Для споживачів, якими у даному випадку є ГЕД ПП, що працюють, наприклад, на гіперболі постійної потужності (Рис. 4.9), залежними від збурення по моменту на валу координатами будуть частота обертання і струм, що споживається ГЕД ПП (4.20), (4.22), за умовою, що залежність (4.26) виконується.

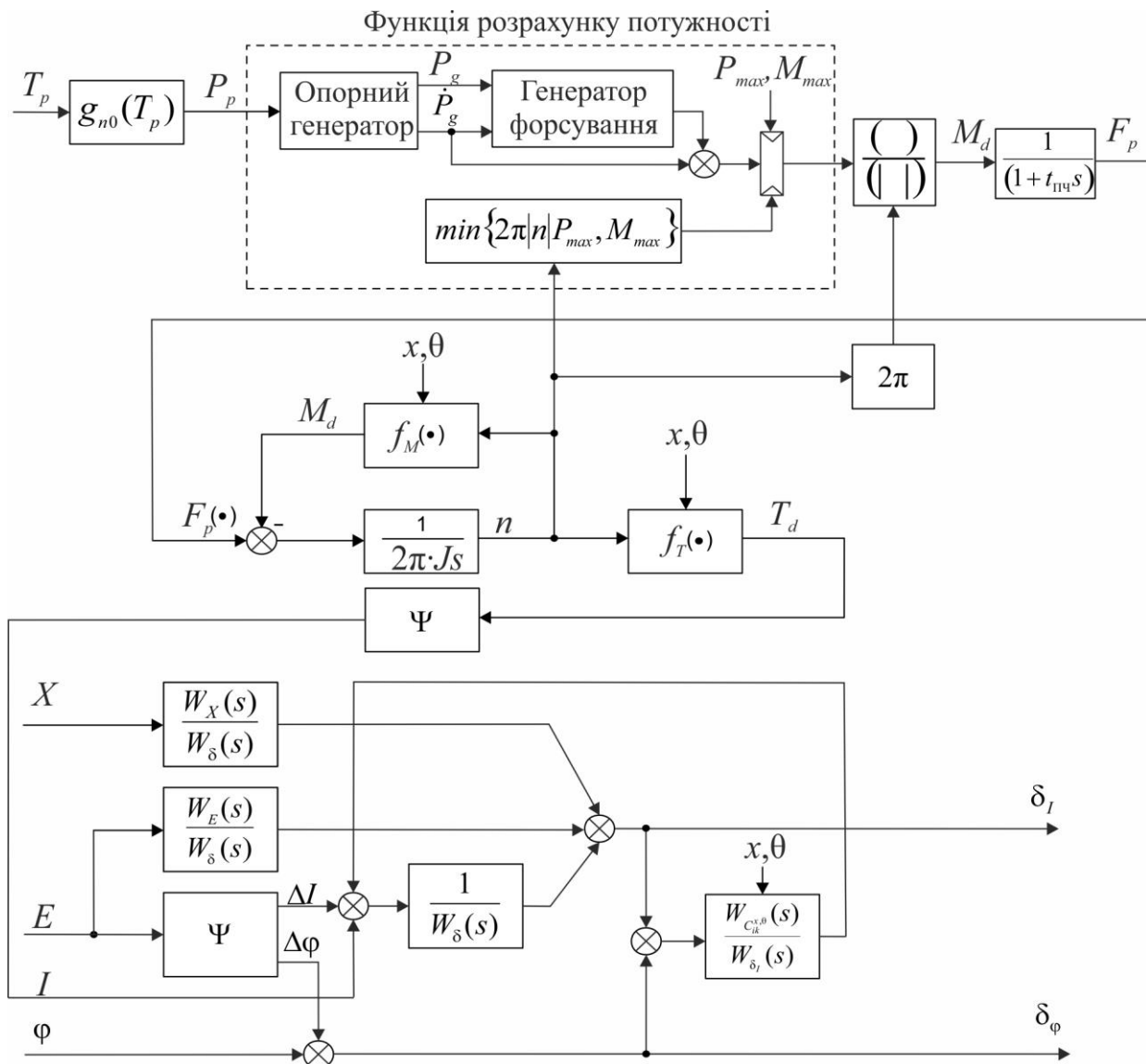


Рис. 4.9 Структурна схема з'єднання передавальних функцій для управління ПП на гіперболі постійної потужності СЕУ КПК по (4.30)

[До змісту](#)

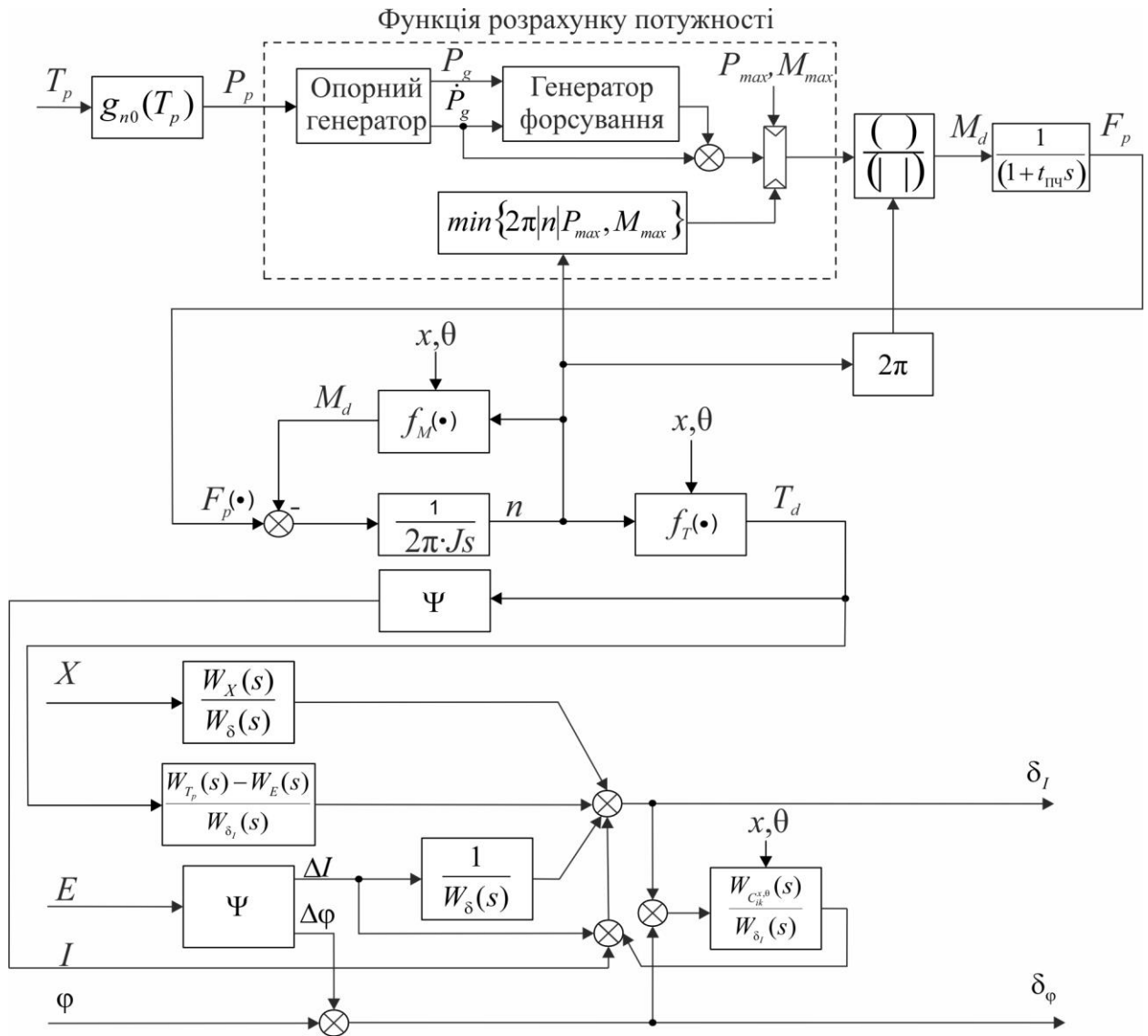


Рис. 4.10 Структурна схема з'єднання передавальних функцій для інваріантного до основного збурення управління **ПП** на гіперболі постійної потужності СЕУ **КПК** по (4.31)

Тоді, враховуючи усе вищезазначене, керуючий вплив δ_I , що забезпечує адекватність процесів, повинно бути формовано відповідно співвідношенню:

$$\delta_I = \frac{\sum_{i=1}^{b_{ks}} C_{ik}^{x,\theta}(p) \left(\frac{1}{W_{\delta_I}(s)} \cdot T_d(s) - \frac{W_{T_p}(s)}{W_{\delta_I}(s)} \cdot T_p(s) - \frac{W_E(s)}{W_{\delta_I}(s)} \cdot E(s) \right)}{1 - \frac{W_{C_{ik}^{x,\theta}}(s)}{W_{\delta_I}(s)} \cdot C_{ik}^{x,\theta}(s)}, \quad (4.30)$$

яке отримано у результаті спільного рішення (4.12), (4.13) і (4.26). З метою надання системі керування розподіленням електроенергії СЕУ КПК властивостей інваріантності по каналу збурення, з (4.12), (4.13) і (4.30) випливає (Рис. 4.10), що:

$$\delta_I = \frac{\sum_{i=1}^{b_{ks}} C_{ik}^{x,\theta}(p) \left(-\frac{W_{T_p}(s)}{W_{\delta_I}(s)} \cdot T_p(s) + \frac{W_{T_p}(s) - W_E(s)}{W_{\delta_I}(s)} \cdot E(s) \right)}{1 - \frac{W_{C_{ik}^{x,\theta}}(s)}{W_{\delta_I}(s)} \cdot C_{ik}^{x,\theta}(s)}. \quad (4.31)$$

4.6. Удосконалення стратегії керування багатомасовими електромеханічними системами

Рух вантажу характеризується перехідними режимами, що залежать від поведінки КПК, тому для його опису, використані закони керування механізмом підйому з плавно змінним прискоренням. Ідентифікація САК ВПМ як стаціонарної можливо при припущенні, що маса вантажу незмінна продовж його переміщення, тобто накладаються вимоги то загального часу ВРП.

Реальне коливання вантажу являє собою досить складний процес, який для практичних розрахунків може бути замінений гармонійним коливальним рухом. Швидкість вертикального переміщення вантажу досить велика. При цьому треба враховувати, що судно здійснює коливальні рухи з частотою, як правило, нижчою, ніж частота коливання вантажу. У результаті швидкість переміщення троса буде дорівнює алгебраїчній сумі швидкостей переміщення вантажу і точки закріплення троса.

– M – асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором (номінальна потужність, лінійна напруга, частота, активні опори та індуктивності статорної і роторної обмоток, взаємна індуктивність, момент інерції, число пар полюсів);

– M_s – блок завдання навантаження (величина статичного моменту);

– $VS1...VS6$ – тиристори тиристорного регулятора напруги (ТРН), включені по два в кожен фазу і з'єднані зустрічно-паралельно (опір у відкритому і закритому станах, падіння напруги на тиристорі);

– AVS – система імпульсно-фазового керування (СІФК) (частота мережі, ширина керуючих імпульсів);

– ST – блок дозволу (нульовий сигнал) або заборони (єдиничний) на роботу СІФК;

– Sub – підсистема формування необхідного діапазону кутів управління тиристорами ТРН (мінімальне і максимальне значення);

– AC – трифазна мережа живлення змінного струму (лінійна напруга, частота, активний опір і індуктивність джерела);

– QF – автоматичний вимикач (опір в замкнутому і розімкнутому станах);

– AQF – блок управління автоматом (включення єдиничним сигналом, відключення – нульовим);

– UV – блок датчиків напруги мережі живлення для синхронізації роботи СІФК (лінійні або фазні напруги);

– LF – трифазний струмообмежувальний реактор для забезпечення електромагнітної сумісності електропривода з мережею (активний опір і індуктивність);

– ER – блок завдання необхідної швидкості (величина сигналу і час його подачі);

– AI – задатчик інтенсивності для обмеження прискорення приводу (темپ наростання сигналу заданої швидкості);

[До змісту](#)

- *AR* – ПД-регулятор швидкості (пропорційна, інтегральна і диференціальна складові, обмеження вихідного сигналу);
- *UR* – датчик швидкості для формування негативного зворотного зв'язку (коефіцієнт передачі);
- *MMD* – блок виділення контрольованих параметрів (швидкість і момент двигуна);
- *SRS* – блок оптимізації параметрів ПД-регулятора швидкості (необхідні параметри перехідного процесу);
- *Scope* – осцилограф для візуалізації контрольованих параметрів (число входів, час моделювання);
- *To Workspace* – блок виведення значень швидкості в робочу область для подальшої обробки (позначення контрольованого параметра);
- *SW* – ключ перемикання режимів роботи моделі (числове значення уставки спрацьовування);
- *ASW* – блок управління ключем (одиничний сигнал комутує верхній вхід, нульовий – нижній).

Для обробки дискретних чисельних значень експериментальних швидкісних характеристик, взятих з робочої області системи *MatLab*, та визначення коефіцієнтів передавальних функцій САК, використані інструментальні засоби пакета *Labview*.

У нашому випадку отримані наступні величини коефіцієнтів:

- $b_0 = 6,2334e^9$, $a_1 = 8726,8$, $a_2 = 0,98763e^7$, $a_3 = 4,31234e^8$ – при апроксимації перехідної характеристик третього порядку;
- $K = 18$, $a_0 = 8,345e^{-7}$, $a_1 = 0,04567$ – в разі апроксимації перехідною характеристикою другого порядку.

Наступним кроком дослідження є знаходження залежностей для обчислення складових ПД-регулятора швидкості безградієнтним методом Поувелла в якому обчислення похідних виконується за спрощеними різницеvim формулами, що забезпечує підвищену швидкість оптимізації. Відповідні формули можна отримати, використовуючи класичну методику,

аналогічно системам з підлеглим регулюванням координат, враховуючи залежності (4.6).

Для третього порядку наближено, нехтуючи складовою полінома знаменника третього ступеня:

$$K_p = \frac{a_2}{a_c T_\mu b_0 K_C}, K_I = \frac{a_3}{a_c T_\mu b_0 K_C}, K_D = \frac{a_1}{a_c T_\mu b_0 K_C},$$

$$K_p = \frac{a_1}{a_c T_\mu K K_C}, K_I = \frac{1}{a_c T_\mu K K_C}, K_D = \frac{a_0}{a_c T_\mu K K_C}. \quad (4.32)$$

У наведених виразах:

– K_C – коефіцієнт передачі негативного зворотного зв'язку по швидкості;

– T_μ – постійна часу, що враховує швидкодію тиристорів ТРН;

– a_c – налагоджувальний параметр контуру швидкості (стандартне значення дорівнює двом).

Обчислені складові ПД-регулятора швидкості вводяться в вікно налаштувань параметрів блоку AR. При моделюванні замкнутої системи ТРН-АД ключом SW комутуємо нижній вхід.

Для отримання результатів моделювання без оптимізації параметрів регулятора необхідно запускати процес кнопкою основного вікна моделі.

Основними вимогами до електроприводів вантажопідйомних механізмів, виходячи з викладеного аналізу, є: забезпечення початку підйому без неприпустимого удару в тросі, забезпечення натягу троса до моменту підйому вантажу, виключення повторного удару вантажу судном, що піднімається. Виконання цих вимог може бути здійснено двома способами.

Перший спосіб. Електропривод має дві основні швидкості: малу для натягування троса на початку підйому (0,25 – 0,35 м/с) і велику для підйому вантажу, яка дорівнює середній швидкості підйому судна у напрямку підйому

[До змісту](#)

вантажу, або перевершує її. Велика швидкість становить 1,5 – 2 м/с в залежності від довжини хвилі коливання судна.

Перехід електроприводу на велику швидкість система управління повинна здійснювати в момент, коли вантаж опиниться у нижній точці нахилу судна при натягнутому тросі. При цьому вантаж починає підніматися разом із початком підйому судна і, після того як слабина троса буде обрана, продовжує підйом з постійною швидкістю до моменту доки підйом судна у напрямку руху вантажу не закінчиться та, якщо виконується умова

$$v_l \geq 1,3 \frac{h_0}{T_l}, \quad (4.33)$$

де v_l – швидкість руху вантажу, при чому

$$1,3 \frac{h_0}{T_l} \approx 1.$$

Діапазон регулювання швидкостей для вантажопідйомних механізмів, що працюють за даним способом, має становити $1/6 \div 1/8$. Очевидно, що такі механізми доцільно застосовувати для вантажів обмеженою маси (не більше 15 т), оскільки із збільшенням потужності електроприводу суттєво зростає інерційність системи.

Другий спосіб. Вантажний механізм має спеціальну конструкцію з канатним або механічним диференціалом і двома двигунами. Один з двигунів є тяговим, а інший – швидкісним. Тяговий двигун забезпечує вибирання первісної слабину троса зі швидкістю $0,2 \div 0,25$ м/с, після чого він переключається на максимальну швидкість. Одночасно включається швидкісний двигун, пов'язаний з механізмом через муфту обгону і храповий пристрій.

Швидкісний двигун повинен забезпечити вибирання троса зі швидкістю не менш $2h_0/T_l - 0,5$ м/с і час розгону при вибиранні троса вхолосту не більше $T_l/10$. Після виходу на верхню точку підйому судна швидкісний двигун зупиняється, а тяговий продовжує працювати на

максимальній швидкості. Ця швидкість повинна складати не менше 0,5 м/с, щоб уникнути динамічного удару навіть у випадку, коли висота підйому судна буде на 40% вище попередньої висоти.

Таким чином, діапазон регулювання швидкостей в даній системі становить $1/2 \div 1/3$, а швидкісний двигун може виконуватися без пристрою регулювання швидкості. Система зі швидкісним двигуном може застосовуватися для підйому вантажів будь-якої маси, аж до декількох десятків тон. Недоліком таких систем є складність механізму і невисока надійність внаслідок того, що при несправності розвантажувального пристрою швидкісного двигуна можливе падіння вантажу.

Судна під час вантажно-розвантажувальних робіт відчують подовжню і поперечну хитавицю, період і амплітуда якої залежать як від ступеню хвилювання, так і від конструктивних особливостей судна. Операції з перевантаження при коливаннях робляться лише при їх помірних параметрах.

Сума вертикальних переміщень судна при цьому знаходиться в межах $2 \div 5$ м при періоді хитавиці $6 \div 12$ с. Умовою безпечної посадки вантажу або його перевантаження є підтримка постійної відстані H_0 між місцем навантажування і вантажем при відключеному механізмі підйому. Рух вантажу щодо палуби судна описується складною формулою:

$$h_0 = f(h_1, h_2, h_3, t_1, t_2, t_3, \varphi_{max}, \varphi, \varphi_0, l), \quad (4.34)$$

де: h_1, h_2, h_3 – відповідно амплітуди вертикального переміщення судна і відстань по висоті від центру тяжіння вантажно-підйомного механізму до центра тяжіння судна;

– t_1, t_2, t_3 – періоди відповідних орбітальних рухів судна;

– $\varphi_{max}, \varphi, \varphi_0$ – кути відповідно крену судна з утримувачем вантажу, нахилу утримувача і зсуву по фазі хитавиці судна;

[До змісту](#)

– l – довжина вильоту утримувача вантажу над бортом судна.

При такому складному русі вантажу щодо палуби судна для підтримання сталості h_0 механізм доповнюється спеціальним компенсуючим пристроєм, оскільки забезпечити стеження за допомогою електроприводу практично неможливо. Введення зазначених пристроїв дозволяє застосовувати для розглянутих механізмів звичайні електроприводи, доповнені необхідними пристроями кінцевої захисту та блокування, що виключають переміщення вантажу в небезпечній зоні при відсутності стеження. Існує кілька способів надійної компенсації взаємного переміщення судна і вантажу. Спільною особливістю цих способів є застосування механічного силового датчика автоматичного устрою.

4.7. Експериментальні дослідження методів визначення навантажень за результатами модельних випробувань

На [Рис. 4.12](#) зображені діаграми швидкості електродвигуна при використанні обчислених значень коефіцієнтів ПД-регулятора для стандартної настройки по ідентифікованим передавальним функціям третього (рис. 4, *a*) і другого (рис. 4, *b*) порядків.

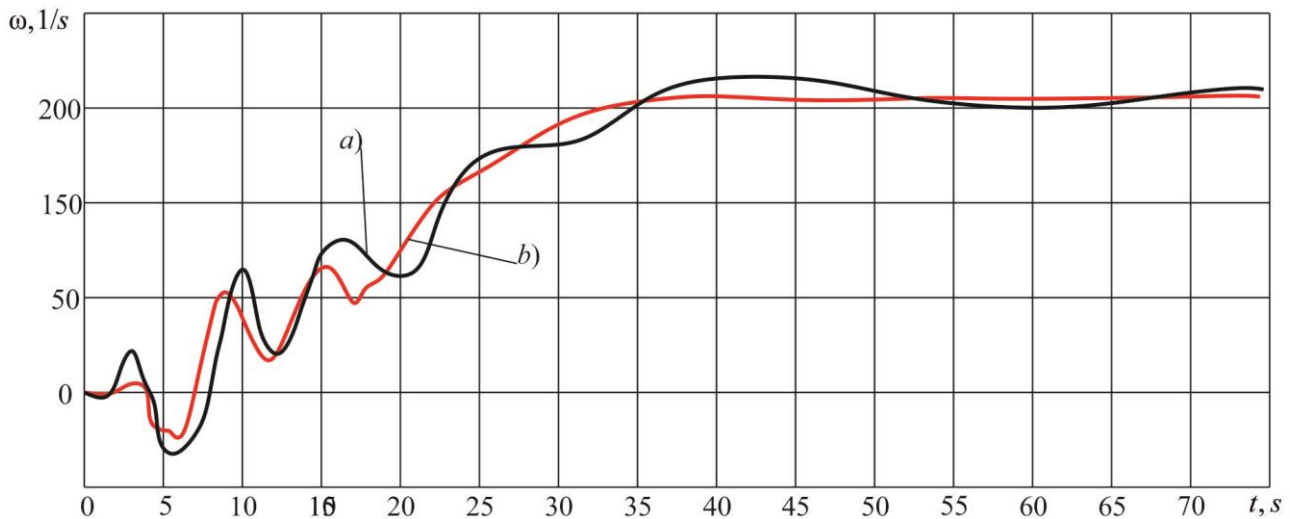


Рис. 4.12 Діаграми швидкості електродвигуна при апроксимації системи передавальними функціями другого (a) і третього (b) порядків.

Щоб скорегувати складові ПД-регуляторів шляхом оптимізації перехідних процесів потрібно запускати модель кнопкою вікна налаштувань блоку оптимізації SRS (Рис. 4.11). Після оптимізації отримаємо наступні результати (Рис. 4.13, a, b).

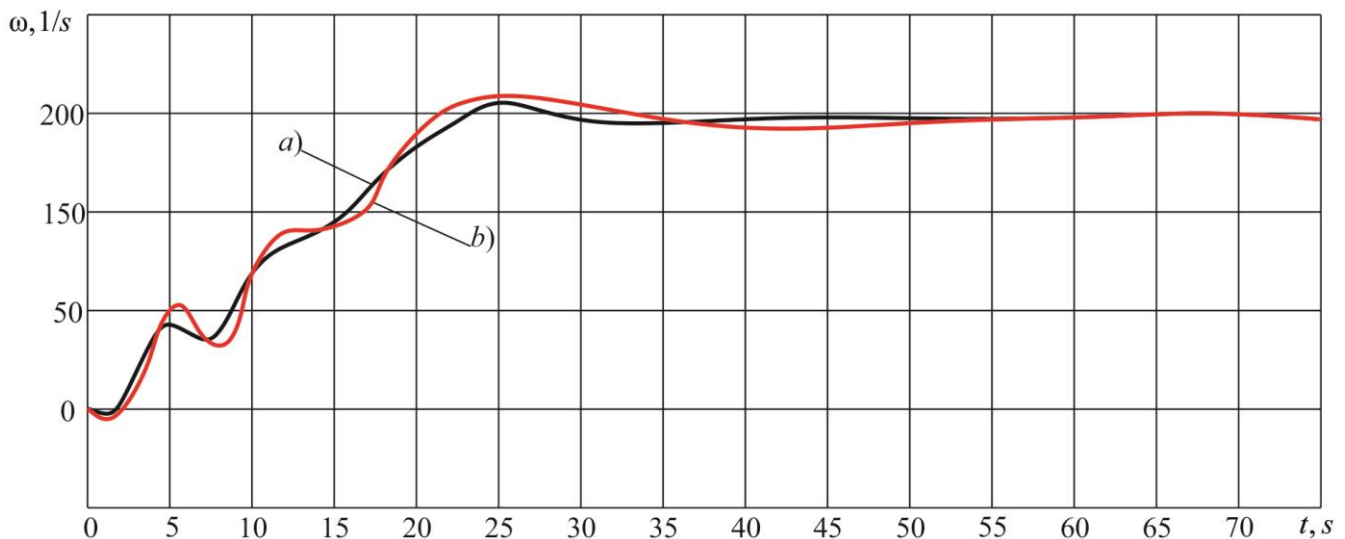


Рис. 4.13 Діаграми швидкості двигуна при оптимізації перехідного процесу по швидкості для другого (a) і третього (b) порядків.

З метою усунення коливальних процесів у електроприводі за допомогою коригування алгоритмів керування, що забезпечують усталеність процесу переміщення вантажу та для підтвердження теоретичної частини проводились експериментальні дослідження на лабораторній установці, принципову схему якої показано на [Рис. 4.14](#), а зовнішній вигляд на [Рис. 4.15](#).

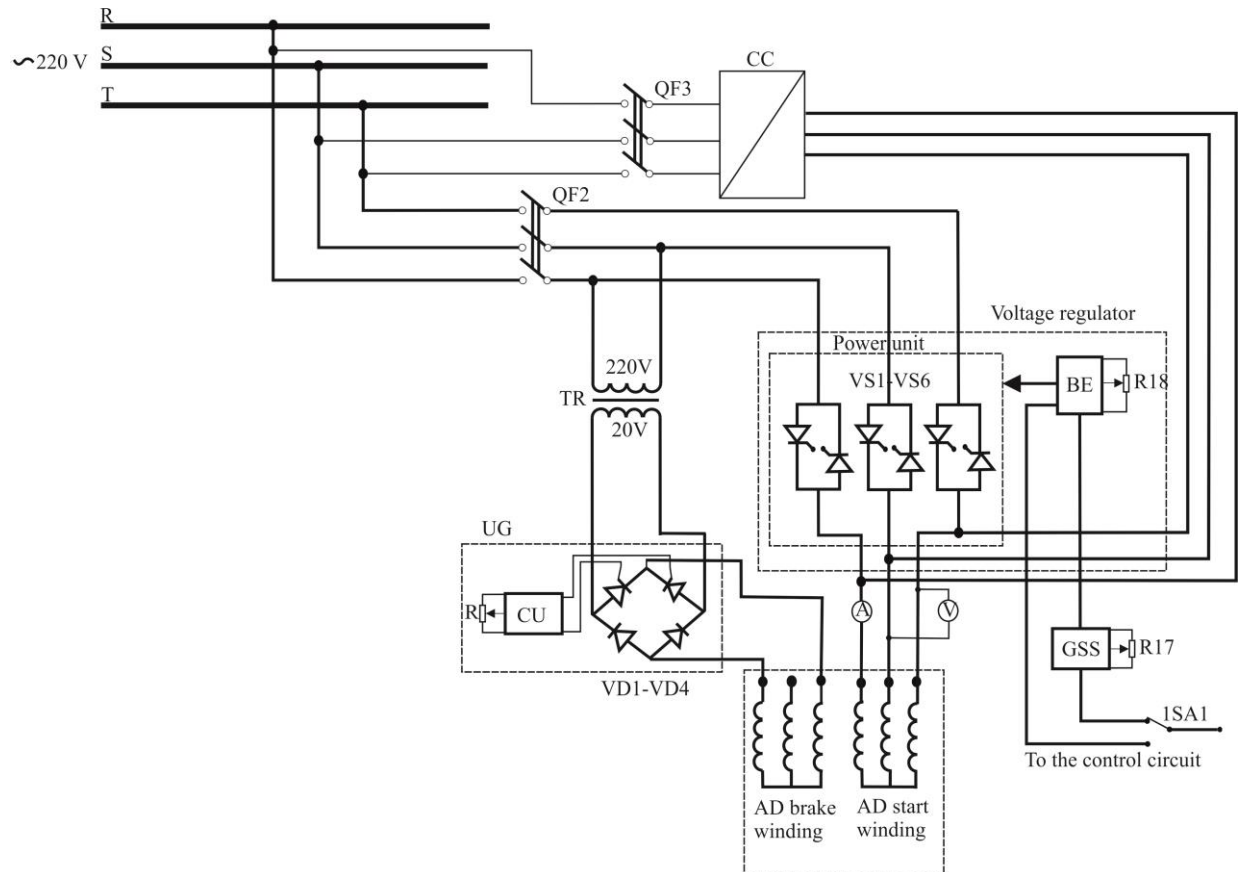


Рис. 4.14 Принципова схема лабораторної установки: *QF2, QF3* – автоматичні вимикачі, *CC* – ЧП; АД – двообмотковий асинхронний двигун; *TR* – понижуючий трансформатор; *BE* – блок електроніки; *GSS* – формувач пускового сигналу; *UG* – випрямляч; *VD1 – VD4* – випрямляючі діоди для живлення гальмівної обмотки; *VS1 – VS6* – силові тиристори; *R* – резистор завдання гальмівного моменту; *R18* – резистор завдання напруги на обмотках АД; *1SA1* – перемикач способів управління.



Рис. 4.15 Зовнішній вигляд лабораторної установки: 1 – ЧП; 2 – двохобмотковий АД; 3 – осцилограф; 4 – датчик струму; 5 – регулювання струму навантаження.

На [Рис. 4.16](#), [Рис. 4.17](#) показані графіки перехідних процесів до та після оптимізації законів керування електроприводом з урахуванням вище викладеного теоретичного матеріалу.

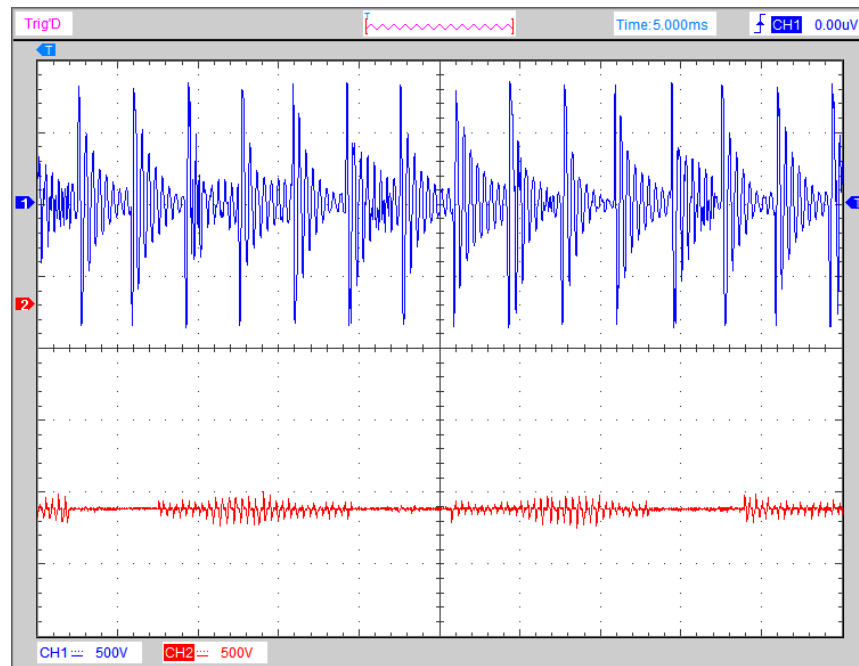


Рис. 4.16 Графіки частоти обертання та струму АД до оптимізації

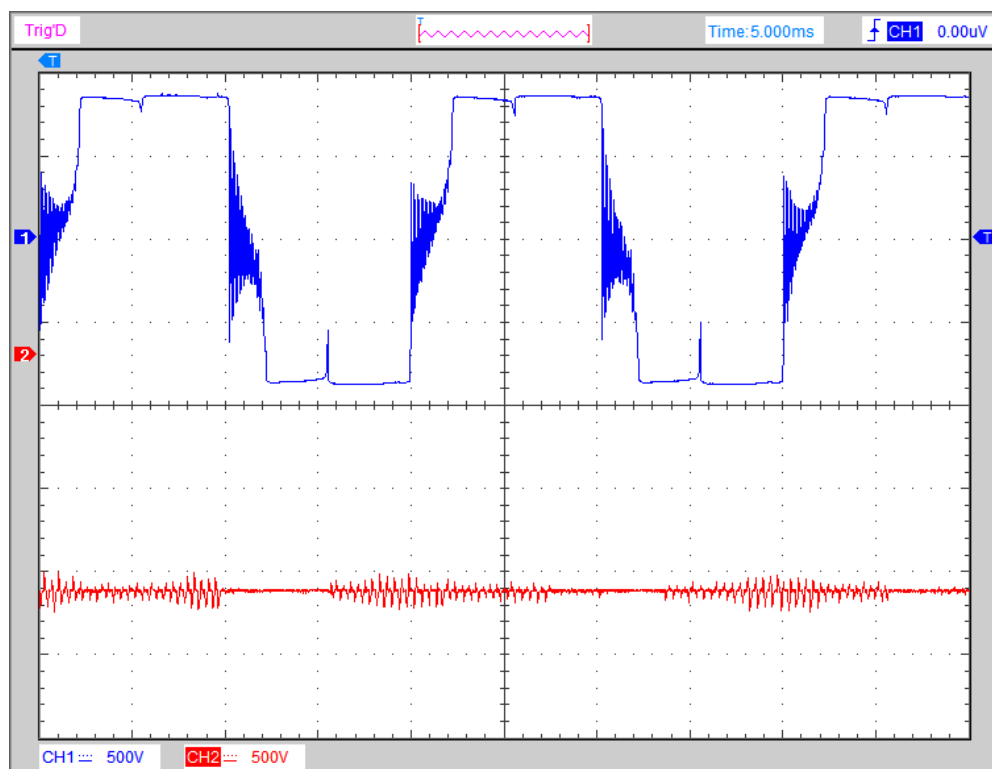


Рис. 4.17 Графіки частоти обертання та струму АД після оптимізації.

Результати математичного моделювання в *MatLab Simulink* та експериментальні дослідження на лабораторному обладнанні підтвердили основні започатковані теоретичні положення.

4.8. Висновки до розділу

У рамках вирішення другої головної задачі отримало подальший розвиток розробка методів підвищення ефективності експлуатації СЕУ КПК та їх функціональних систем і обладнання.

На основі системного підходу з урахуванням технічних характеристик СЕУ КПК багатоцільового судна, що динамічно позиціонує, та існуючих обмежень по потужності і моменту на валу, а також різних стратегій управління ПП вперше синтезовано стратегію всережимного регулятора оборотів, яка відрізняється від подібних тим, що дозволяє автоматично переходити регулятору з одного режиму роботи в іншій залежно від експлуатаційних умов.

Розроблено математичні моделі, передавальні функції і блок-схеми замкнених систем регулювання частоти обертання, моменту і потужності ПП, що залежать від динамічних характеристик судна, яке перебуває в умовах нестабільності роботи гвинта і довкілля.

Запропонована стратегія всережимного регулятора 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.

Набуло подальшого розвитку дослідження ефективності функціонування систем керування (СК) СЕУ КПК. Вперше запропоновано 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, а також різних стратегій управління ПП.

Обмеження навантаження на ПП для зменшення зносу з одночасним підвищенням швидкодії системи *DP* забезпечується перерозподілом упорів між ПП до менш навантажених з них і може працювати незалежно від системи розподілу тяги. Іншим рішенням є зменшення граничного навантаження у складі алгоритму розподілу тяги системи *DP*.

Критерії оптимізації системи керування вантажопідйомним електроприводом застосовано шляхом математичного опису його динаміки диференціальними рівняннями з розрахунковими коефіцієнтами, що є похідними від функцій змінних станів.

Отримані експериментальні залежності коефіцієнтів рівнянь руху динамічного об'єкта під дією збурюючих сил в координатній площині дозволили параметризувати характеристичні рівняння до вигляду, що забезпечують рішення задачі усталеності моменту на валу електродвигуна ВПМ.

Розроблена функціональна схема САК дозволяє усунути аперіодичні складові в законі керування із дотриманням критеріїв стійкості і якості перехідних процесів за допомогою застосування всережимністю регулятора координатної характеристики з форсуванням здолання зони нечутливості та підвищення стійкості електроприводу як динамічного об'єкта.

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

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.

РОЗДІЛ 5. МЕТОДОЛОГІЯ ПОБУДОВИ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИХ СТРАТЕГІЙ УПРАВЛІННЯ РОЗПОДІЛОМ ПОТУЖНОСТІ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ КОМБІНОВАНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ

5.1. Забезпечення динамічних показників якості процесів передачі енергії в умовах різновекторних навантажень

В залежності від типу [КПК](#) використовується той чи інший з трьох відомих способів його динамічного утримання над точкою буріння, в залежності від чого застосовується та чи інша система управління розподілу потужності ([PMS](#)). СЕУ КПК зазвичай складається з $6 \div 10$ потужних двигунів [ПП](#) різноманітних конструкцій в залежності від розташування на судні для позиціонування, які живляться від $4 \div 6$ високовольтних СОДГ.

Структурну схему СЕУ КПК бурового судна наведено на [Рис. Б.28](#) ([Додаток Ж](#)), тактико-технічні характеристики у додатку [Б.2](#), а принципова однолінійна схема на ([Рис. Б.28](#)).

СОДГ підключаються до шин як найменш двох головних розподільних щитів (ГРЩ), з'єднаних між собою за допомогою інтегрального вимикача. Функції [PMS](#) реалізовані в трьох незалежних системах управління, а саме: система динамічного позиціонування (англ. *Dynamic Positioning* – [DP](#)), свердління постійного струму (англ. *drilling DC power*) і системи управління даними (англ. *Data Management Systems* – [DMS](#)).

У таких проектах функції управління живленням кожної системи працюють самостійно і мають спеціальні входи для датчиків з основних електричних мереж [[25](#), [47](#), [60](#), [78](#), [104](#), [208](#)].

Системи розраховують загальну потужність, враховуючі загальне навантаження. Якщо загальне завантаження системи перевищує певні межі,

встановлені заздалегідь, вони зменшуються. Система також знизить навантаження, якщо навантаження на будь-який окремий СОДГ перевищить попередньо встановлену межу. Така структура дозволяє не перевищувати навантаження на окремий СОДГ навіть під час впливу зворотної потужності від будь-якого СОДГ або відмови компонента датчика.

У разі перевантаження, системи *DP* будуть зменшувати потребу потужності в заздалегідь визначених межах, знижуючи тим самим навантаження на ГРЩ, а система *DMS* видає сигнал на запуск резерву, щоб збільшити основну пропускну здатність ГРЩ.

На сучасному етапі технічної експлуатації подібних систем стоять наступні проблеми:

- дотримання систем *DP* вимогам менеджменту якості (англ. *Failure modes and effects analysis – FMEA*), з якими стикаються на етапі експлуатації [105, 110];

- уніфікація *PMS* у комбінації функцій по відношенню до інших подібних [92, 212];

- незалежність складових систем *PMS* одна від одної навіть до рівня датчиків [113, 131, 163];

- не тільки зменшення потужності в розрахунку на загальне розрахункове навантаження, але також і навантаження окремого СОДГ [57, 117, 149];

- відповідність системи умовам збільшення навантаження з точки зору достатності для забезпечення нормальної роботи в залежності від будь-якої ненормального режиму і не перевантажування суднової електроенергетичної системи (СЕЕС) взагалі [4, 26, 128, 166, 171].

5.2. Визначення критеріїв застосування стратегій управління енергоспоживанням

Система керування (СК) гібридним [ДЕПК](#) розподіляє потужність між [СГЕ](#), [СНЕ](#) і СЕЕС відповідно до обраної стратегії управління енергоспоживанням:

- із контролем за станом [СОДГ](#) (англ. *State machine control strategy – SMCS*);
- з *PI* управлінням (класична) та регулюванням ступеню заряду батарей (англ. *State-of-Charge – SOC*) [СНЕ](#) (англ. *Classical PI control strategy with SOC's regulation – CPICS*);
- із контролем частоти і стану [СОДГ](#) та регулюванням ступеню заряду батарей [СНЕ](#) (англ. *Frequency decoupling and state machine control strategy with SOC's regulation – FDSMCS*);
- за критерієм мінімуму споживання електроенергії (англ. *Equivalent consumption minimization strategy – ECMS*);
- за критерієм отримання максимуму альтернативної енергії та регулюванням ступеню заряду батарей [СНЕ](#) (англ. *External energy maximization strategy with SOC's regulation – EEMS*).

Основне призначення [СГЕ](#) як [АДЕ](#) у наведеному гібридному [ДЕПК](#) – ввід в дію СЕЕС після знеструмлення і підтримка потужності у маневрових режимах роботи судна, одним з яких є режим [DP](#). В залежності від обраної стратегії управління енергоспоживанням, СК регулює потужність кожного джерела енергії у відповідності до заданих вихідної напруги і максимального струму [СГЕ](#), [СНЕ](#) і силових перетворювачів (ППН, ІН).

Недоліками наведеної функціональної схеми гібридного [ДЕПК](#) є:

- неузгодженість параметрів [СОДГ](#) з іншими компонентами, що призводить до нерівномірного регулювання магнітних потоків і амплітуд напруг, що викликає додаткове підвищення пульсацій напруги на виході конвертерів і виникнення зрівняльних струмів при синхронній роботі;

- підвищений рівень гармонік в струмі споживачів енергії;
- знижена надійність, економічність, підвищені габарити і маса, які виникають за рахунок застосування елементів підвищеної потужності і комплектів обладнання до них;
- відсутність можливості симетрування трифазної системи напруг живлення при нерівномірному завантаженні фаз.

Аналіз [Рис. 1.3](#) дозволяє зробити висновок, що управління гібридним ДЕПК є дуже складним процесом, який потребує урахування великої кількості чинників енергетичних та експлуатаційних складових. Наприклад, такий компонент гібридного ДЕПК, як СНЕ, базується на застосуванні [літій-іонних акумуляторних батарей](#) (ЛІАБ, англ. *Lithium-ion batteries* – LIB) [150].

Різноманіття режимів СЕУ [КПК](#) при застосуванні ЛІАБ визначає не тільки більшу номенклатуру вироблених ємностей і типорозмірів акумуляторів, а й широкі діапазони напруг (від семи до декількох сотень вольт) батарей на їх основі, необхідних для реалізації певних потужних, енергетичних і експлуатаційних характеристик СНЕ [62, 116].

При наявності небезпечних зовнішніх впливів на СНЕ їх конструктивне виконання ускладнюється, також як і в разі потужних батарей (особливо для гібридних ДЕПК), які потребують додаткового повітряного або рідинного охолодження [218].

На [Рис. 2.1](#) представлена структурна функціональна схема гібридного ДЕПК з фрагментацією СНЕ.

При проектуванні гібридних ДЕПК загальними вимогами для всіх [ЛІАБ](#) є забезпечення безпеки і зручності експлуатації, а також досягнення при циклічному режимі роботи повного розряду всіх АБ, а не робота за графіком найбільш слабкого елемента. Це досягається введенням до складу СНЕ селективної СК (англ. *Battery Management System* – BMS) акумуляторними модульними збірками (АМЗ), що здійснює моніторинг

стану і захист батареї від виникнення небезпечних режимів роботи і надає інформацію про її основні параметри [148, 192, 220].

З огляду на високу потужність і великий запас енергії, а також пожеже-небезпечність застосовуваного в ЛАБ електроліту, основним завданням СК АМЗ можна вважати захист АБ при виникненні небезпечних режимів роботи. До них, перш за все, відносяться струмові перевантаження і короткі замикання силових ланцюгів, перегрів АБ, перезарядка і надмірний розряд ЛАБ.

Захист від виникнення небезпечних режимів роботи здійснюється шляхом нівелювання розбалансу напруг ЛАБ і формування керуючих сигналів (КС) для зміни режиму роботи зовнішніх пристроїв або для відключення АБ від зовнішніх силових ланцюгів за допомогою комутаційної апаратури, яка конструктивно розміщується як у складі АБ, так і поза ними [58, 82].

З огляду на вищесказане, можна зробити висновок, що розвиток ДЕПК потребує додаткових досліджень в області удосконалення енергетичних процесів, пов'язаних із застосуванням у ДЕПК альтернативних джерел енергії. Останні потребують розробки сучасних локальних СК з точки зору їх інтеграції у СК гібридними ДЕПК.

5.3. Методика створення математичних моделей електроенергетичних систем з багатоштинними конструкціями

Залежно від точки підключення, просторовий вектор споживаного ГЕД (АД або СД) струму буде обертатися 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 (Рис. 5.1).

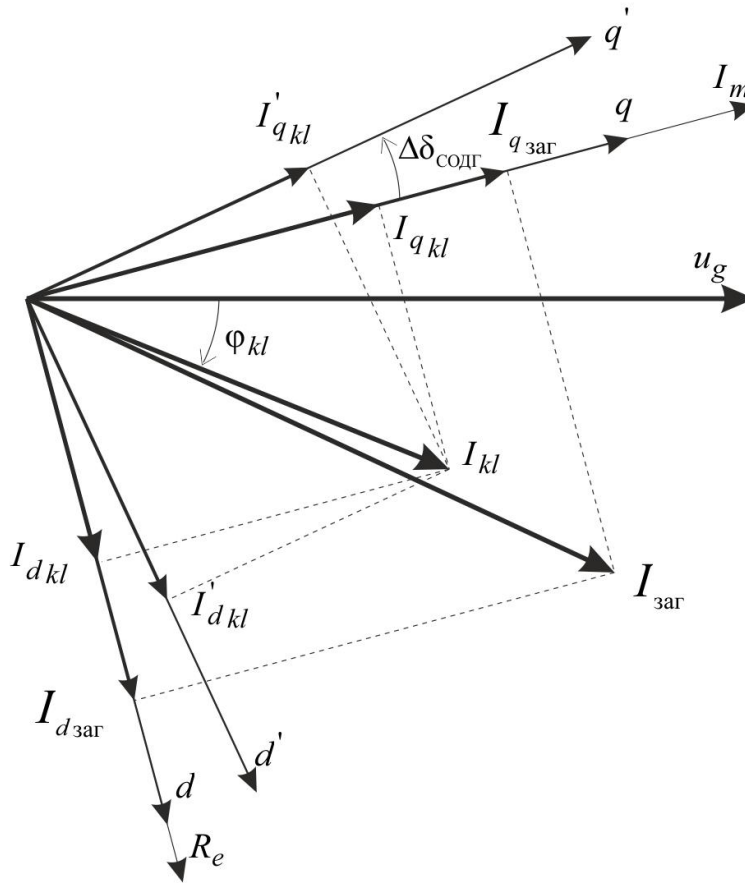


Рис. 5.1 Векторна діаграма для ділянки kl (k, l – натуральне число) високовольтної шини із підключеними до неї АД і СОДГ: u_g – напруга на шинах, в. о.; $I_{\text{заг}}$ – загальний споживаний струм АД, в. о.; $\Delta\delta_{\text{СОДГ}}$ – кут навантаження; φ_{kl} – фаза струму статора АД.

Рівняння моделі одного СОДГ, підключеного до шин, можна описати системою рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{\Psi}}{dt} = (W(n) + FX^{-1})\bar{\Psi} + Nu_g + gu_f \\ \frac{dn}{dt} = \frac{1}{t}(t_{m_содг} - \bar{\Psi}^t(M^tKM)X^{-1}\bar{\Psi}) \\ \Delta \frac{d\delta_{\text{СОДГ}}}{dt} = \omega_N(n - n_1), \end{cases} \quad (5.1)$$

- де:
- $\bar{\Psi}$ – вектор потокозчеплення обмотки статора;
 - u_f – напруга збудження, в. о.;
 - n – частота обертання, $[c^{-1}]$ валу генератору, в. о.;
 - 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 обмоток статора, в. о.;
 - $k_{\mu d}, k_{\mu q}, k_{\mu f}$ – повздовжня і поперечна складові значення коефіцієнту насичення демпферної і статорної обмоток СОДГ і обмотки збудження;
 - μ_d, μ_f – коефіцієнти взаємоіндукції між обмоткою статора і демпферною, між обмоткою збудження и демпферною.

$$W(n) = \begin{bmatrix} 0 & \omega_N n & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_N n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad N = \begin{bmatrix} \omega_N & 0 \\ 0 & \omega_N \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (5.2)$$

$$F = \begin{bmatrix} \omega_N (r_{ss} + r_{kl}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_N (r_{ss} + r_{kl}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/t_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/t_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/t_f \end{bmatrix}; \quad (5.3)$$

$$X = \begin{bmatrix} -x_d & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -x_q & 0 & 1 & 0 \\ -(1-k_{\mu_d})x_d & 0 & 1 & 0 & \mu_d \\ 0 & -(1-k_{\mu_q})x_d & 0 & 1 & 0 \\ -(1-k_{\mu_f})x_d & 0 & \mu_f & 0 & 1 \end{bmatrix}; g = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{t_f} \end{bmatrix}^t. \quad (5.4)$$

Тоді, із виразу (5.1), вектор потокозчеплення ψ СОДГ зв'язаний з величинами, що характеризують обмотку статора виразом:

$$h(\bar{\Psi}) = \bar{\Psi}_s^t K i_s = \bar{\Psi}_s^t (M^t K M) X^{-1} \bar{\Psi}, \quad (5.5)$$

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

Спільне рішення виразів (5.1), (5.2), (5.3), (5.4) дозволяє визначити постійну інтегрування, що характеризують уставки ПД-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) и реактивної (Q) потужностей знаходяться із рівняння:

$$\begin{cases} i_s = MX^{-1}\bar{\Psi} \\ P = u_g^t i_s = u_g^t MX^{-1}\bar{\Psi} \\ Q = -u_g^t K i_s = -u_g^t KMX^{-1}\bar{\Psi}. \end{cases} \quad (5.6)$$

У разі збільшення загального навантаження, підключений на паралельну роботу генератор в початковий момент, сумірний з постійними часу СОДГ, може автоматично «взяти на себе» весь надлишок затребуваної споживачами потужності. Це пов'язано з тим, що, решта генераторів, що працюють в сталому режимі, будуть поставляти постійні потужності в залежності від уставок, що може привести до несподіваної неузгодженості навантаження між генераторами.

Щоб уникнути такого неузгодженості, в залежності від споживаного струму і з розрахунку розбіжності між потужністю конкретного генератора і підключеного, блок розподілу навантаження, шляхом впливу на ПІД-регулятори СОДГ по частоті обертання і напрузі, усуне неузгодженість, що виникне.

5.4. Удосконалення системи контролю та управління енергетичними процесами

Для захисту СНЕ від перезарядження і перерозрядження локальна СК здійснює вимір напруги кожного елементу в ЛАБ. При цьому вимірювальні ланцюги усіх акумуляторів повинні бути гальванічно розв'язані і розраховані на роботу при напрузі, відповідній максимальній напрузі СНЕ (Рис. 2.1). Для більшості застосувань точність вимірювання напруги ЛАБ повинна бути не гірше ± 20 мВ. При формуванні СК за рівнем напруги ЛАБ необхідно враховувати падіння напруги на їхньому внутрішньому опорі і температуру.

Поелементний контроль температури ЛАБ необхідний також для захисту СНЕ від перегрівання. Останнім часом для цих цілей часто

[До змісту](#)

застосовуються датчики температури з цифровим або аналоговим виходом, відносно прості у використанні, що забезпечують точність вимірювання $\pm (1 - 2)^\circ\text{C}$. Терморезистори або термопари продовжують використовуватися для ряду спеціальних застосувань, пов'язаних з роботою СНЕ в екстремальних умовах або з обмеженнями у використанні імпоротної елементної бази.

Для вимірювання струму в СНЕ поряд з шунтами використовуються датчики струму холловського типу, широка номенклатура яких дозволяє вимірювати струми в діапазоні від 10 до 1000 А з точністю порядку $\pm 2\%$. Крім підрахунку зарядної і розрядної ємностей [ЛІАБ](#), величина струму необхідна для розрахунку коригувальних поправок до вимірних значень напруги ЛІАБ.

Датчики струму також можуть бути використані для захисту від струмових перевантажень силових ланцюгів СНЕ поряд з плавкими вставками або запобіжниками, що самовідновлюються і захищають ЛІАБ тільки від струмів КЗ і не ефективні при відносно невеликих (1,5 – 2-кратних) струмових перевантаженнях.

Найбільш складним, з точки зору реалізації, завданням є забезпечення працездатності СНЕ при відмовах (КЗ або обрив) всередині ЛІАБ. Обрив в ЛІАБ найбільш небезпечний при їх послідовному з'єднанні в СНЕ, коротке замикання – при їх паралельному з'єднанні.

При паралельному з'єднанні ЛІАБ додатково для захисту від наслідків внутрішніх КЗ послідовно з кожним з них встановлюється плавка вставка.

Для збереження працездатності [СНЕ](#) при відмові одного з ЛІАБ при їх послідовному з'єднанні необхідно вивести його з силового ланцюга, одночасно зберігаючи її цілісність. Для цього використовуються електромеханічні або електронні байпасні пристрої, які управляються локальною СК, які встановлюються безпосередньо на [ЛІАБ](#) для відводу через них тепла, що виділяється [148].

[До змісту](#)

Важливою функцією локальної СК є апаратне вирівнювання ступеню зарядженості (нівелювання розбалансом напруг) одиничних **ЛПБ** в **СНБ**. Причиною розбалансу напруг є відмінність у ступені зарядженості АБ, що зумовлено відмінностями в швидкостях їх саморозряду, який визначається як струмами витоку через зовнішні і внутрішні електричні ланцюги АБ, так і електрохімічними процесами, що протікають на їх електродах.

Наслідком розбалансу напруг є робота СНБ по «гіршій» (найбільш розрядженій внутрішній) **ЛПБ**, навіть якщо вона має найбільшу номінальну ємність серед усіх АБ в СНБ.

Апаратні методи нівелювання розбалансу напруг, що є складовими **СППР** при проектуванні СБУ КПК (див. **РОЗДІЛ 5**), можна розділити на наступні:

- найбільш простий в реалізації пасивний метод, коли **ЛПБ** з підвищеною напругою розряджається за допомогою резистора, що підключається паралельно їй;
- активні методи, що забезпечують вирівнювання напруг АБ шляхом перерозподілу енергії між ними;
- системні методи, що забезпечують індивідуальний (незалежний) режим заряду для кожній **ЛПБ**.

Найбільш простим, але досить ефективним системним методом нівелювання розбалансу в **ЛПБ** великої та надвеликої ємності є їх заряд багатоканальними автоматичними зарядними пристроями (АЗП, англ. *charger, AC/DC converter*) (**Рис. 1.3**).

Для низьковольтних портативних **ЛПБ** добре зарекомендували себе схемотехнічні рішення, що забезпечують автоматичну перекомутацію **ЛПБ** з послідовної схеми на паралельну при підключенні до неї спеціалізованого АЗП [90, 100].

В активних методах реалізуються трансформаторні схеми перерозподілу енергії в **ЛПБ** або використовується підзаряд «відстаючих» АБ від одного або декількох джерел постійного струму, живлення яких

здійснюється з виходу АБ або від зовнішнього джерела енергії (наприклад, АЗП, [СГЕ](#), іншого джерела поновлюваної енергії). Такі пристрої, що забезпечують великі перетікаючі струми, дозволяють не тільки нівелювати розбаланс напруг в АБ, а й забезпечувати їх повний розряд, а не працювати за графіком «гіршої» [ЛПБ](#).

Для зручності експлуатації АБ інформація про її стан може передаватися в інтегровану СК гібридним [ДЕПК](#) по стандартному цифровому каналу, виводитися на дисплей або відображатися за допомогою світлодіодів, використовуючи інтуїтивно зрозумілу «світлофорну» кольірну символіку.

Високовольтні високоемнісні АБ будуються за модульним принципом виходячи з вимог забезпечення електробезпеки при монтажі та ремонті, а також можливості їх транспортування і монтажу з мінімальним використанням підйомно-транспортних механізмів (ПТМ). У них використовуються СК також побудовані за модульним принципом з 2 – 3 рівнями керування.

При побудові потужних [СНЕ](#) для гібридних [ДЕПК](#) на перший план виходять вимоги безпеки при їх монтажі, експлуатації, технічного обслуговування і ремонту. Для резервних АБ важливою вимогою є тривале збереження технічних характеристик в режимі очікування підключення до навантаження, гарантований перехід і забезпечення заданого режиму розряду по команді, час надходження якої є невизначеним. Час перебування батареї в режимі очікування може бути від кількох місяців до десяти і більше років. Високо-енерго-ємнісні АБ можуть бути побудовані по послідовно-паралельній або паралельно-послідовній схемах [93, 187, 201].

Заданий термін експлуатації і безперебійність роботи [ЛПБ](#) досягаються: шляхом застосування комплектуючих виробів і матеріалів з відповідними термінами служби; за рахунок структурного резервування в АБ; за рахунок використання АМЗ і безперервного моніторингу їх стану

[До змісту](#)

(Рис. 2.1), що дозволяє проводити необхідні регламентні і ремонтно-відновлювальні роботи на окремих підсистемах ЛПАБ без виведення всієї батареї з режиму очікування в найкоротші терміни.

Алгоритм роботи АБ передбачає переклад із заданою періодичністю частини акумуляторних секцій в режим тестування, в якому вони підключаються до одного з штатних навантажень. В процесі тестування проводиться розряд номінальним струмом протягом 0,5 години.

За величиною напруги на кожному ЛПАБ в кінці розряду робиться висновок про зниження їх номінальної ємності і можливості подальшої експлуатації як окремих ЛПАБ, так і АМЗ в цілому. За результатами тестування і наявної інформації про роботу АМЗ в режимі очікування приймається рішення про проведення ремонтно-відновлювальних робіт на несправних секціях. Несправні АМЗ відключаються від вихідних шин СНЕ. Всі справні АМЗ після закінчення тестового розряду підключаються на заряд від АЗП до напруги 4,2 В на будь-якому ЛПАБ. Подальший заряд для вирівнювання напруг на окремих ЛПАБ проводиться за допомогою внутрішніх пристроїв підзарядки зі складу СНЕ.

При паралельному з'єднанні ЛПАБ в силовому ланцюзі кожного з них повинен бути передбачений елемент захисту від перевантаження по струму (наприклад, плавка вставка), що захищає АМЗ від короткого замикання всередині окремих ЛПАБ, а локальна СК повинна забезпечувати контроль їх стану.

5.5. Синтез багатокритеріальної тривірневої стратегії управління розподілом потужності

Пропонується використання у гібридній СЕЕС СЕУ КПК додаткового АДЕ, котрий складається з двошарових електрохімічних конденсаторів (англ.

Electric double-layer capacitor – EDLC). Блок-схема класичної стратегії управління гібридною СЕУ КПК на базі представлених на [Рис. Ж.2.](#) – [Рис. Ж.10](#) із використанням *EDLC* за критерієм мінімуму споживання електроенергії показано на [Рис. 5.2](#).

На підставі розробленого методу удосконалено стратегію управління СЕУ КПК за критерієм мінімуму споживання електроенергії (англ. *Equivalent consumption minimization strategy – ECMS*) шляхом введення критерію отримання максимуму альтернативної енергії та регулювання ступеню заряду батарей [ЧНЕ](#) (англ. *External energy maximization strategy with SOC's regulation – EEMS*) із використанням [АДЕ](#), щоб звести до мінімуму споживання палива.

Дотримання інших критеріїв, описаних у підрозділі [1.1](#), таких як шум, вібрація, викиди у довкілля або технічне обслуговування СОДГ (див. [Таблиця 1.1](#)) в першу чергу залежить від робочої точки СОДГ ([Рис. 1.2](#)) і [АДЕ](#) ([Рис. 3.12](#), [Рис. 3.13](#)) і визначається настроюванням системи керування розподіленням електроенергії. Таким чином, аналогічні функції витрат в залежності від режиму роботи СОДГ можуть бути отримані за цими критеріями, а також і загальна оптимальна потужність СЕУ [КПК](#) може бути визначена з виваженою функцією витрат за кількома критеріями.

Найвищий рівень управління:

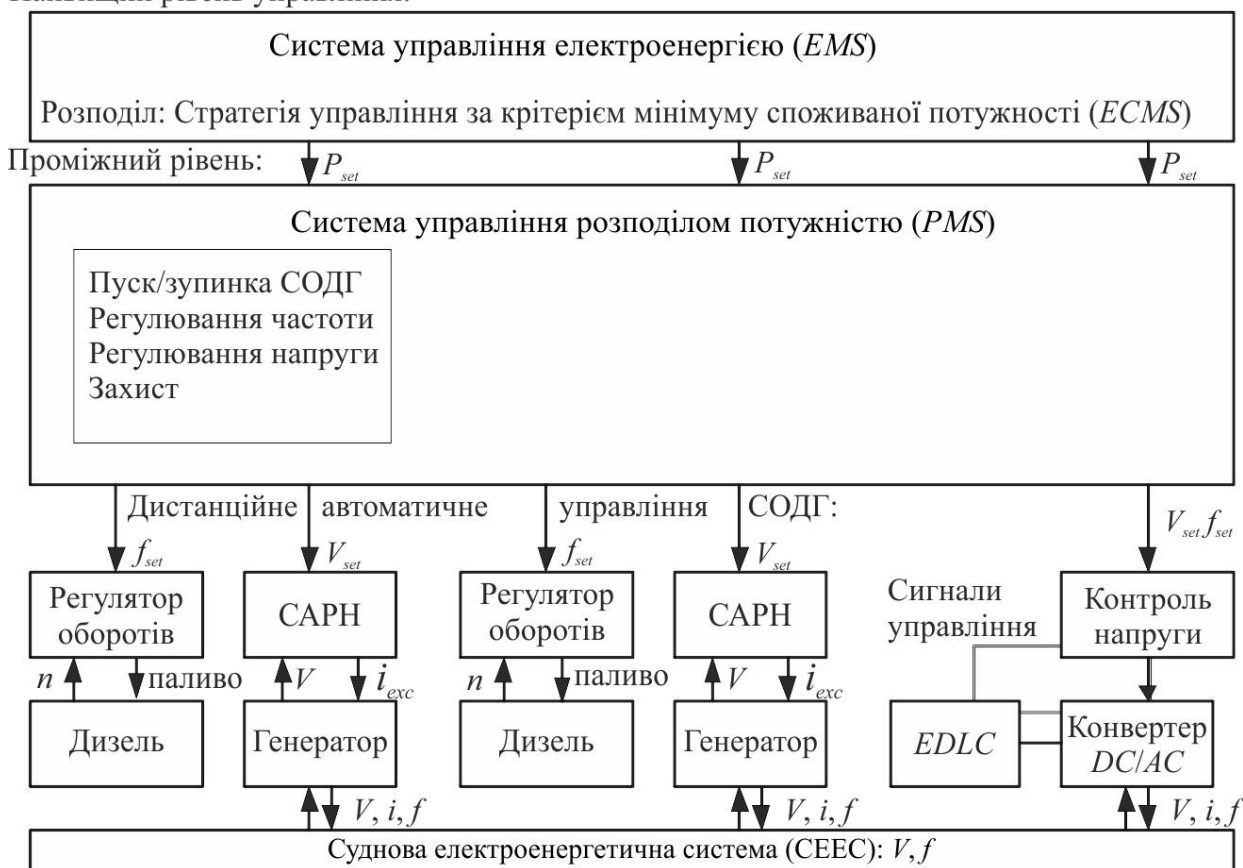


Рис. 5.2 Блок-схема управління гібридною СЕУ КПК за критерієм мінімуму споживання електроенергії: САРН – система автоматичного регулювання напруги (англ. *Automatic Voltage Regulator – AVR*); X_{set} – уставка; P – потужність; f – частота напруги; V – напруга; n – частота обертання СОДГ; i_{exc} – струм збудження генераторів; I – струм СОДГ.

Дотримання інших критеріїв, описаних у підрозділі 1.1, таких як шум, вібрація, викиди у довкілля або технічне обслуговування СОДГ (див. Таблиця 1.1) в першу чергу залежить від робочої точки СОДГ (Рис. 1.2) і АДЕ (Рис. 3.12, Рис. 3.13) і визначається настроюванням системи керування розподіленням електроенергії. Таким чином, аналогічні функції витрат в залежності від режиму роботи СОДГ можуть бути отримані за цими критеріями, а також і загальна оптимальна потужність СЕУ КПК може бути визначена з виваженою функцією витрат за кількома критеріями.

Система управління електроенергією



Рис. 5.3 Блок-схема стратегії управління СЕУ КПК за критерієм максимуму альтернативної енергії та регулювання ступеню заряду батарей CHE: CAPN – система автоматичного регулювання напруги (англ. *Automatic Voltage Regulator – AVR*); X_{set} – уставка; T – упор (момент); F – сила поштовху гвинта; f – частота напруги; V – напруга; n – частота обертання СОДГ; i_{exc} – струм збудження генераторів; i – струм; τ_T – результуюча проекції вектору зусилля на площину руху судна; α_A – кут повороту ПП відносно діаметральної площини судна

Таким чином, удосконалення стратегії за критерієм отримання максимуму альтернативної енергії та регулювання ступеню заряду батарей CHE (англ. *External energy maximization strategy with SOC's regulation – EEMS*) із використанням АДЕ стає перспективним підходом для підвищення ефективності СЕУ КПК в порівнянні з безліччю функцій для майбутніх розробок.

[До змісту](#)

У кінцевому рахунку подальші дослідження повинні рухатися шляхом об'єднання стратегій управління з точки зору комплексного підходу. Блок-схема одного із варіантів удосконаленої стратегії управління інтегрованою системою з гібридним ДЕПК і єдиною СЕЕС на Рис. 5.3.

5.6. Моделювання і дослідження процесів заощаджування енергії

Вхідні та вихідні сигнали моделі системи керування розподіленням електроенергії (СКРЕЕ, англ. *Energy Management System* – *PMS*) гібридного ДЕПК, структурну схему якого наведено на Рис. 1.3, а принципову на Рис. Ж.1, показано на Рис. 5.4.

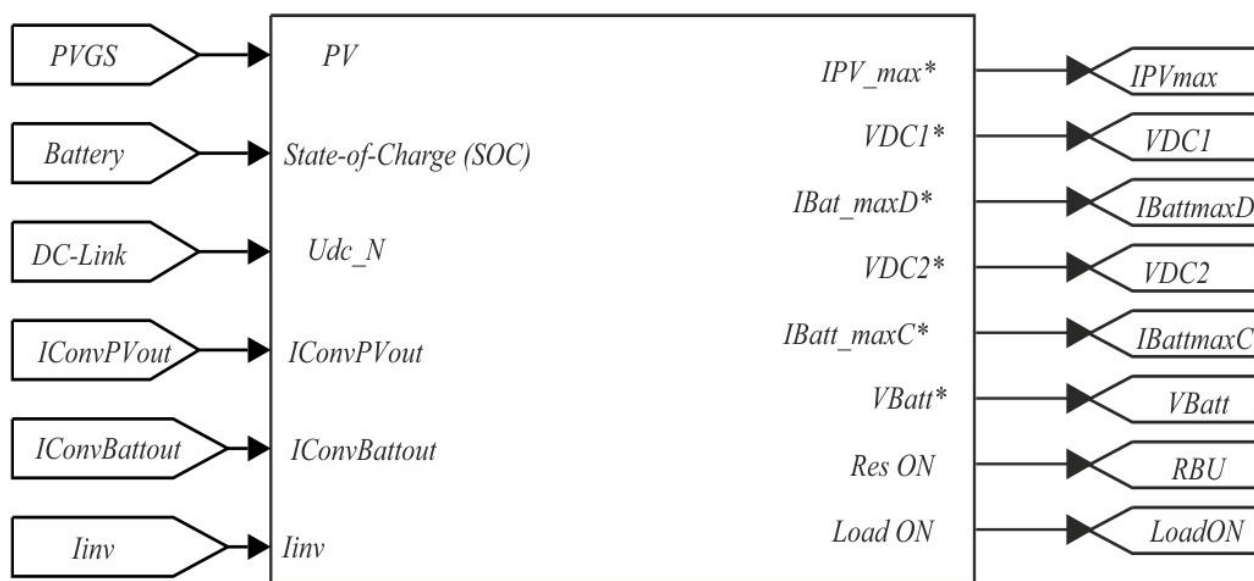


Рис. 5.4 Функціональна схема СКРЕЕ (*PMS*) гібридного ДЕПК: *State-f-Charge* (SOC) – рівень заряду CHE, %; *IConvPVout* – вихідний струм перетворювача (конвертера) постійної напруги (ППН, англ. *DC/DC converter*) з сонячних генеруючих елементів (СГЕ, англ. *photovoltaic (PV) generation system* – *PVGS*); *IConvBattout* – вихідний струм ППН з CHE; *Iinv* – струм вихідного інвертору напруги (ІН, англ. *voltage source inverter* – *VSI*); *IPV_max* – максимальне значення струму СГЕ; *VDC1*, *VDC2* – напруги ППН СГЕ відповідно; *IBat_maxD*, *IBat_maxC* – максимальні значення струму розряду та

заряду СНЕ відповідно; V_{Batt} – напруга на СНЕ; $Res\ ON$ – включення гальмівних опорів (англ. *resistor back unit* – *RBU*); $Load\ ON$ – підключення навантаження

Наведений нижче аналіз способу різних експлуатаційних режимів СЕУ ДЕПК з точки зору споживання енергії, дозволив виявити основні критерії для порівняння продуктивності витрати палива і стану заряду СНЕ (напруги на *DC-link*). Загальна ефективність системи і напруги на кожному джерелі енергії, які можуть вплинути на параметри експлуатаційного режиму оцінювалися із застосуванням підходу, заснованого на зворотному вейвлет-перетворенні їх миттєвих потужностей за допомогою імітаційної моделі СЕУ ДЕПК у *MatLab/Simulink*.

На Рис. 5.5, Рис. 5.6, Рис. 5.7, Рис. 5.8, Рис. 5.9 показані отримані характеристики під час моделювання енергетичних процесів у гібридному ДЕПК протягом 350 с у середовищі *MatLab/Simulink*. Профіль навантаження (підсистема СП) визначалася згідно системи рівнянь (3.9), (3.10) для $\cos\varphi = 0,8$.

На початку моделювання ($t = 0$ с), живлення навантаження забезпечується основними СОДГ і СГЕ гібридного ДЕПК включається для заряду СНЕ і підготовки до аварійного режиму.

При $t = 40$ с, відбувається знеструмлення судна. СКРЕЕ (*PMS*) переключає живлення СП на альтернативні джерела. У цей час додаткова потужність навантаження миттєво забезпечується від *DC-link*, куди «здійснювалося» скидання енергії від основних споживачів, що працювали у генераторному режимі, бо потужність СГЕ збільшується повільно.

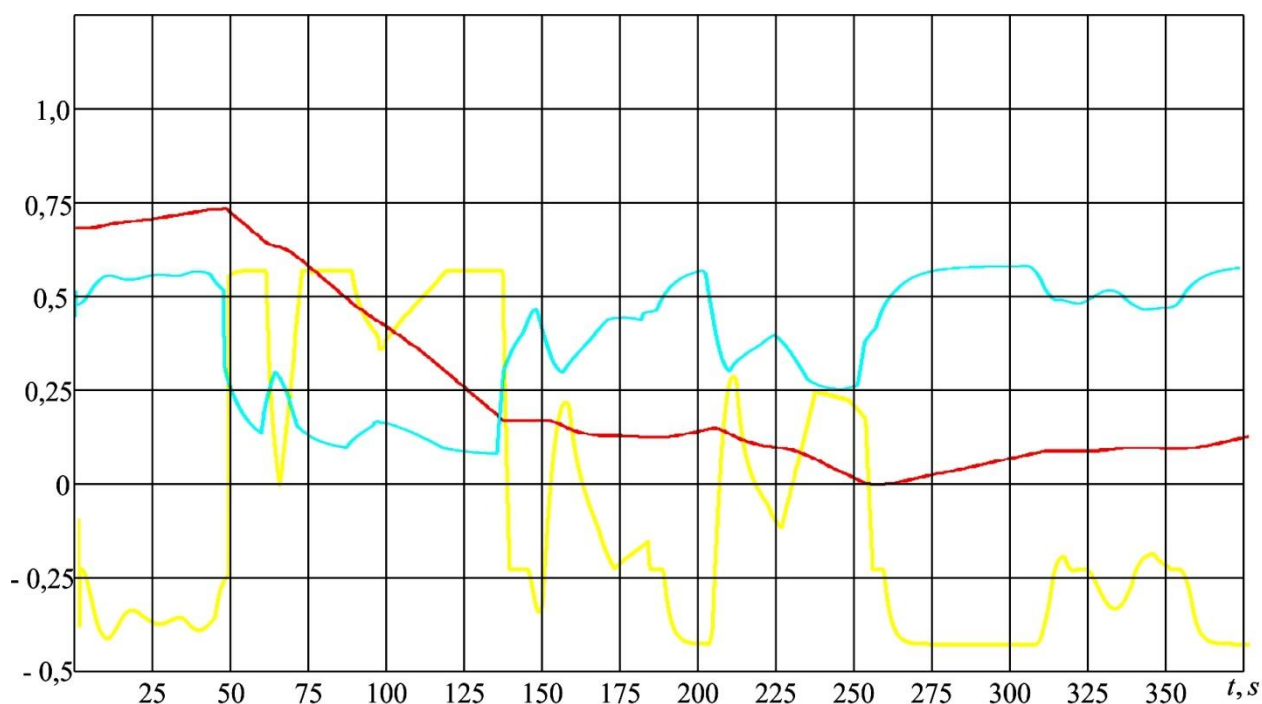


Рис. 5.5 Енергетичні характеристики CHE: — — максимальному струму відповідає значення 400 А; — — максимальній напрузі відповідає значення 48 В; — — максимальному ступеню заряду відповідає значення 100 %

При $t = 45$ с, напруга на *DC-link* досягає нижчої уставки (270 В) і СНЕ починає підживлювати шину *DC-Link* до 450 В, напруга на який на 47 секундів досягає необхідного рівня і СНЕ дозволяє обмежити його потужність повільно до нуля. СГЕ забезпечують сумарну потужність навантаження і продовжує підживлювати шину *DC-Link*, до якої на 55 секундів підключаються споживачі аварійного режиму. При $t = 62$ с, включається СНЕ, щоб підтримувати напругу шини *DC-Link* до 450 В і допомагати СГЕ забезпечувати потрібну додаткову потужність навантаження.

На 80 секундів, СГЕ досягають своєї максимальної потужності, яка обмежується рівнем 10 кВт через діапазон вхідної напруги *DC/DC* і додаткова потужність навантаження забезпечується СНЕ, максимальна потужність якої досягається при $t = 120$ с (20 кВт) і живлення навантаження забезпечується через шину *DC-Link*.

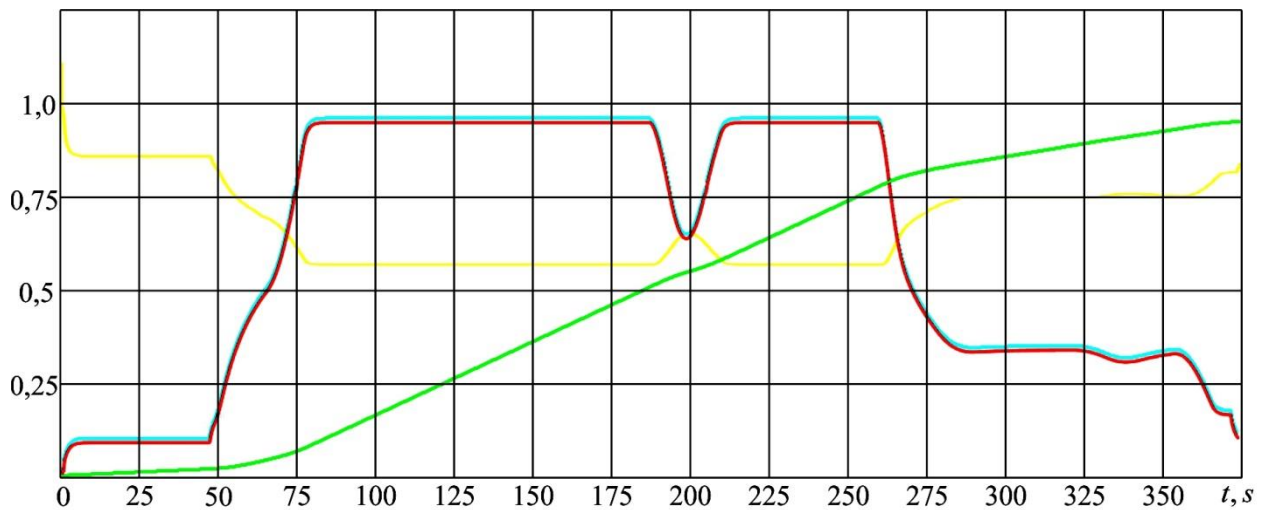


Рис. 5.6 Енергетичні характеристики СГЕ: — — максимальній напрузі відповідає значення 170 В; — — максимальному струму відповідає значення 250 А; — — максимальному значенню відношення напруги на СГЕ до напруги холостого ходу відповідає значення 1; — — максимальній температурі СГЕ відповідає значення 60 °С

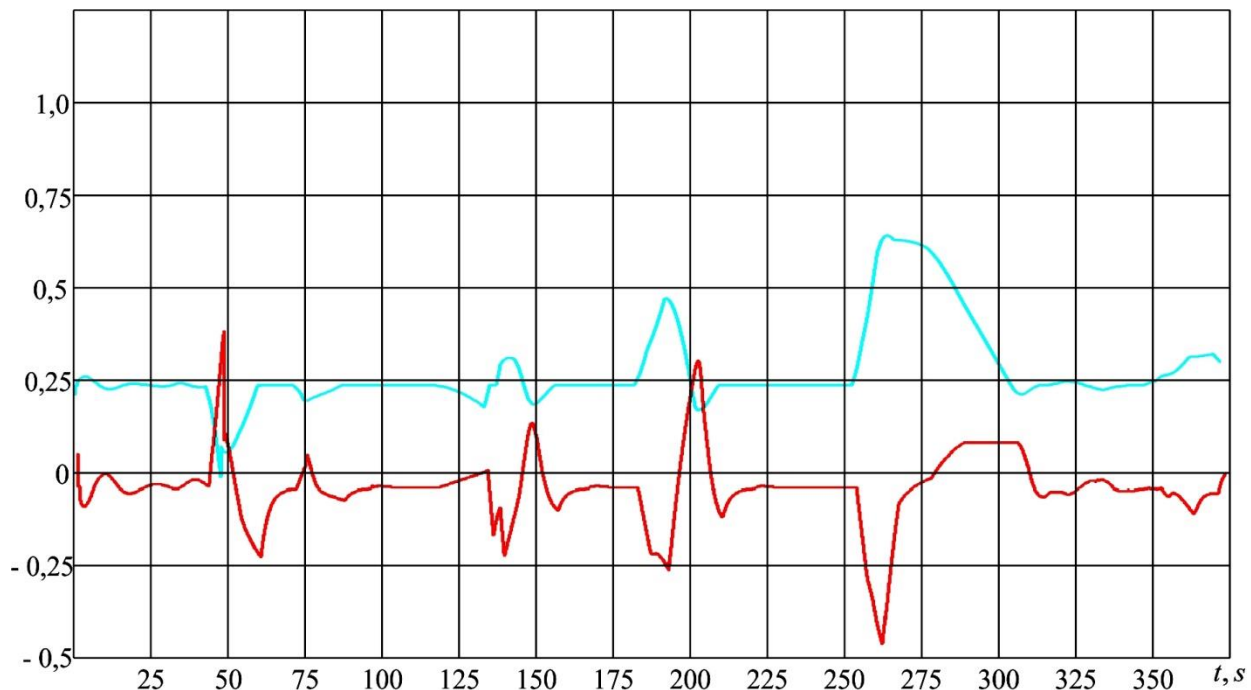


Рис. 5.7 Залежності напруги і струму на *DC-link*: — — максимальній напрузі відповідає значення 450 В; — — максимальному струму відповідає значення 1000 А

На 130 секундi потужнiсть навантаження знижується нижче максимальної потужностi СГЕ. У зв'язку з низькими динамiчними характеристиками СГЕ, пiд час перехiдних процесiв додаткове живлення споживачiв з СГЕ переключасться на шину *DC-Link*.

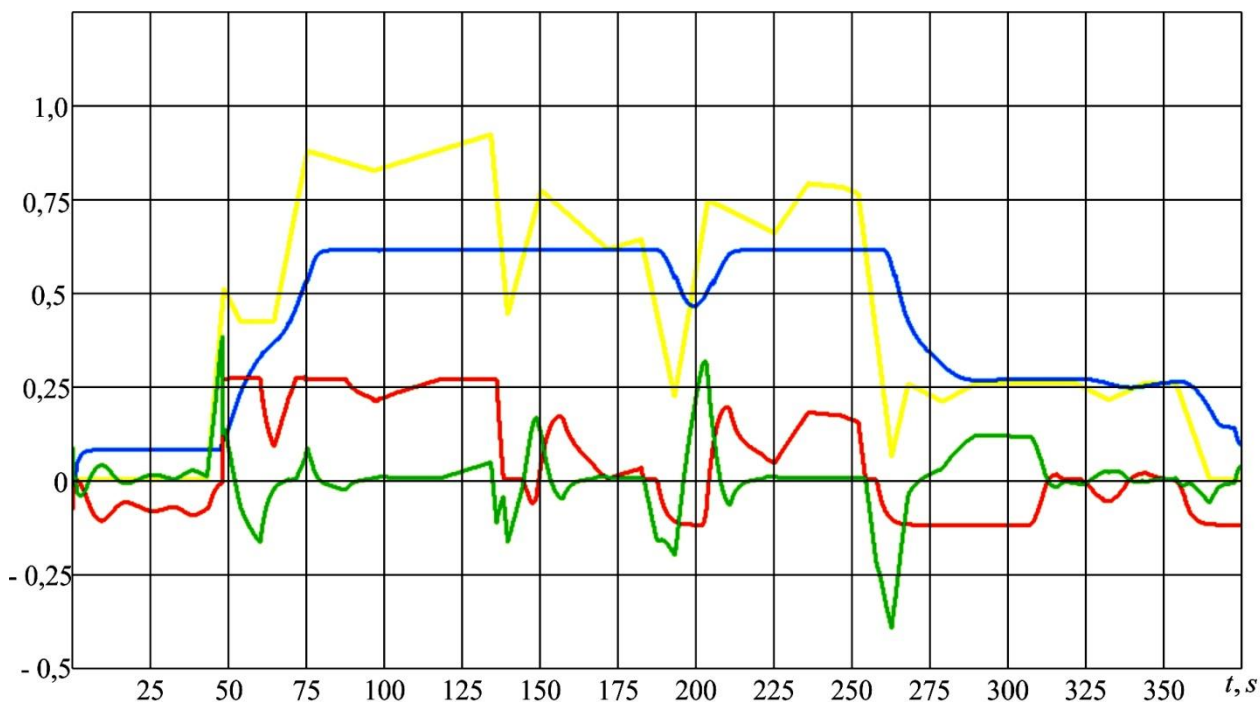


Рис. 5.8 Характеристики потужностей на різних ділянках ДЕПК: — — — — —
максимальній потужності навантаження відповідає значення 1000 кВт; — — — — —
— — — — — максимальній потужності на СГЕ відповідає значення 10 кВт; — — — — —
— — — — — максимальній потужності на СНЕ відповідає значення 20 кВт; — — — — —
— — — — — максимальній потужності на *DC-link* відповідає значення 300 кВт

При $t = 135$ с, напруга на шині постійного струму *DC-Link* досягає 450 В, а заряд батарей СНЕ падає до нуля.

На 140 секундi знову включаються споживачі аварійного режиму ДЕПК і алгоритм відпрацювання СРЕЕ (*PMS*) із забезпеченням живленням необхідних споживачів аналогічний першому випадку при $t = 55$ с.

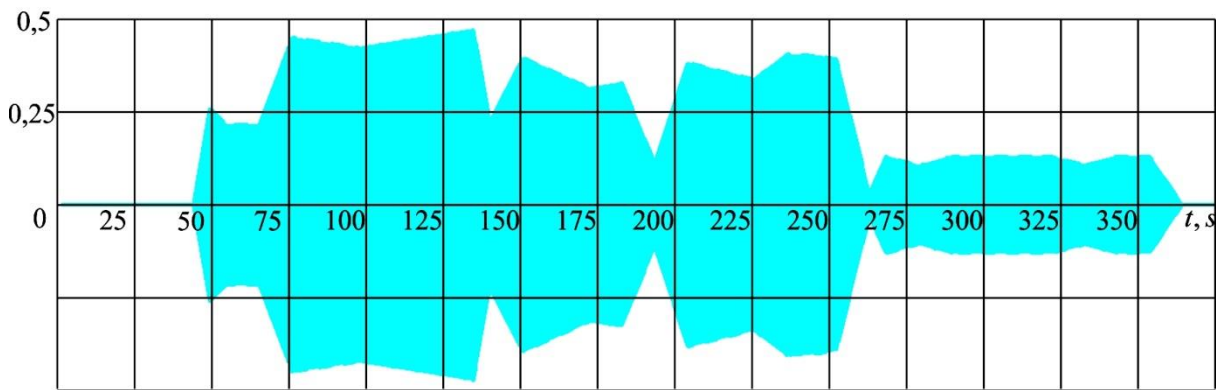


Рис. 5.9 Залежність струму навантаження: максимальному струму відповідає значення 3000 А

При $t = 165$ с, потужність навантаження знижується нижче максимальної потужності СГЕ і додаткова потужність забезпечується від СНЕ і шини *DC-link*.

На 190 секунді відбувається раптове збільшення навантаження за рахунок підключення споживачів, що забезпечують ввід у дію ДЕПК, і СКРЕЕ (*PMS*) швидко реагує, забезпечуючи додаткову потужність навантаження від шини *DC-Link*, до якої, для відновлення напруги і підтримки СГЕ з додаткової потужності навантаження, на 195 секунді підключаються акумулятори СНЕ.

На 250 секунді відбувається запуск основних СОДГ гібридного ДЕПК і додаткова енергія СГЕ починає накопичуватися у СГЕ і елементах *DC-Link*.

При $t = 260$ с, ДЕПК потребує додаткової потужності у зв'язку зі зміною експлуатаційного режиму (наприклад – маневрування судна) і енергія СГЕ знову використовується для підтримки основних СОДГ.

На 330 секунді судно виходить на ходовий режим, а потужність навантаження зменшується. СГЕ також повільно зменшують свою потужність до оптимального рівня і переключаються на заряд батарей СНЕ.

У [Таблиця 3.1](#) наведені порівняльні результати моделювання енергетичних процесів при передачі потужності у гібридному ДЕПК для двох найважчих експлуатаційних режимів: аварійного (*Emergency Operation*) та режиму [DP](#) з умови застосування різних стратегій управління СКРЕЕ ([PMS](#)).

Перераховані вище результати моделювання енергетичних процесів у гібридному [ДЕПК](#) дають можливість вирішувати проблеми структуризації останніх на основі впровадження нових видів силової напівпровідникової техніки і високоавтоматизованих технологій управління. Сукупність перерахованих складових дозволяє будувати гнучкі багатофункціональні електрогенеруючі системи, інтегровані в гібридний ДЕПК в якості невід'ємної його частини.

Але, враховуючи той факт, що регулювання ступеню заряду батарей несуттєво впливає на зниження споживання реактивної потужності ([Таблиця 3.1](#)), а живлення інверторів нестабілізованою випрямленою напругою створює проблему рекуперації електроенергії в мережу суднових електроспоживачів, можна зробити висновок, що електромеханічна компенсація реактивної потужності споживачів в основному здійснюється за рахунок [СОДГ](#), що переводяться її ПД-регуляторами в режим компенсаторів.

Зокрема, потрібно звернути увагу на те, що до складу такого ДЕПК входять допоміжні дизель- або турбогенератори, як основні джерела теплової та механічної енергії, частина якої перетворюється в електричну, і при інших особливих умовах з утилізацією, в свою чергу, необхідно враховувати теплові втрати в їх робочому процесі. Особлива увагу при розробці структурних схем гібридних ДЕПК необхідно приділяти автоматизації управління всім енергетичним комплексом, включаючи підсистеми збору і обробки вимірювальної інформації, узгодженого управління окремими перетворювачами енергії: генераторами і їх системами збудження, силовими напівпровідниковими і комутаційними пристроями, різноманітними

механізмами і їх регуляторами, взаємопов'язаними на різних ієрархічних рівнях.

Крім того, електрогенеруюча система повинна задовольняти часто суперечливим вимогам, що впливають із призначення судна, неспівпадаючими характеристиками одного і того ж обладнання від різних виробників, і особливостей його використання, а також бути високонадійною, з необхідним ступенем резервування і ремонтпридатності.

5.7. Експериментальні дослідження енергетичних процесів в різних експлуатаційних режимах

Моделювання виконувалося в *MatLab/Simulink* за результатами Удосконалення математичного апарату при моделюванні енергетичних процесів в СЕУ КПК суден спеціального призначення в різних експлуатаційних режимах (див. підрозділ 4.1). Генератори $G1 - G3$, АД ПП $M2, M7$ і потужних вантажних насосів $M4, M6$ (Рис. 1.4) – стандартні блоки з бібліотеки *Simulink*, ініціалізовані за методикою [259, 266].

Для утворення моменту опору T_m на валу АД пропорційного швидкості обертання ротору (наприклад: пуск відцентрового насосу, або ПП на «вільній» воді), у моделі між виходом виміру оборотів АД ω_m і входом T_m необхідно включити блок *Gain*, коефіцієнт передачі якого розраховується по формулі

$$K^* = \frac{9,55 \times P_n \times 60}{2\pi n_n^3}. \quad (5.7)$$

ГЕД, які отримують живлення від ПЧ з ланкою постійного струму, теж є стандартними блоками *Simulink*, такими як, наприклад, «*Field-oriented*

[До змісту](#)

control induction motor drive», в залежності від типу АД ГЕУ КПК та технологічного процесу. Винятком є налаштування параметрів вкладки *Controller*, таких як «*Low pass filter cutoff frequency*» – коефіцієнт обмеження резонансної частоти фільтру гармонік, який враховує вплив основної на магнітний потік АД, «*Current controller hysteresis band*» – пропускну спроможність контролера відносно уставки споживаного АД струму та «*Maximum Switching Frequency*» – максимальна частота перемикання інвертора. Ці параметри розраховуються згідно співвідношень (4.1), (4.2), (4.3), (4.4) з урахуванням граничної частоти живлення окремого АД ПП, працюючого в зоні сталих координат.

Побудова кривої моменту опору ГЕД здійснюється апроксимацією даних навантаженого АД ПП у розрахунковому полі за допомогою методу найменших квадратів, для чого формуються таблиці початкових даних у вигляді *table_1*, *table_2*, ... *table_m* = [*u*, *R*, *w*, *t*, *n*] для різних значень вадомісткості, які задаються командою *disp_mat* = [Δ_1 , Δ_2 , ... Δ_m].

Тоді командою *disp* = *disp_mat(loadcond)* здійснюється виведення значень змінних в командне поле, де *loadcond* (*Load condition*) може приймати значення від 1 до *m*. Далі задаються вектори розрахункових функцій с одночасним переходом до необхідних одиниць виміру, якщо це потрібно:

u_dat = [*table_1(:,1)*, *table_2(:,1)*, ... *table_m(:,1)*] * 0,5144; – переводимо вузли у м/с;

Ru_dat = [*table_1(:,2)*, *table_2(:,2)*, ... *table_m(:,2)*] * 9.82/1000; – переводимо кПА у кН;

w_dat = [*table_1(:,3)*, *table_2(:,3)*, ... *table_m(:,3)*];

t_dat = [*table_1(:,4)*, *table_2(:,4)*, ... *table_m(:,4)*];

n_dat = [*table_1(:,5)*, *table_2(:,5)*, ... *table_m(:,5)*] * 2 * π / 360; – переводимо об/хвил. у рад/с.

З початку циклу апроксимації задаються його межі, визначивши *k1* = *length(u_dat)*;, що повертає найбільше значення *u_dat* і початкову точку командою *up_start* = *u_dat(1, loadcond)*;

Потім визначається початковий коефіцієнт пропорційності між швидкістю судна і опором руху: $X_{uu} = 1000 * Ru_dat(1, loadcond) / (up_start^2);$.

Тоді поточні значення швидкості руху і опору визначаються наступним чином:

$u_shift(:, loadcond) = U_dat(:, loadcond) - up_start;$

$R_vec(:, loadcond) = 1000 * Ru_dat(:, loadcond);$.

Зациклюючи розрахунки: *for* $kk = 1:k1$ $uml = U_dat(kk, loadcond);$ $res_vec(kk, loadcond) = (R_vec(kk, loadcond) - X_{uu} * uml^2);$ *end*; за допомогою команди *polifit* формуються коефіцієнти поліномів (pRu) ($pw0$) та (Ptd) відповідної степені, які з найменшою середньоквадратичною похибкою апроксимують вихідні функції:

$pRu = polyfit(u_shift(:, loadcond), res_vec(:, loadcond), 5);$ – розрахунок багаточленної відповідності кривої;

$pw0 = polyfit(U_dat(:, loadcond), w_dat(:, loadcond), 0);$ – u і w для розрахунку коефіцієнту попутного потоку (4.14);

$Ptd = polyfit(U_dat(:, loadcond), t_dat(:, loadcond), 0);$ – t вектор для розрахунку зусилля утримання (див. підрозділ 6.6).

Розрахунок значень полінома Ru у точках u застосовується командою *polival*:

$Ru = polyval(pRu, \max(u - up_start, 0)) + X_{uu} * u^2;$ (див. підрозділ 4.4).

Відповідну модель динаміки судна, вхідні параметри якої є визначальними для моделювання з АД як привідним, приведено на Рис. 5.10.

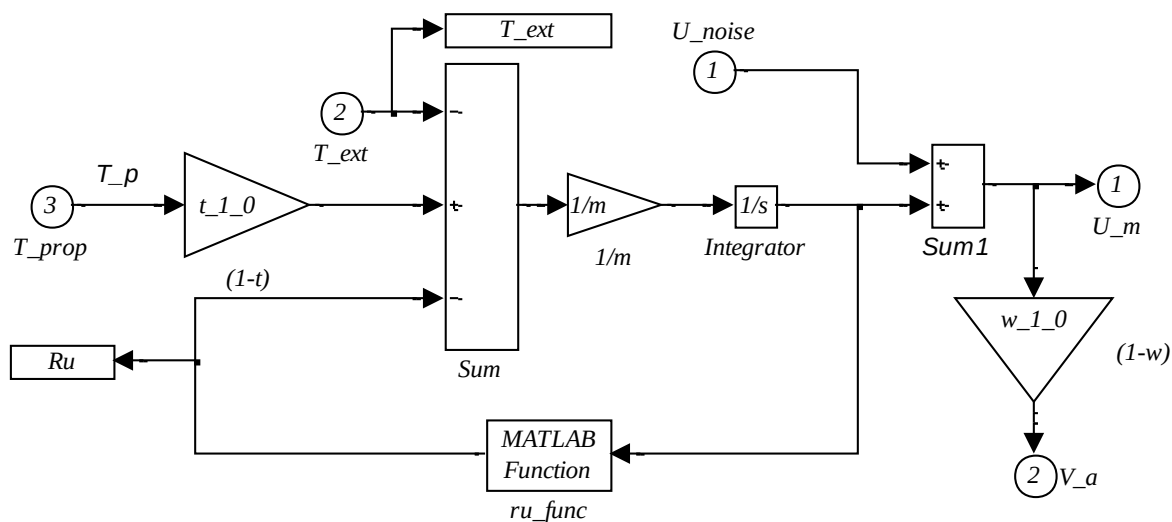


Рис. 5.10 Модель динаміки судна: T_{prop} – упор (*thrust*) гребного гвинта; $t_{1_0} = 1 - t$ = середнє значення коефіцієнту горизонтального утримання (*thrust deduction*) у відносних одиницях (в.о.) вимірюваних даних для відповідної моделі судна; T_{ext} – упор зовнішньої сили (*External Force*); $m = 10009 \cdot 1025$ (водотоннажність * маса одиниці об'єму морської води) + 10^5 (вантаж судна); U_{noise} – відхилення (“шум”) швидкості судна; Ru_func – функція розрахунку опору судна (Ru); $w_{1_0} = 1 - w$ = середнє значення коефіцієнту попутного потоку (*wake fraction*) у в.о. для відповідної моделі судна; U_m – швидкість судна.

На Рис. 5.11 представлені графіки перехідних процесів під час пуску та накидання моменту спротиву АД одного з ПП, а на Рис. 5.12 спектральна характеристика напруги. Аналіз ефективності застосування обчислення оптимізованої моделі імпульсів управління виконувалось за допомогою аналізатора спектра *SP Tools* в середовищі *MatLab* при паралельній роботі всіх СОДГ на чотири ГЕД. При цьому, робили спектральний аналіз напруги на навантаженні з настроюванням параметрів ПЧ АД за замовчуванням (верхній графік на Рис. 5.12) та із застосування вище наведеної методики обчислення імпульсів управління відповідно.

З аналізу спектральних характеристик напруги на навантаженні випливає, що застосування даного методу є досить ефективним засобом зниження перешкод в досліджуваній 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 налаштована система управління, зменшується в 17 разів.

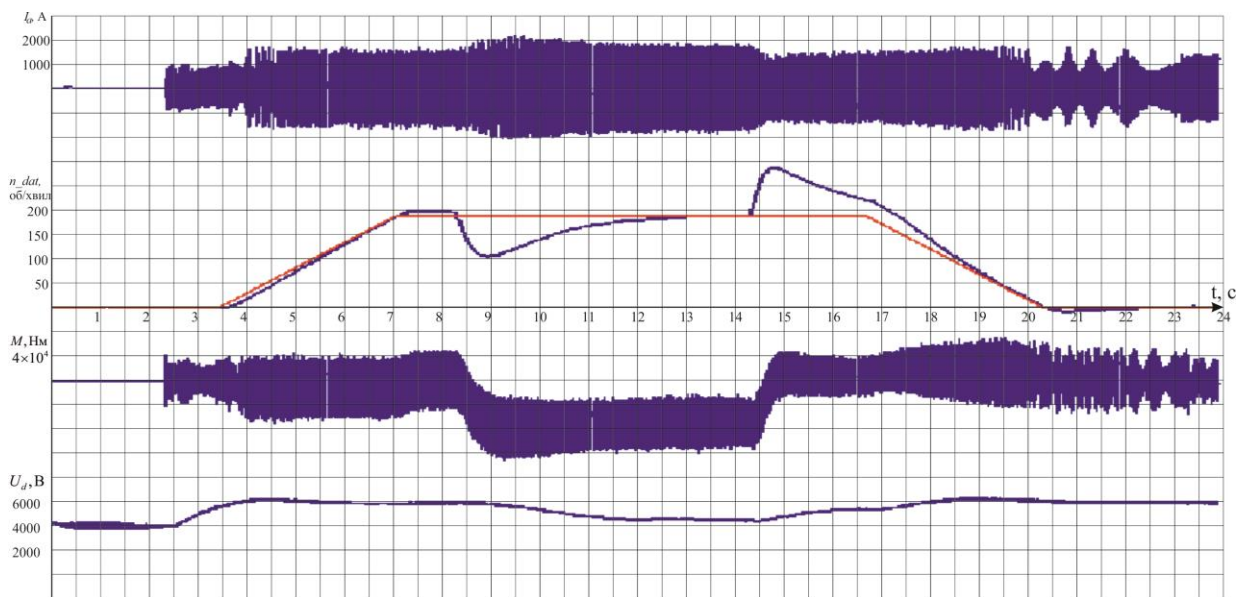


Рис. 5.11 Графіки перехідних процесів пуску та навантаження АД **III**: U_d – напруга на ланці постійного струму ПЧ (**DC-link**), В; M – обертаючий момент АД, Нм; n_dat – задані та дійсні частоти обертання АД, об/хвил.; I_a – споживаний струм статора АД, А.

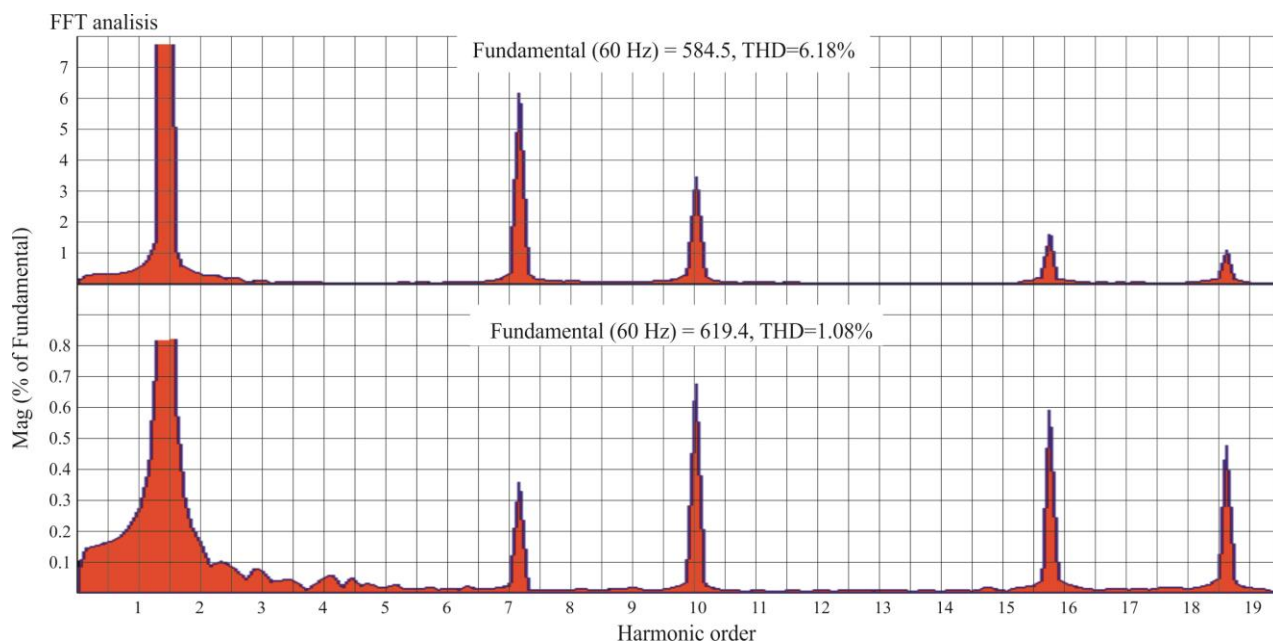


Рис. 5.12 Спектральна характеристика на шинах високої напруги: *THD* – коефіцієнт гармонік.

5.8. Висновки до розділу

У рамках вирішення третьої головної задачі отримали подальший розвиток ресурсозберігаючі екологічно чисті технології експлуатації СЕУ **КПК** за рахунок застосування альтернативних генеруючих елементів (АГЕ) при проектуванні джерел живлення і підвищення їх швидкодії при зміні експлуатаційних режимів, що дозволило удосконалити 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. А саме: у стратегії із контролем за станом **СОДГ** (англ. *State machine control strategy – SMCS*); із *PI* управлінням та регулюванням ступеню заряду батарей (англ. *State-of-Charge – SOC*) **СНЕ** (англ. *Classical PI control strategy with SOC's regulation – CPICS*); із контролем частоти і стану СОДГ та регулюванням ступеню заряду батарей СНЕ (англ. *Frequency decoupling and state machine*

control strategy with SOC's regulation – FDSMCS); за критерієм мінімуму споживання електроенергії (англ. *Equivalent consumption minimization strategy – ECMS*); за критерієм отримання максимуму альтернативної енергії та регулюванням ступеню заряду батарей СНЕ (англ. *External energy maximization strategy with SOC's regulation – EEMS*). Вперше синтезовано трирівневу багатокритеріальну стратегію управління розподілом енергії у гібридній СЕУ КПК, шляхом поєднання класичної стратегії управління розподілом потужності зі стратегією контролю за станом СОДГ і ступенем заряду АГЕ [СНЕ](#), що 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. Запропонована стратегія у порівнянні з існуючими системами має вищу швидкодію виявлення ризику знеструмлення СЕЕС, більшу надійність і точність с точки зору визначення необхідності зниження навантаження (в межах 150 мілісекунд). Нова концепція є повністю інтегрованою системою із всережимними регуляторами частоти обертання [ПП](#) і системою електроживлення.

Наприклад, аналізуючи отримані залежності ([Рис. 5.5](#), [Рис. 5.6](#), [Рис. 5.7](#), [Рис. 5.8](#), [Рис. 5.9](#)) і дані у [Таблиця 3.1](#), можна зробити висновок, що контроль частоти і стан [СОДГ](#) з регулюванням ступеню заряду батарей [СНЕ](#), при усіх інших рівних умовах для експлуатаційного режиму, дозволяє зменшити кількість, або потужність модулів [СТЕ](#) на 7÷10 %, а управління за критерієм отримання максимуму альтернативної енергії та регулюванням ступеню

заряду батарей СНЕ використовувати акумуляторні батареї меншої ємності у межах $6 \div 8$ %.

Запропонована концепція побудови математичної моделі СЕУ КПК, яка враховує динаміку всіх її об'єктів, в тому числі і судна в режимах передачі потужності від СОДГ на гребні гвинти, підтвердила свою працездатність за допомогою [СППР Ships_CPC](#).

Дослідження впливу параметрів основних регуляторів системи керування на енергетичні процеси в СЕУ КПК, підтвердило широкі можливості розробки та застосування різних ефективних стратегій функціонування систем стабілізації напруги СОДГ.

[СППР Ships_CPC](#) розроблялася за технологією *Open System*, що означає його можливість реорганізовуватися, перенастроюватися і інтегруватися під технологічні процеси управління енергетичною системою судна будь-якої складності з перспективою на завершення у формі універсальної структури.

РОЗДІЛ 6. МЕТОДОЛОГІЯ РОЗРОБКИ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ПРОЕКТУВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННІ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК КОМБІНОВАНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ

6.1. Формулювання і об'єднання критеріїв вибору рішень

Досягаючи ситуативних цілей сформуємо і об'єднаємо критерії вибору рішень, заснованих на множині як самих СЕУ [КПК](#) так і експлуатаційних режимів у яких вони працюють. У деяких випадках при цьому виникають проблеми знань, при вирішенні яких втрачається чіткість стратегії і правил вибору альтернативного критерію. Виходячи з того що більшість критеріїв мають числовий характер, виникає потреба виконання складних обчислень у процесі об'єднання різноманітних, іноді, на перший погляд, несумісних критеріїв, що призводило до розділення їх на визначальні та визначаючі.

Наприклад, інтегральний критерій ефективності дозволяє прийняти рішення при варіюванні будь-яких істотних параметрів СЕУ КПК, які забезпечували б підвищення енергетичної ефективності, в зв'язку з чим, якщо адекватність математичних моделей забезпечена, критерій можна вважати об'єктивним і застосовувати його для оцінки підвищення ефективності передачі потужності в даній СЕУ КПК з будь-якими типами двигунів на лініях валів.

У стаціонарному ж русі судна з КПК опір тілу, що рухається, пропорційний тязі, але, в загальному випадку, опір руху R і тяга T не обов'язково повинні бути рівні й протилежні, а судно при цьому може прискорюватися і реагувати на інші зовнішні сили. В такому випадку коефіцієнти, що враховують зменшення тяги, можуть бути визначені за

допомогою заміни опору відповідними зусиллями для всіх трьох площин руху (*surge, sway, yaw*) [15, 227]:

$$C_{F_{lh}} = \frac{F_l(v_a, n) - T_{ux}(v_a, n) - F_l(v_a, 0)}{T_u(v_a, n)}, \quad (6.1)$$

$$C_{F_{bh}} = \frac{F_b(v_a, n) - T_{uy}(v_a, n) - F_b(v_a, 0)}{T_u(v_a, n)}, \quad (6.2)$$

$$C_{F_{zh}} = \frac{F_z(v_a, n) - T_{uy}(v_a, n)X_p - T_{ux}(v_a, n)Y_p - F_z(v_a, 0)}{T_{uy}(v_a, n)X_p - T_{ux}(v_a, n)Y_p}, \quad (6.3)$$

де: $-F_l(v_a, n)$, $F_b(v_a, n)$ і $F_z(v_a, n)$ – загальні сили (H), що діють на судно за умови відсутності інших зовнішніх збурень при швидкості притоку води v_a (м/с) і відповідного числа оборотів ГФК n (об/хв);

$-F_l(v_a, 0)$, $F_b(v_a, 0)$ і $F_z(v_a, 0)$ – відповідні сили (H) у випадку нерухомого гвинта (наприклад, течія);

$-T_{uy}(v_a, n)$ і $T_{ux}(v_a, n)$ – тяги (H) по відповідним осям відносно площини руху.

Виходячи з формул розрахунку потужностей для будь якого двигуна, безпосередньо переданої до гвинта, знайдемо вираз для розрахунку коефіцієнтів ефективності на лінії валу під впливом сил, що обурюють в певній площині, де ці сили мають перевагу. Наприклад, для асинхронного двигуна [225, 232]:

$$P_{AD} = \eta_{TRM} \cdot 2\pi \cdot M_{AD} \cdot n, \quad (6.4)$$

де: η_{TRM} – КПД трансмісії, M_{AD} – момент на валу АД, Н×м, і враховуючи вирази (6.1), (6.2), (6.3), (6.4), для площини *surge*, отримаємо:

$$H_{pr_surge} = \eta_{TRM} \frac{\int_0^l (|(M_{AD_F_l}(l) - M_{AD_ux}(l))n| - M_{AD_F_l}) dl}{\int_0^l (|(M_{AD_F_l}(l) - M_{AD_ux}(l))n| - M_{AD_F_l}) dl + \sum_{j=1}^n \int_0^l \Delta M_j(l) dl}. \quad (6.5)$$

Аналогічно получимо вирази для розрахунку ефективності АД для двох інших площин:

$$H_{pr_sway} = \eta_{TRM} \frac{\int_0^b (|(M_{AD_F_b}(t) - M_{AD_uy}(t))n| - M_{AD_F_h})dt}{\int_0^b (|(M_{AD_F_h}(t) - M_{AD_uy}(t))n| - M_{AD_F_b})dt + \sum_{j=1}^n \int_0^b \Delta M_j(t)dt}, \quad (6.6)$$

$$H_{pr_yaw} = \eta_{TRM} \left(\frac{\oint_{xy} |(M_{AD_F_z}(t) - M_{AD_uy}(t)) - M_{AD_ux}(t)n|}{\oint_{xy} |(M_{AD_F_z}(t) - M_{AD_uy}(t)) - M_{AD_ux}(t)n| + \sum_{x=y}^x \oint_{xy} \Delta M_{xy}(t)dt} - \right. \\ \left. - \frac{M_{AD_b} dt}{\oint_{xy} |(M_{AD_F_z}(t) - M_{AD_uy}(t)) - M_{AD_ux}(t)n| + \sum_{x=y}^x \oint_{xy} \Delta M_{xy}(t)dt} - \right. \\ \left. - \frac{M_{AD_F_z} dt}{\oint_{xy} |(M_{AD_F_z}(t) - M_{AD_uy}(t)) - M_{AD_ux}(t)n| + \sum_{x=y}^x \oint_{xy} \Delta M_{xy}(t)dt} \right). \quad (6.7)$$

З іншого боку, для перспективних концепцій СЕУ [КПК](#) з гібридними судновими установками з гвинтами протилежного обертання ([CRP](#))[\[243\]](#), що працюють в режимі [DP](#), де переважають гравітаційні сили і діє закон подібності Фруда, для дотримання якого необхідно рівність чисел для моделі і натури, тобто $F_{rM} = F_{rN}$, критерії подібності необхідно висловлювати через характерні для даного режиму величини.

При обтікання корпусу судна водою в якості характерного лінійного розміру вибирають довжину судна між перпендикулярами по ватерлінії і осадку в напрямку потоку, а в якості характерної швидкості – швидкість набігання потоку.

Критерій подібності Фруда для нашого випадку отримуємо із загального

[До змісту](#)

критерію гідродинамічної подібності Ньютона, підставивши в це рівняння силу тяжіння, $G = mg$:

$$\frac{v_{aS}^2}{g_S \cdot l_S} = \frac{v_{aM}^2}{g_M \cdot l_M}, \quad (6.8)$$

де: – v_a – швидкість потоку, що набігає, м/с;
 – g – сила тяжіння, м/с²;
 – l – довжина, м, відповідно ($_S$) – судна і ($_M$) – моделі.

З рівняння (6.8) необхідно отримати основні параметри всіх виникаючих потоків з урахуванням масштабів подібності. Обчислимо, в якій залежності знаходяться швидкості, упори і моменти для моделі і судна в разі моделювання за законом Фруда.

Облік виникнення кавітації здійснюється дотриманням критеріїв подібності F_r , R_e і рівністю чисел E_u для моделі і судна.

Справді, опір судна складається як з опору тертя, так і з хвильового опору, зобов'язаного своїм походженням хвилям, що утворюється на вільній поверхні води під дією сили тяжіння.

Однак в подальшому ЛПР зустрінеться з наступним ускладненням: якщо величина моделі в 100 разів менше величини судна в натурі, то, за рівнянням, для того щоб число Фруда F_r залишилося незмінним, потрібно взяти швидкість v в 10 разів менше швидкості судна в натурі, а щоб число Рейнольдса R_e теж залишилося незмінним, коефіцієнт щільності ρ потрібно взяти в 1000 разів менше коефіцієнта щільності води.

Але, практично цього здійснити не можна, тому при випробуваннях необхідно буде застосувати туж воду, а опір тертя визначати за особливими дослідницькими формулами, а залишковий хвильовий опір перераховувати за законом подібності для ідеальної нестисливої рідини, що знаходиться під дією сили тяжіння.

Опір руху судна залежить від форми корпусу. При дослідженні впливу

форми корпусу необхідно розширити клас рухів і вивчити рух сімейства корпусів, утвореного за деяким законом в залежності від геометричних параметрів, зміна яких характеризує досліджувані геометричні особливості обводів.

Для практики дуже важливо виділити з нескінченного різноманіття параметрів, що характеризують геометричні властивості форми корпусів, такі параметри, які мають визначальне значення для залишкового опору. Експериментальні дослідження у галузі гідродинамічного моделювання показують [59], що для всіляких геометрично неподібних обводів корпусів суден звичайних типів основними параметрами, що визначають коефіцієнт опору, є число Фруда і коефіцієнт гостроти. Замість числа Фруда по довжині можна взяти число Фруда по об'ємній водотоннажності Δ_s :

$$F_{r\Delta} = \frac{v_a}{\sqrt{g^3 \Delta_s}} = F_r \sqrt{\lambda}, \quad (6.9)$$

де λ – коефіцієнт повздовжньої гостроти корпусу (Рис. 6.1) [8].

Якщо для натурних умов і умов випробування моделі прискорення сили тяжіння $g_s \neq g_m$, то з (6.8) виходить:

$$\frac{v_{aS}}{v_{aM}} = \sqrt{\frac{I_s \cdot \rho_1}{I_m \cdot \rho_2}} = \sqrt{\lambda_{SM}}, \quad (6.10)$$

де ρ_1, ρ_2 – щільності середовищ, кг/м^3 , тобто швидкість модельного потоку води повинна бути зменшена в $\sqrt{\lambda_{SM}}$ за умови дотримання критерію Архімеда для натурального середовища і середовища моделювання.

Так, упори гвинтів моделі і судна повинні знаходитися в залежності:

$$\frac{T_s}{T_m} = \frac{n_s \cdot v_{aS}}{n_m \cdot v_{aM}} = \lambda_{SM}^2 \sqrt{\lambda_{SM}} = \lambda_{SM}^{2.5}, \quad (6.11)$$

де n_S , n_M – частоти обертання гребних валів, об/хв; тобто, якщо упор суднового гвинта T_S , то на меншій в l_{SM} раз моделі, упор гвинта повинен бути менше в $\lambda_{SM}^{2,5}$ раз за умови дотримання геометричних критеріїв подібності.

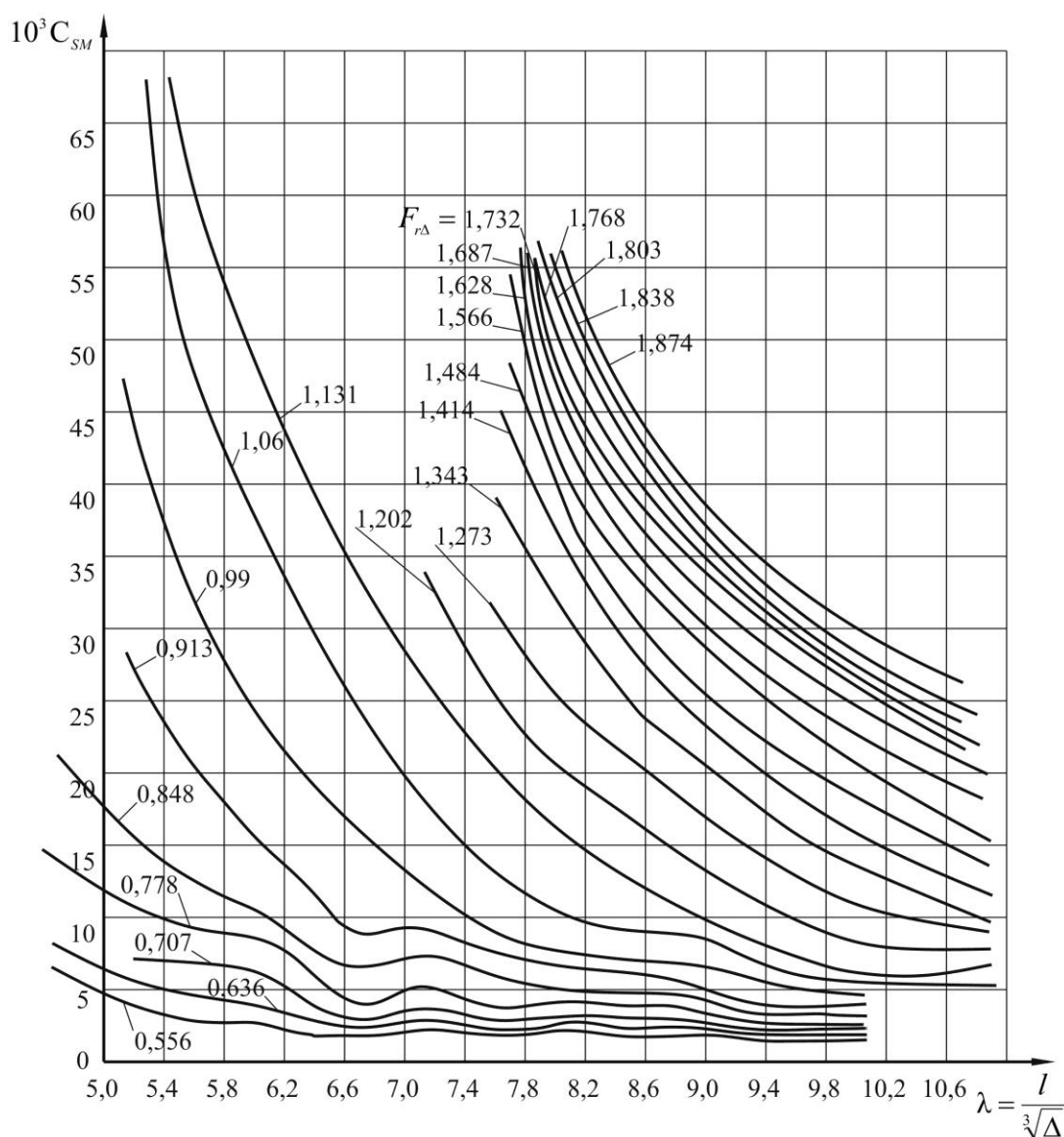


Рис. 6.1 Експериментальні залежності відношень опору на тонну водотоннажності в функції коефіцієнту повздовжньої гостроти корпусу судна і числа Фруда.

Відношення моментів на валах гвинтів, а отже і споживаних

приводними двигунами потужностей, з огляду на співвідношення (6.8), (6.9), (6.10), (6.11), так само:

$$\frac{M_s}{M_M} = \frac{D_{pS} \cdot v_{aS}}{D_{pM} \cdot v_{aM}} = \lambda_{SM}^{2,5} \sqrt{\lambda_{SM}} = \lambda_{SM}^3, \quad (6.12)$$

де D_{pS}, D_{pM} – діаметри гвинтів, м.

Аналогічно через лінійний масштаб можна вивести значення масштабних коефіцієнтів для інших параметрів.

6.2. Об'єднання експертних систем при проектуванні

Окрім перелічених вище невизначеностей при проектуванні, дослідженні та експлуатації СЕУ КПК, можна зауважити на: невизначеності структур і параметрів моделей досліджуваних СЕУ КПК; складнощах системного аналізу і якості оцінювання параметрів моделей; відсутності або недоступності статистичних даних про досліджувані системи, які є частиною об'єму даних з наявними пропусками, імпульсними викидами, збурюючими впливами та похибками (шумами) вимірів; неоднозначності методології досліджень із різноманітними, подекуди невизнаними методам обробки даних або розв'язання задач; неможливості систематизації всіх можливих варіантів комплектації СЕУ КПК, яка впливає із усіх перелічених типів невизначеностей і по суті є зумовленою ними.

Цілі та призначення СППР можна визначити таким чином: створення умов для розуміння проблеми, яку потрібно розв'язати – структуризація проблеми, генерування головної і додаткових задач, визначення існуючих переваг і недоліків, формування критеріїв; допомога у розв'язанні задач –

[До змісту](#)

можливість генерування та вибору різноманітних типів моделей і методів, збір, обробка і підготовка даних, обчислення, оформлення, видача і коригування результатів; допомога при проведенні регресивних аналізів тощо, пояснення вибраних ходів рішення; можливість аналізу аналогічних та альтернативних рішень та доступність результатів [211].

Для функціонального структурування СППР при проектуванні СЕУ КПК здебільш застосовують когнітивний процес (Таблиця 6.1) [136].

Таблиця 6.1

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 <i>m</i> -файли

Логічними кроками при створенні СППР буде деталізація етапів при проектуванні СЕУ КПК, функціональне структурування її архітектури і обґрунтування процесу реалізації. Використовуючи якнайбільш глибокий

аналізу даних, комплексність інженерних знань тощо, зв'язати з відповідними задачами СППР розроблені обчислювальні процедури, після чого сполучити між собою функції і процедури, і, врешті решт, реалізувати всі етапи програмування усіх функціональних модулів системи, включно з розробкою і програмуванням інтерфейсу між ЛПР і СППР.

Отже, роблячи висновок, можна констатувати, що, з точки зору сучасних вимог, сьогодення вимагає створення СППР при проектування і дослідженні СЕУ КПК, яка дасть можливість:

- керувати даними; мати достатню кількість необхідної інформації про прийняті рішення, що приховують вихідні припущення, кількісні та якісні оцінки;
- керувати обчисленням і моделюванням, включаючи в собі гнучкість та можливість генерування DMI-моделей СЕУ і КП;
- мати можливість удосконалення прийнятого рішення, підвищення ефективності СЕУ КПК, типізації та розробки програмних елементів, апробації імітаційних моделей, зіставлення результатів ходових випробувань і лабораторних дослідженнях з теоретичними добутками.

6.3. Синтез розрахункових методів визначення параметрів навантажень і джерел живлення

Для того щоб уявити в дослідженнях СЕУ ДЕПК підсистему СП, необхідно описати її еквівалентний модуль – динамічний функціональний аналог (ДФА), за допомогою якого можна відтворити основні режими роботи СЕУ ДЕПК, адекватні експлуатаційним і аварійним режимам.

Очевидно, що розглянута динамічна модель буде адекватна функціонуванню автономної СЕУ ДЕПК на інтервалі часу $t_{(-)} \leq t_0 \leq t_{(+)}$, якщо

матимуть місце такі нерівності, де індексом « m » позначені координати динамічної моделі:

$$\left. \begin{aligned} |I(t) - I^m(t)| &\leq \varepsilon_I; \\ |U(t) - U^m(t)| &\leq \varepsilon_U; \\ |\varphi(t) - \varphi^m(t)| &\leq \varepsilon_\varphi; \\ k_{puls} &\leq k_{puls_max} \text{ або } k_{puls} \leq k_{THD}. \end{aligned} \right\} \quad (6.13)$$

Щоб нерівності $|I(t) - I^m(t)| \leq \varepsilon_I$ і $|\varphi(t) - \varphi^m(t)| \leq \varepsilon_\varphi$ виконувалися на зазначеному часовому діапазоні $t_{(-)} \leq t_0 \leq t_{(+)}$, функціональний аналог повинен бути пристроєм, що реагує на координатні впливи $I^m(t)$ і $\varphi^m(t)$, а при забезпеченні досить малого ε_U можна вважати, що процес моделювання проходить при таких же напругах досліджуваних джерел енергії (СОДГ і СНЕ), що і в реальних експлуатаційних умовах і тому, при забезпеченні умови $\varepsilon_U \approx 0$, справедливий запис $U(t) = U^m(t)$.

Коефіцієнти несинусоїдальності і пульсацій повинні забезпечуватися відповідним вибором конструктивних параметрів елементів моделі СЕУ [ДЕПК](#).

Оптимізаційні завдання, які вирішуються в автоматизованих СК СЕУ [КПК](#), в загальному випадку є динамічними і можуть бути сформульовані у вигляді:

$$F_{obj_seu_cpc}(x, \delta, y, t) \rightarrow \max_{\delta(t)}, \delta(t) \in U_F; y(t) \in Y_F, \quad (6.14)$$

- 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 доставляє максимум цільової функції $F_{obj_seu_cpc}(x, \delta, y, t)$ при зміні в часі збурюючих впливів $x(t)$. У розгорнутому вигляді завдання (6.14) можна представити таким чином:

$$F_{obj_seu_cpc}(x, \delta, y, t) \rightarrow \max_{\delta(t) \in U} U_F = \{\delta : g(x, \delta, y, t) = 0; \varepsilon(x, \delta, y, t) \geq 0\}, \quad (6.15)$$

де g і ε – задані векторно-значні функції в математичній моделі об'єкта дослідження і обмеження завдання.

Всі співвідношення, що враховуються у завданні (6.15) в якості моделей і обмежень, задаються в класі інтегро-диференціальних рівнянь і нерівностей.

Для об'єкту дослідження СЕУ КПК, як класу складної технологічної системи (СТС) число таких співвідношень зазвичай велике, а векторні змінні мають велику розмірність, що обумовлює високу складність завдань. Рішення подібних завдань в системах розподілу потужності СЕУ КПК, що мають традиційну централізовану структурну організацію, з дотриманням вимог оперативності та точності визначення керуючих рішень часто є утрудненим або зовсім неможливим.

У цих випадках можуть використовуватися методи декомпозиції, що реалізуються в децентралізованих СК з ієрархічною структурою. Методи декомпозиції припускають зведення вихідної складної задачі до сукупності більш простих спільно вирішуваних завдань. У найпростішому випадку – це локальні завдання керування окремими підсистемами, виділеними в складі СТС, які вирішуються на нижньому рівні, і глобальне завдання координації, яке вирішується на верхньому рівні.

Спільне рішення локального та координаційного завдань здійснюється в рамках інтерактивної процедури поміжрівневого обміну даними, при якому в локальних завданнях враховуються задані значення координуючих

параметрів, які обираються в процесі виконання завдання координації. Рішенням завдання координації є такі значення її змінних, при яких рішення локальних задач обумовлюють рішення вихідного завдання на зміну експлуатаційного режиму СЕУ КПК в цілому.

Для локальних задач також може бути застосована дворівнева процедура вирішення. В результаті загальна процедура вирішення вихідної задачі дослідження СЕУ КПК реалізується створенням СК, яка стає багаторівневою. Методи декомпозиції розроблені в основному для статичних задач дослідження, тоді як для динамічних задач вони опрацьовані в значно меншій мірі.

У даній роботі буде застосовано метод декомпозиції для динамічних задач управління СТС, заснований на зведенні вихідної задачі до послідовності статичних задач, що враховують режим, що склався у СЕУ КПК до моменту прийняття керуючих рішень. В результаті, рішення завдання виявляється декомпозиційованим згідно експлуатаційного режиму. При цьому, врахованим режимам можуть відповідати спрощені, часом значно, статичні.

6.4. Підтримка функціональної відповідності процесів задачам проектування

Технології проектування СЕУ **КПК** потребують наступні функції для підтримки прийняття рішень з боку ЛПР:

1. Моделювання процесів передачі потужностей. За допомогою існуючих моделей реальних процесів, або у процесі створення нових, необхідно мати можливість застосовувати, засновані на регресивному підході, підсистеми прогнозування їхнього подальшого протікання і підсистеми синтезу оптимальних та адаптивних рішень, що ґрунтуються на

поточних даних або спостереженнях [229, 256].

2. Композиція експлуатаційних режимів і критеріїв оцінки ефективності СЕУ КПК. За допомогою математичних методів знаходження засобів або правил для автоматичного об'єднання властивостей, що характеризують різні експлуатаційні режими СЕУ КПК для зняття когнітивних обмежень ЛПР.

3. Інформаційне корегування. Читання, збереження та обробка інформації, даних, результатів з використанням інтегрованих комп'ютерних технологій, завдяки чому значно розширюються можливості ЛПР із прийняття рішень і обробки даних.

4. Автоматизація аналізу з можливістю логічних висновків з використанням методів штучного інтелекту і чисельних методів, що дозволить підвищити якість результатів і зменшити час на розв'язок подібних задач у майбутньому.

5. Підтримка представлення результатів із реалізацією функцій доступу до баз даних і знань інших [СППР](#), застосовуючи засоби комп'ютерної графіки та інструментарії мовної обробки.

6. Вдосконалення якості прийняття рішень з метою усунення помилок систематики, що впливають з аналізу та кількісних евристичних розрахунків, за допомогою впровадження статистичних та інших методів корегування результатів з подальшим функціональним проектуванням і вибором конкретних процедур обчислення і аналізу для реалізації кожної функції [СППР](#) у рамках діяльності наявної групи експертів, що її проектують, для усунення зовнішніх і когнітивних обмежень, впливаючих на прийняття рішень.

Наприклад, показник резервування суднових технічних засобів і обладнання можна представити функцією коефіцієнтів резервування, тобто відношенням кількості встановлених на судні об'єктів до необхідної кількості цих об'єктів відповідно до правил Регістру. Кожен з елементів СЕУ КПК вимагає від ЛПР аналізу з позицій оцінки відповідних вимог в залежності від

типу судна, експлуатаційних режимів і району плавання.

Правил реєстрів щодо кількості головних двигунів не встановлюють. Кількість головних двигунів призначається відповідно до технічного завдання на проектування судна, а отже, судновласником, тому доцільно виключити головні двигуни з числа факторів показника резервування.

Кількість основних джерел електричної енергії вибираються за результатами розрахунку потужності суднової електростанції. Крім цього на кожному самохідному судні повинно бути передбачено не менше двох основних джерел енергії (два генератора з приводом від власного джерела енергії; генератор з приводом від власного джерела енергії і валогенератор; генератор з приводом від власного джерела енергії і акумуляторна батарея). Але ж, потужність основних джерел електричної енергії повинна бути такою, щоб при виході з ладу одного джерела залишилися забезпечували можливість живлення відповідальних пристроїв на ходовому, маневровому і аварійному режимах роботи судна.

Тобто, робота судна у режимі, наприклад, утримання позиції, виходячи з цих умов, ніяк не уточняється. В реальності на судах з класом *DP* встановлюється чотири і більше основних джерел електричної енергії. Крім цього правила реєстрів передбачають необхідність установки аварійного джерела електричної енергії поза межами машинно-котельного відділення (МКВ).

Виконані аналізи [107] стосовно суден різного типу дають підстави ЛПР прийняти рішення, що вимоги реєстрів і європейські приписи щодо кількості джерел електричної енергії різняться, тому джерела електричної енергії доцільно включити у число факторів, що впливають на показник резервування.

Відповідно до правил реєстрів на судах з класом *DP* повинен бути передбачений один основний пожежний насос і насос, що входить до баластової системи, за винятком суден довжиною більше 100 м, на яких має бути два основних пожежних насоса і два насоси, що повинні мати

можливість працювати на баластову систему. Крім цього на нафтоналивних і бурових суднах довжиною понад 100 м повинен бути передбачений принаймні один аварійний пожежний насос.

І у цьому випадку виконані аналізи [138] стосовно суден різного типу дозволяє ЛПР прийняти рішення, що вимоги реєстрів і європейські приписи щодо кількості пожежних і баластових насосів неідентичні, тому пожежні і баластові насоси також включаються у число факторів, що впливають на показник резервування.

І нарешті, стосовно осушувальних насосів, на кожному судні повинно бути передбачено не менше двох осушувальних насосів, одним з насосів повинен бути баластовий, включений в осушувальну і баластові системи та працюючий у режимі *DP*. Другий насос може бути баластовим, санітарним, загально-суднового призначення, з водоструминним або пароструйним ежектором і не включатися у процес підрахунку потужності СЕУ. Іншими словами, можна констатувати, що згідно аналізу [23], вимог реєстрів і європейських приписів щодо кількості осушувальних насосів для окремих типів суден, працюючих у режимі *DP*, взагалі не існує на сьогоднішній день, тому осушувальні насоси також включаються до числа факторів, що впливають на показник резервування.

Якісні критерії, з точки зору підтримки відповідності функціональності задачам проектування, які можливо накласти на самих ЛПР, застосовувати не має сенсу, оскільки, у наших реаліях вони є не на часі, зокрема внаслідок не конкурентоспроможності вітчизняних наукових рішень на вітчизняному такі ринку.

Наступним етапом постає висвітлення первинних (вихідних) процесів при проектуванні і дослідженні СЕУ *КПК*, тобто опису фізичних процесів, з якими необхідно буде взаємодіяти ЛПР.

6.5. Технологія реалізації СППР з урахуванням інтелектуальних, поведінкових і когнітивних обмежень ЛПР

Проектування СЕУ КПК з точки зору урахування всіх функціональних обмежень в рамках окремого експлуатаційного режиму представляє собою когнітивний (у синергізмі з інженерним) науково-дослідницький процес прийняття рішення, що включає в себе поетапне удосконалення даних, які надходять від дослідження конкретного експлуатаційного режиму роботи судна і СЕУ у тому ж числі, з сьогоденною технологічно-експлуатаційною базою СППР. Один з етапів розглянуто у попередніх підрозділах.

Сучасні потреби у підтримці прийняття рішень виявлено заздалегідь на етапі обґрунтування вимог до функціональної відповідності процесів задачам проектування. Потреби щодо підтримки прийняття рішення під час проектування СЕУ КПК визначають функціональні обмеження, які повинна обійти ЛПР, що користується СППР.

Наступний етап конкретизує конкретні потреби у підтримці рішення, які інтегруються з розробленими і впровадженими методами у рамках СППР на підставі характеристик досліджуваного експлуатаційного режиму без застосування допоміжних науково-дослідницьких засобів, тобто тільки на базі наявних даних та результатів інших робіт у рамках існуючих СППР. Таким способом досягається перетворення конкретного запиту у підтримці прийняття рішення в функціональний проект СЕУ КПК.

Основним технологічним інструментом, який необхідно мати на цьому етапі, є більш-менш точне обґрунтування і конкретизація технологічної бази СППР, що, у свою чергу, ґрунтується на функціональних якостях і визначених критеріях, розглянутих вище. Математичний апарат, що використовується при проектуванні і реалізації СЕУ КПК у рамках СППР, наведено на Рис. 6.2 [234, 246].



Рис. 6.2 Структура СППР при проектуванні та дослідженні СЕУ КПК

У відповідності до наведеної класифікації (Рис. 6.2) моделювання реальних процесів, систем керування або контролю СЕУ КПК у рамках СППР, що створюється, повинно здійснюватися з можливістю вибору альтернативних рішень, різноманітного інструментарію для інформаційного пошуку, методів автоматизованого аналізу та додатків для представлення результатів, реалізації і підвищення якості прийнятих рішень.

Кожна модель повинна будуватися з урахуванням сучасних методів із можливістю реалізації функцій підтримки. Використання того або іншого методу у межах кожної підсистеми СППР повинно ґрунтуватися на визначених та перевірених критеріях та вимірах, що зумовлюють рівень їхньої адекватності у конкретній комплектації СЕУ КПК. З цього випливає,

[До змісту](#)

що класифікація, представлена на [Рис. 6.2](#), не тільки спрямовує ЛПР у відповідному напрямку, але й конкретизує проблематику з прийняття рішення, яке розглядається при виборі методу дослідження СЕУ КПК для його подальшої реалізації в рамках СППР.

Для оцінки якості проєктованих систем і прийняття технічних рішень необхідно на ранніх етапах проєктування задовго до виготовлення апаратури розташовувати характеристиками системи, що представляють її властивості. З цією метою використовуються моделі процесів і систем, що описують математичні залежності цікавлять проєктувальника характеристик від умов роботи і параметрів пристроїв системи. В процесі проєктування будь-якої складної системи, в тому числі ж КК ТС судна, на різних його етапах використовуються різні види моделей. Спочатку, якщо це можливо, складаються аналітичні моделі задач управління, наприклад у вигляді систем диференціальних рівнянь або логіко-алгебраїчних виразів. Потім вибираються алгоритми, що дозволяють доводити рішення задач до чисельних значень. З цією метою широко використовуються чисельні методи рішень і чисельні моделі задач. Для дослідження на ЕОМ необхідно перевести чисельні моделі в програми н інформаційні масиви, тобто створити інформаційно-програмні моделі.

Такий шлях дослідження, заснований на використанні аналітичних моделей, часто виявляється малопридатним через велику розмірності і складності одержуваних моделей. Тому значне поширення отримали людино-машинні методи імітаційного моделювання складних систем.

Імітаційні моделі реалізуються на ЕОМ з використанням універсальних алгоритмічних мов високого рівня АЛГОЛ, ФОРТРАН або мов системного моделювання (СЛЕНГ, СИМУЛА і ін.) і діалогових засобів спілкування. Імітаційне моделювання полягає в проведенні експериментів з моделлю, представленої у формі сукупності алгоритмів, що описують поведінку системи, шляхом прогонів побудованих на їх основі програм на деякій множині даних.

Основною перевагою імітаційного моделювання є його універсальність і можливість забезпечення високої адекватності досліджуваної моделі реальної системи. Це досягається за рахунок глибокої деталізації алгоритмічного опису, що неможливо при дослідженні аналітичними методами, які пов'язані з спрощеннями процесів і жорсткими обмеженнями на умови використання моделі.

Так, наприклад, спроба врахувати в моделі вплив випадкових чинників призводить при аналітичному дослідженні систем до значних труднощів, які не завжди вдається подолати. Імітаційне моделювання при дослідженні систем в умовах випадкових впливів не викликає ускладнень і є в даний час найбільш ефективним, а часом і єдиним практично доступним засобом отримання інформації про поведінку системи особливо на стадії її проектування.

Використовувані в процесі проектування КК ТС судна моделі можна розділити на класи, кожному з яких відповідає певна мета дослідження при проектуванні.

До класу динамічних моделей належать моделі, що представляють математичний опис процесів, що розвиваються у часі. Ці моделі широко використовуються при проектуванні різних систем управління. Математична форма моделі залежить від прийнятого способу вимірювання координат стану об'єкта і часу. У зв'язку з цифровою реалізацією систем управління все більшу питому вагу набувають дискретно-безперервні моделі, що представляють процеси в дискретному часі у формі різницевих рівнянь.

Оптимізація процесів є однією з основних задач проектування будь-якої системи управління. Моделі і методи оптимізації, що використовуються в процесі проектування КК ТС судна, визначаються змістом конкретних завдань управління, засобами дослідження і технічної реалізації пристроїв системи.

Методи класичного і «розширеного» варіаційного обчислення знайшли широке застосування в аналітичному конструюванні регуляторів. Багато задач по визначенню оптимальних значень параметрів управління можуть бути вирішені з використанням принципу максимуму Понтрягіна. Таким методом, наприклад, може бути вирішена задача побудови оптимальної за швидкістю системи, що забезпечує перехід судна на заданий курс в умовах існуючих обмежень на дії.

У зв'язку з використанням ЕОМ великий розвиток отримали моделі і методи оптимізації, засновані на принципах математичного програмування. Так, в системах управління з ЕОМ високою ефективністю володіють алгоритми оптимізації траєкторії руху судна при розбіжності із зустрічними об'єктами, засновані на принципах динамічного програмування. Завдання і методи оптимізації знайшли широке висвітлення в літературі.

Використання імовірнісних моделей обумовлено необхідністю обліку в процесі проектування систем різноманітних випадкових факторів, які в багатьох випадках роблять визначальний вплив на характеристики системи.

Так, наприклад, облік випадкового характеру надходження запитів від численних пристроїв необхідний при визначенні необхідної продуктивності процесорів керуючого комплексу. Випадкові значення вимірюваних в процесі управління величин є причиною недетермінованного числа операцій, які виконуються процесором при реалізації алгоритмів керування.

При проектуванні мікропроцесорних КК особливо важливу роль набувають моделі масового обслуговування, що дозволяють визначати необхідну продуктивність пристроїв обробки інформації і пропускну здатність каналів зв'язку, раціональну послідовність робіт в системі і розробляти алгоритми управління ресурсами комплексу.

До дискретних моделей відносять графові і алгебраїчні моделі, призначені для подання повної моделі функціонування складної системи при імітаційному моделюванні на ЕОМ.

У зв'язку з наявністю великої літератури, присвяченій різним питанням математичного опису систем управління, в подальшому будуть розглянуті лише завдання побудови і дослідження моделей масового обслуговування, що безпосередньо використовуються при проектуванні мікропроцесорних КК.

КК ТС судна складаються з великої кількості різноманітних пристроїв і систем і характеризуються наявністю численних зовнішніх і внутрішніх випадкових впливів. Випадковий характер носять ветроволнове обурення, зміни гідродинамічних характеристик судна, пов'язані з обростанням корпусу, виникнення відмов елементів систем, що вимагають локалізації несправностей для запобігання розвитку аварійних ситуацій, та ін. У зв'язку з цим потреби в рішенні окремих завдань обробки інформації і час вирішення цих завдань мають також випадковий характер.

Незважаючи на те, що багато завдань обробки інформації, пов'язані з контролем і управлінням ТЗ судна, носять циклічний характер, випадкові впливу на УО призводять до того, що звернення до пристроїв, які виконують різні функції контролю і управління, в загальному випадку не є регулярним. Випадковою величиною є і час, що витрачається процесором на обробку інформації в процесі управління, так як алгоритми вирішення завдань мають розгалуження, містять цикли. Число процесорних операцій, що виконуються при реалізації подібних алгоритмів, залежить від випадкових значень вимірюваних величин.

Все це обумовлює необхідність використання імовірнісних моделей при проектуванні КК. Такі моделі необхідні як при описі процесів виконання окремих алгоритмів задач, так і при описі систем, що виконують певну сукупність завдань контролю і управління.

В якості моделі функціонування систем, призначених для вирішення певної сукупності обчислювальних задач в процесі управління корабельними об'єктами, можуть бути використані моделі масового обслуговування.

[До змісту](#)

Виникаючі в процесі управління потреби обробки інформації процесором утворюють потоки заявок $Z_1, Z_2, \dots, Z_m$, які відповідають різним обчислювальним завданням $a_1, a_2, \dots, a_m$ і вимагають виконання процесором відповідних робочих програм $P_1, P_2, \dots, P_m$. Якщо процесор вільний в момент надходження заявки, то викликається до дії відповідна робоча програма, виконання якої і є обслуговуванням заявки. Якщо заявка надходить в момент зайнятості процесора обслуговуванням будь-якої іншої заявки, то знову надійшла заявка аналізується і в залежності від прийнятої дисципліни обслуговування і пріоритетності завдання або відразу ж передається на обслуговування в процесор, який в цьому випадку перериває рішення раніше надійшла завдання, або встановлюється в чергу на обслуговування. При безпріоритетному обслуговуванні моделлю системи є система масового обслуговування (СМО) із загальною чергою, при обслуговуванні з пріоритетами - СМО з індивідуальними чергами.

Магістральна структура КК ТС судна і організація розподілених обчислювальних процесів, при яких завдання поділяються на окремі етапи, що виконуються різними процесорами, вимагають подання моделі функціонування КК у вигляді системи взаємодіючих СМО - стохастичною мережі. При цьому окремі системи, що входять в мережу, можуть бути одноканальними або багатоканальними СМО.

Завданням дослідження моделей є оцінка характеристик і вибір параметрів, що забезпечують необхідну якість функціонування проектованого комплексу. Такі дослідження можуть проводитися на основі аналітичних моделей або шляхом імітаційного (програмного) моделювання.

Аналітичні моделі, засновані на застосуванні апарату теорії масового обслуговування, використовуються на початкових етапах проектування. Такі моделі дозволяють визначати орієнтовні параметри пристроїв і організацію робіт в системі для забезпечення необхідних характеристик функціонування.

Більш точні оцінки характеристик системи отримують шляхом імітаційного моделювання із залученням методу статистичних випробувань (методу Монте-Карло). Такі дослідження є складним трудомістким процесом, що вимагає розробки спеціальних програмних засобів моделювання на ЕОМ. Імітаційне моделювання, як правило, проводиться при проектуванні систем, структура яких змінюється в широких межах.

Дослідження аналітичних моделей є значно менш трудомістким процесом і дозволяє отримувати приблизні оцінки характеристик системи з достатньою для ранніх стадій проектування точністю.

Функціонування будь-якої системи масового обслуговування характеризується рядом показників: середнім часом перебування заявки в системі; середнім числом заявок, що знаходяться в системі; середнім числом заявок, що знаходяться в черзі; середнім часом перебування заявок в черзі і ін. Значення цих показників залежать від організації системи, параметрів її пристроїв і параметрів потоків заявок.

Моделі масового обслуговування встановлюють співвідношення, що зв'язують характеристики системи з основними її параметрами. Прийняття низки припущень про параметри вхідних потоків і характер їх обслуговування дозволяє побудувати такі моделі масового обслуговування, які піддаються аналітичному дослідженню. Це в першу чергу відноситься до марківських систем, що займають в теорії масового обслуговування таке ж місце, як лінійні системи в теорії автоматичного регулювання.

Найбільш поширеним припущенням, що призводить до марківської моделі масового обслуговування, є припущення про найпростішому (пуассоновському) характері потоків заявок і законів обслуговування в системі.

Найпростішим називають потік подій, що володіє трьома властивостями: ординарністю, відсутністю післядії і стаціонарністю. Такий потік підпорядковується пуассонівським законом розподілу

[До змісту](#)

$$P_n(\tau) = (\lambda \tau)^n e^{-\lambda \tau} / n!$$

де $P_n(\tau)$ - ймовірність появи n однорідних подій в інтервалі часу τ ; λ - постійне позитивне число, що визначає середнє число подій в одиницю часу.

Інтервали часу між подіями найпростішого потоку розподілені по показовому (експоненціального) закону:

$$F(t) = P\{T \leq t\} = 1 - e^{-\lambda t}$$

з щільністю розподілу ймовірності

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

математичним очікуванням

$$M(t) = \int_0^{\infty} t^2 f(t) dt = 1 / \lambda$$

і дисперсією

$$D(t) = \int_0^{\infty} t^2 f(t) dt = 1 / \lambda^2$$

У найпростішому потоці заявки мають тенденцію групуватися в області коротких інтервалів, так як

$$P\{\tau < 1 / \lambda\} = 1 - e^{-1} \approx 0.63,$$

тобто велика частина заявок слід одна за одною з інтервалом, меншим за середнє значення $1 / \lambda$. Отже, такий потік створює найбільш важкий режим роботи системи в порівнянні з іншими потоками тієї ж інтенсивності. Тому припущення про пуассонівський характер потоків заявок є цілком прийнятним, так як призводить до визначення граничних значень характеристик якості обслуговування.

Розглядаючи ймовірність настання n подій в інтервалі dt і здійснюючи граничний перехід при $dt \rightarrow 0$, найпростіший потік можна описати лінійними диференціальними рівняннями

$$P'_0(\tau) = -\lambda P_0(\tau); \quad (6.16)$$

$$P'_n(\tau) = -\lambda P_n(\tau) + \lambda P_{n-1}(\tau) \quad (6.17)$$

які дозволяють досліджувати пуассонівський потік за допомогою методів теорії марківських процесів.

Марківським процесом називається такий процес, майбутній стан якого визначається тільки справжнім станом і не залежить від попереднього стану. Марківський процес з дискретними станами називається марківським ланцюгом. Стану такого процесу можна пронумерувати і позначити через $S_0, S_1, S_2, \dots$, а зміна станів у часі уявити послідовністю (ланцюгом) $S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow \dots$. Для опису марківського процесу досить вказати початковий стан і задати матрицю ймовірностей переходів $P = \| p_{ij} \|$, де p_{ij} - ймовірність переходу зі стану S_i в стан S_j

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} S_0 & S_1 & S_2 & \cdots & S_k \end{matrix} \\ \begin{matrix} S_0 \\ S_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ S_k \end{matrix} & \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} & P_{02} & \cdots & P_{0k} \\ P_{10} & P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ P_{k0} & P_{k1} & P_{k2} & \cdots & P_{kk} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (6.18)$$

Для однорідного марківського процесу, в якому вірогідність переходів не залежить від часу $p_{ij}(t) = \text{const}$, має місце наступне очевидне співвідношення:

[До змісту](#)

$$P_j(k+1) = \sum_i P_i(k) p_{ij},$$

або у векторній формі

$$P(k+1) = P(k)P,$$

з якого випливає

$$P(i+k) = P(i)P^k.$$

Для уявлення пуассонівського потоку у вигляді марківського процесу позначимо стан системи, що характеризуються різною кількістю заявок, що надійшли, через S_i , де $i = 0, 1, 2$,

В цьому випадку матриця P буде складатися з ймовірностей переходів (зміни стану) за час dt . При цьому рядки матриці відповідають станам в момент часу t , а стовпці - в момент $t + dt$.

З огляду на, що ймовірність появи однієї заявки в найпростішому потоці на інтервалі dt дорівнює $P_1(dt) = \lambda dt$, а ймовірність не появи заявки - дорівнює $P_0(dt) = 1 - \lambda dt$, і нехтуючи величинами $p_{i,i+k}$ при $k > 1$, що мають порядок малості менший,

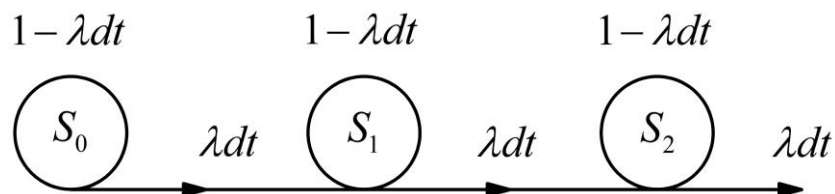


Рис. 6.3 Граф переходів марківського ланцюга, який представляє простіший потік

ніж dt , отримуємо матрицю ймовірностей переходів пуассонівського потоку у вигляді

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} S_0 & S_1 & S_2 & \dots & S_k \end{matrix} \\ \begin{matrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ S_k \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1-\lambda dt & \lambda dt & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1-\lambda dt & \lambda dt & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1-\lambda dt & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1-\lambda dt \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (6.19)$$

На [Рис. 6.6](#) представлений граф переходів такого потоку.

Подання потоків у вигляді марківських ланцюгів - процесів з дискретними станами $S_0, S_1, S_2, \dots$ і безперервним часом t дає можливість досліджувати СМО за допомогою методів теорії марківських процесів, що дозволяють отримувати кінцеві аналітичні вирази для розрахунку характеристик систем. Розглянемо порядок розрахунку характеристик системи на прикладах найпростіших СМО, що входять в модель КК.

6.5.1. Одноканальні СМО з очікуванням

Такі системи є моделлю однопроцесорних систем, що входять в КК. Розглянемо випадок, коли на вхід системи надходить пуассонівський потік однорідних заявок з інтенсивністю λ , час обслуговування яких розподілено за експоненціальним законом з показником μ . Позначимо через S_i стан системи, коли в ній знаходиться i заявок. В інтервалі $[t, t+dt]$ імовірності переходів визначаються матрицею:

$$P = \begin{matrix} & S_0 & S_1 & S_2 & S_3 & \dots & S_k \\ \begin{matrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ S_k \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1-\lambda dt & \lambda dt & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \lambda dt & 1-(\lambda+\mu)dt & \lambda dt & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mu dt & 1-(\lambda+\mu)dt & \lambda dt & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \mu dt & 1-(\lambda+\mu)dt & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1-\lambda dt \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (6.20)$$

Імовірність відсутності приходу заявок протягом інтервалу $[t, t+dt]$, яка визначає ймовірність переходу $S_0 \rightarrow S_0$, дорівнює $1-\lambda dt$. Імовірність переходу $S_i \rightarrow S_{i+1}$ визначається ймовірністю приходу однієї заявки і дорівнює λdt . Імовірність переходу визначається ймовірністю обслуговування за час dt однієї заявки. При експоненціальному законі обслуговування ця ймовірність дорівнює $\mu e^{-\mu dt} \approx \mu dt$. З огляду на, що $\sum_j p_{ij} = 1$ і $p_{i,i+k} = 0$ при $k > 1$, отримуємо ймовірність переходу $S_i \rightarrow S_i$ рівній $1-(\lambda+\mu)dt$. Граф переходів такої системи представлений на [Рис. 6.4](#).

Рівняння Колмогорова, що описують стан системи, мають вигляд

$$P(t+dt) = P(t)P,$$

або

$$P_0(t+dt) = (1-\lambda dt)P_0(t) + \mu dt P_1(t); \quad (6.21)$$

$$P_i(t+dt) = \lambda dt P_{i-1}(t) + [1-(\lambda+\mu)dt]P_i(t) + \mu dt P_{i+1}(t).$$

Після перетворень отримуємо рівняння станів у вигляді

$$P'_0(t) = -\lambda_0 P_0(t) + \mu P_1(t);$$

$$P'_i(t) = \lambda P_{i-1}(t) - (\lambda + \mu)P_i(t) + \mu P_{i+1}(t), \quad i = 1, 2, \dots \quad (6.22)$$

Ставлячи початкові умови стану системи і вирішуючи ці рівняння (наприклад, з використанням перетворення Лапласа), можна визначити залежність зміни ймовірностей станів від часу. Однак в більшості випадків цікаві значення характеристик системи в сталому стані. З цією метою для визначення сталих ймовірностей необхідно в рівняннях станів похідні прирівняти нулю. В результаті система алгебраїчних рівнянь матиме вигляд

$$\lambda P_0 = \mu P_1;$$

$$(\lambda + \mu)P_i = \lambda P_{i-1} + \mu P_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots$$

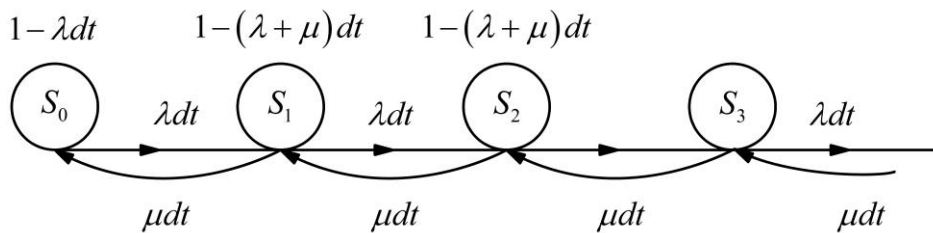


Рис. 6.4 Граф переходів одноканальної СМО

З рішення цих рівнянь визначаємо

$$P_1 = (\lambda / \mu)P_0; \quad P_i = (\lambda / \mu)^i P_0, \quad i = 1, 2, \dots$$

Враховуючи що $\sum_{i=1}^{\infty} P_i = 1$, при $\lambda < \mu$ отримаємо

$$P_0 = 1 - \lambda / \mu; \quad P_i = (1 - \lambda / \mu)(\lambda / \mu)^i, \quad i = 1, 2, \dots$$

Вводячи позначення $\rho = \lambda / \mu$, можна записати

$$P_i = (1 - \rho)\rho^i, \quad i = 1, 2, \dots \quad (6.23)$$

Величина ρ називається завантаженням системи і визначає коефіцієнт використання обслуговуючого приладу. Для існування стаціонарного режиму необхідно, щоб виконувалася умова $\rho < 1$. В іншому випадку чергу зростає необмежено, так як середній інтервал обслуговування заявок $1/\mu$ більше середнього інтервалу між вступниками заявками $1/\lambda$. Середнє число заявок в системі дорівнює

$$\bar{n} = \sum_{n=0}^{\infty} nP_n = \sum_{n=0}^{\infty} n(1-\rho)\rho^n = (1-\rho)(\rho + 2\rho^2 + 3\rho^3 + \dots) = \rho / (1-\rho). \quad (6.24)$$

Так як середнє число заявок, що знаходяться на обслуговуванні в системі, так само ρ , отримаємо середнє число заявок, що знаходяться в черзі

$$l_0 = \bar{n} - \rho / (1-\rho) - \rho = \rho^2 / (1-\rho).$$

Середній час перебування заявки в системі дорівнює відношенню середнього числа заявок в системі до середнього числа заявок, що проходять через систему в одиницю часу. Остання величина в стаціонарному режимі дорівнює λ . Тому середній час перебування заявки в системі дорівнює

$$U = \frac{\bar{n}}{\lambda} = \frac{\rho}{\lambda(1-\rho)} = \frac{1}{\mu(1-\rho)}. \quad (6.25)$$

Середній час очікування в черзі однією заявкою визначається аналогічно:

$$W = \frac{l_0}{\lambda} = \frac{\rho^2}{\lambda(1-\rho)} = \frac{\rho}{\mu(1-\rho)}.$$

Приклад. Розглянемо МПС, що входить в КК і призначену для первинної обробки вхідної інформації.

Система здійснює контроль правильності прийому вхідної інформації і фільтрацію для виявлення корисних сигналів на тлі перешкод, що надходять від різних УО. Обробка здійснюється за запитами периферійних пристроїв і локальних систем комплексу, що надходять в систему в середньому через час $\tau = 0,05$ с. Середній обсяг надходять на обробку даних $d = 4$ байт. Середнє число процесорних операцій, що виконуються при реалізації алгоритму обробки інформації, становить $\theta = 8000$ операцій.

Визначимо середній час, що витрачається системою на виконання завдання (від моменту надходження запиту до видачі результатів в магістраль), і орієнтовний обсяг ОЗП, необхідний для зберігання надходять на обробку даних.

Модель розглянутої системи представляється у вигляді одноканальної СМО, на вхід якої надходить потік заявок з інтенсивністю $\lambda = 1/\tau = 20$ 1/с. При заданому швидкодії процесора середній час обробки інформації становить $\vartheta = \theta / B = 0,04$ с.

Визначимо параметри моделі масового обслуговування, що представляє дану систему, і її характеристики при допущенні про пуассонівському потоці заявок і експоненціальному законі обслуговування.

Інтенсивність обслуговування заявок і завантаження процесора системи складають $\mu = 1/\vartheta = 25$ 1/с; $\rho = \lambda / \mu = 0,8$. Отримане значення $\rho = 0,8$ показує, що в системі не відбувається необмеженого накопичення черги, т. е. існує стаціонарний режим, який характеризується деяким середнім числом заявок в системі.

Визначимо середній час перебування заявки в системі

[До змісту](#)

$$U = \frac{1}{\mu(1-\rho)} = \frac{1}{25(1-0,8)} 0,2 \text{ с.}$$

Отримані значення $\vartheta = 0,04$ і $U = 0,2$ с показують, що із загального часу перебування заявок в системі більшу частину становить час очікування початку обслуговування $W = U - \vartheta = 0,2 - 0,04 = 0,16$ с. Це пов'язано з великим завантаженням процесора $\rho = 0,8$. При необхідності скорочення середнього часу перебування заявок в системі потрібно зменшити завантаження процесора,

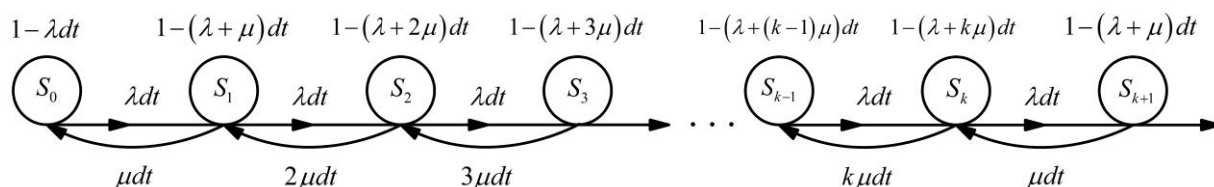


Рис. 6.5 Граф переходів багатоканальної СМО

вибравши його з великим швидкодією, або перейти до мультипроцесорної системи.

Орієнтовна оцінка обсягу ОЗП, необхідного для зберігання надходять на обробку даних, може бути отримана у вигляді

$$V = \bar{n}d ,$$

де $\bar{n}$ - середнє число заявок, що знаходяться в системі; d - обсяг даних, що надходять в систему на обробку;

$$\bar{n} = \rho / (1 - \rho) = 0,8 / (1 - 0,8) = 4; \quad V = 4 * 4 = 16 \text{ байт.}$$

При необхідності більш точної оцінки необхідного обсягу ОЗП розрахунок проводиться з урахуванням допустимої ймовірності перевищення чергою розрахункового значення (допустимого ризику втрати заявки).

6.5.2. Багатоканальні СМО.

Ці системи являють собою моделі мультипроцесорних систем, в яких кожен процесор може виконувати будь-яке завдання в міру виникнення потреби в них.

Розглянемо випадок, коли в системі є k однакових обслуговуючих приладів з інтенсивністю μ . Отримаємо вирази, що описують характеристики системи при пуассонівському входному потоці і експоненціальному часі обслуговування. З цією метою представимо систему у вигляді марківського процесу з станами $S_0, S_1, \dots, S_{k+r}$, які відповідно означають, що в системі відсутні заявки (в черзі і на обслуговуванні), в системі знаходиться на обслуговуванні одна заявка і в черзі заявок немає, в системі знаходиться k заявок на обслуговуванні і r заявок в стані очікування.

Матриця переходів такої системи має вигляд

$$P = \begin{matrix} & S_0 & S_1 & S_2 & S_3 & \dots & S_{k-1} & S_k & S_{k+1} \\ \begin{matrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_{k-1} \\ S_k \\ S_{k+1} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1-\lambda dt & \lambda dt & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \mu dt & 1-(\lambda+\mu)dt & \lambda dt & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\mu dt & 1-(\lambda+2\mu)dt & \lambda dt & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1-[\lambda+(k-1)\mu]dt & \lambda dt & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \mu k dt & 1-(\lambda+k\mu)dt & \lambda dt \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \mu k dt & 1-(\lambda+k\mu)dt \end{bmatrix} \end{matrix}$$

(6.26)

Диференціальні рівняння ймовірностей переходу матимуть вигляд

$$P'_0(t) = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t);$$

$$P'_n(t) = \lambda P_{n-1}(t) - (\lambda + n\mu)P_n(t) + (n+1)\mu P_{n+1}(t), \quad 1 \leq n \leq k;$$

$$P'_n(t) = \lambda P_{n-1}(t) - (\lambda + k\mu)P_n(t) + k\mu P_{n+1}(t), \quad n \geq k.$$

Розглянемо усталений режим системи. Вважаючи $P_n(t) = 0, \quad n = 0, 1, \dots, k$, отримаємо

$$\lambda P_0 = \mu P_1;$$

$$(\lambda + n\mu)P_n = \lambda P_{n-1} + (n+1)\mu P_{n+1}, \quad 1 \leq n \leq k;$$

$$(\lambda + k\mu)P_n = \lambda P_{n-1} + k\mu P_{n+1}, \quad n \geq k;$$

$$P_n = P_0(k^k / k!)(\rho / k)^n, \quad n \geq k.$$

З цих виразів, маючи на увазі, що $\sum_{n=0}^{\infty} P_n = 1$, знайдемо

$$P_0 = \left[\sum_{n=0}^{k-1} \frac{\rho^n}{n!} + \sum_{n=k}^{\infty} \frac{k^k}{k!} \left(\frac{\rho}{k} \right)^n \right]^{-1} = \left[\frac{\rho^k}{k!(1-\rho/k)} + \sum_{n=0}^{k-1} \frac{\rho^n}{n!} \right]^{-1}. \quad (6.27)$$

Визначимо середнє число заявок в черзі

$$l_0 = \sum_{n=k+1}^{\infty} (n-k)P_n = \sum_{n=k+1}^{\infty} (n-k) \frac{\rho^n}{k^n} \frac{k^k}{k!} P_0,$$

або

$$l_0 = \frac{k^k (\rho/k)^k (\rho/k)}{k!(1-\rho/k)^2} P_0 = \frac{\rho^k (\rho/k)}{k!(1-\rho/k)^2} P_0 = \frac{\rho^{k+1}}{(k-1)(k-\rho)^2} P_0. \quad (6.28)$$

Величина $\rho = \lambda / \mu$ в багатоканальній системі являє собою середнє число зайнятих обслуговуванням приладів. Тому загальне середнє число

$$\text{заявок в системі } \bar{n} = l_0 + \rho = \frac{\rho^{k+1}}{(k-1)(k-\rho)^2} P_0 + \rho.$$

Середній час перебування заявки в системі і середній час очікування в черзі визначаються виразами

$$U = \frac{\bar{n}}{\lambda} = \frac{P_0}{\mu} \frac{\rho}{(k-1)!(k-\rho)^2}.$$

Розглянемо двохпроцесорну МПС, що входить до складу КК, що виконує функції контролю працездатності та технічного діагностування систем комплексу.

Система виконує завдання контролю чотирьох типів об'єктів, які потребують реалізації алгоритмів трудомісткістю $\theta_1 = 8000$ операцій, $\theta_2 = 10\,000$ операцій, $\theta_3 = 20\,000$ операцій, $\theta_4 = 6000$ операцій. Завдання контролю пристроїв системи виконуються за їх запитами, який формується в паузах роботи цих пристроїв. Середні інтервали між запитами становлять $\tau_1 = 0,2$ с, $\tau_2 = 0,4$ с, $\tau_3 = 0,5$ с, $\tau_4 = 0,1$ с.

Визначимо середній час, що витрачається системою на виконання одного завдання при використанні в системі однакових процесорів з швидкодією $U = 2 \cdot 10^5$ операцій / с кожен. Моделлю системи є двоканальна СМО (рис. 6.7), на вхід якої надходить сумарний потік з інтенсивністю

$$\Lambda = \sum_i \lambda_i = \sum_i (1 / \tau_i) = 5 + 2.5 + 2 + 10 = 19.5 \text{ 1 / с.}$$

Середня трудомісткість алгоритмів розв'язання задач в такому потоці становить

$$\theta = \sum_i (\lambda_i / \Lambda) \theta_i = 8460 \text{ операцій.}$$

Середня тривалість обслуговування заявки процесором з швидкодією $B = 2 \cdot 10^5$ операцій / с дорівнює $\mathcal{G} = \theta / B = 0,0423$ с, інтенсивність обслуговування заявок одним процесором $\mu = 1 / \mathcal{G} = 23,64$. Завантаження процесора в багатоканальній системі визначається виразом

$$R = \Lambda / \mu_{\Sigma} = \rho / N,$$

де $\mu_{\Sigma} = N\mu$ - сумарна інтенсивність обслуговування заявок N -процесорної системою. Тоді $\rho = \Lambda / \mu = 0.825$; $R = 0.825 / 2 = 0.412$.

Для визначення середнього часу перебування завдання в системі розрахуємо ймовірність відсутності заявок в системі

$$P_0 = \left[\frac{\rho^N}{N!(1-\rho)} + \sum_{n=0}^{k-1} \frac{\rho^n}{n!} \right]^{-1} = \left[\frac{(0.825)^2}{2(1-0.412)} + 1 + 0.412 \right]^{-1} = 0.5. \quad (6.29)$$

Середній час перебування заявок в системі

$$U = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\rho^2}{(N+1)!(N-\rho)^2} P_0 + 1 \right] = \frac{1}{23.64} \left[\frac{(0.825)^2}{2 \cdot 3(2-0.825)^2} \cdot 0.59 + 1 \right] = 0.06.$$

Експонентні стохастичні мережі. Для подання повних моделей КК, що відображають взаємодію входять до нього пристроїв і систем, використовуються мережі СМО. Складність аналізу таких моделей полягає в тому, що найпростіший потік заявок, що надходить на вхід системи, на виході в загальному випадку має післядію, тому методи розрахунку, засновані на

використанні апарату марківських ланцюгів не можуть бути застосовані. Однак якщо всі прилади мережі мають експоненціальний час

обслуговування, то виходячі з СМО потоки заявок будуть пуассонівськими. Такі мережі називають експонентними (показовими).

Для завдання будь-якої мережі СМО необхідно визначити: джерело заявок, що надходять в мережу, що має деяку інтенсивність λ_0 ; число систем обслуговування m , що входять в мережу; вектор складу обслуговуючих систем $K = (k_1, k_1, \dots, k_m)$, де k_i - число обслуговуючих приладів i -й СМО; вектор інтенсивностей обслуговування $M = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m)$, де μ_i - інтенсивність обслуговування заявок одним приладом i -й СМО; матрицю передач B , що представляє ймовірності надходження заявок з однієї системи в іншу.

При побудові матриці передач B джерело заявок можна розглядати як деяку систему S_0 . Заявки, що виходять з i -й системи ($i = 1, 2, \dots, m$), з постійною ймовірністю B_{ij} надходять в J -ю систему ($J = 1, 2, \dots, m$) або залишають мережу ($J = 0$). В цьому випадку матриця передач має вигляд

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \beta_{01} & \beta_{02} & \cdots & \beta_{0m} \\ \beta_{10} & \beta_{11} & \beta_{12} & \cdots & \beta_{1m} \\ \beta_{20} & \beta_{21} & \beta_{22} & \cdots & \beta_{2m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\ \beta_{m0} & \beta_{m1} & \beta_{m2} & \cdots & \beta_{mm} \end{bmatrix}. \quad (6.30)$$

Для визначення пропускної здатності мережі необхідно визначити інтенсивності заявок в кожній з систем. У зв'язку з тим що в сталому режимі середнє число заявок, які покидають систему, дорівнює середньому числу заявок, справедливо рівність

$$\lambda_i = \sum_{j=0}^m \lambda_j \beta_{ij}, \quad j = 0, 1, 2, \dots, m.$$

Вирішуючи систему рівнянь, яка в матричній формі має вигляд $\lambda = \lambda B$, можна визначити інтенсивності потоків в системах мережі $\lambda_i = \alpha_i \lambda_0$, де λ_0 - інтенсивність вхідного потоку. Величина α_i названа коефіцієнтом передач, визначає середнє число попадання заявки вхідного потоку в i -ю систему.

Для забезпечення стаціонарного режиму мережі необхідно, щоб в кожній з систем, що входять в мережу, існував стаціонарний режим, т. Е. Виконувалася умова

$$\rho_i = \lambda_i / (k_i \mu_i) < 1,$$

де k_i - число обслуговуючих приладів i -ї системи.

У зв'язку з тим що накопичення черги відбувається в найбільш завантаженій системі, що має максимальне значення ρ „ умовою існування стаціонарного режиму мережі є

$$\max_i \frac{\lambda_i}{k_i \mu_i} = \max_i \frac{\alpha_i \lambda_0}{k_i \mu_i} < 1,$$

або

$$\lambda_0 < \max_i \frac{k_i \mu_i}{\alpha_i}.$$

Знаючи коефіцієнти передачі системи α_i і характеристики, систем U_i і W_i можна визначити характеристики мережі

$$U = \sum_{i=1}^m \alpha_i U_i; \quad W = \sum_{i=1}^m \alpha_i W_i. \quad (6.31)$$

Керуючий комплекс складається з двох мікропроцесорних систем МПС1 і МПС2, взаємодіючих між собою і з зовнішнім запам'ятовуючим пристроєм ВЗУ через загальну магістраль. Алгоритми управління об'єктами різні. Одні з них повністю реалізуються МПС1, інші вимагають додаткових

трудомістких обчислень, виконуваних трьохпроцесорною системою МПС2, і використання статистичних даних, що зберігаються в ВЗУ.

Трудомісткість алгоритмів, що виконуються системами МПС1 і МГ1С2, становить $\theta_1 = 2000$ операцій, $\theta_2 = 10\,000$ операцій. Системи мають однакові процесори з швидкодією $B_{пр} = 2 \cdot 10^5$ операцій / с. У загальній магістралі комплексу проводиться послідовна передача інформації зі швидкістю $B_M = 2 \cdot 10^5$ біт / с. Середня довжина повідомлень становить $b = 500$ біт. Швидкодія ЗЗП $B_{ззп} = 10^4$ біт / с, середній обсяг обраних даних $d = 200$ біт. Потрібно визначити гранично допустиму сумарну інтенсивність виконання завдань в КК при заданій продуктивності пристроїв і розрахувати середній час виконання завдання управління при інтенсивності вхідного потоку $\Lambda_0 = 8$ 1 / с.

Модель КК представляється у вигляді стохастичною мережі. Ймовірності передач, які визначаються з аналізу відтворюємих алгоритмів, задані матрицею передач

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} S_0 & S_1 & S_2 & S_3 & S_4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0 & 0.4 & 0.2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}. \quad (6.32)$$

Для розрахунку мережі необхідно визначити коефіцієнти передачі та характеристики СМО, які утворюють мережу. Коефіцієнти передачі визначаємо з рівнянь

$$\lambda_i = \sum_{j=0}^M p_{ij} \lambda_j, \quad j = 1, 2, \dots, M;$$

$$\begin{aligned}
\lambda_1 &= \lambda_0 + p_{21}\lambda_2; & \lambda_1 &= \lambda_0 + 0.4\lambda_2; \\
\lambda_2 &= p_{12}\lambda_1 + p_{32}\lambda_3 + p_{42}\lambda_4; & \lambda_2 &= 0.8\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_4; \\
\lambda_3 &= p_{23}\lambda_2; & \lambda_3 &= 0.4\lambda_2; \\
\lambda_4 &= p_{24}\lambda_2; & \lambda_4 &= 0.2\lambda_2;
\end{aligned}
\tag{6.33}$$

$$\lambda_1 = 5\lambda_0; \quad \lambda_2 = 10\lambda_0; \quad \lambda_3 = 4\lambda_0; \quad \lambda_4 = 2\lambda_0.$$

Параметри окремих СМО, розраховані відповідно до вихідних параметрами систем, представлені в [Таблиця 6.2](#).

Таблиця 6.2 Параметри СМО, що входять в мережу

Система мережі	Швидкодія пристроїв	Число каналів	Трудомісткість етапу	Середній час обслуговування	Інтенсивність обслуговування	Коефіцієнт передачі
S_1	200000	1	2000	0,01	100	5
S_2	200000	1	500	0,0025	400	10
S_3	200000	3	1000	0,05	20	6
S_4	10000	1	200	0,02	50	4

З умови існування стаціонарного режиму мережі визначимо гранично допустиме

значення інтенсивності вхідного потоку

$$\lambda_0 < \min_i \frac{k_i \mu_i}{\alpha_i};$$

$$\lambda_0 < \min \{100/5; \quad 400/10; \quad 3 \cdot 20/4; \quad 50/2\};$$

$$\lambda_0 < 15 \text{ 1/с.}$$

Скориставшись виразами для розрахунку характеристик одноканальних СМО, визначимо час перебування заявок в системах S_1 , S_2 , S_4

$$U_i = \frac{1}{\mu_i(1-\rho_i)}; \quad U_1 = \frac{1}{100(1-0.4)} = 0.017c;$$

$$U_2 = \frac{1}{400(1-0.2)} = 0.003c; \quad U_4 = \frac{1}{50(1-0.32)} = 0.029c.$$

Для визначення часу перебування заявок в системі S_3 скористаємося розрахунковими виразами для багатоканальних СМО:

$$P_0 = \left[\frac{\rho^k}{k!(1-\rho/k)} + \sum_{n=0}^{k-1} \frac{\rho^n}{n!} \right]^{-1};$$

$$P_0 = \left[\frac{1.6^3}{2 \cdot 3(1-0.6/3)} + 1 + 0.6 + \frac{1.6^2}{2} \right]^{-1} = 0.187;$$

$$U = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\rho^2}{(k-1)!(k-\rho)^2} P_0 + 1 \right];$$

$$U_4 = \frac{1}{20} \left[\frac{1.6^2}{2 \cdot (3-1.6)^2} \cdot 0.187 + 1 \right] = 0.056.$$

З огляду на коефіцієнти передачі мережі, що визначають середнє число влучень заявок в кожен з систем комплексу в процесі виконання завдання, знайдемо загальний час перебування заявки в системі (середній час вирішення одного завдання)

$$U = \sum_i \alpha_i U_i; \quad U = 5 \cdot 0.017 + 10 \cdot 0.03 + 4 \cdot 0.056 + 2 \cdot 0.029 = 0.667c.$$

Безумовно, що, представлена на [Рис. 6.2](#), класифікація не дає вичерпної підтримки для проектування СЕУ КПК, але визначає перелік наявних сучасних технологій для його реалізації та методології досліджень у рамках

визначених методів та конкретизує засоби порівняльного аналізу.

Для реалізації глибокого всебічного аналізу прийнятого рішення стосовно проектованої СЕУ КПК необхідно мати набір визнаних правил, що ґрунтуються на перевірених даних з ухвалення рішення у цьому напрямку і зібрані шляхом декомпозиції конкретної експлуатаційної проблеми, які б дозволили реалізувати розроблену СЕУ КПК з найменшими ризиками щодо експлуатаційної неефективності.

6.6. Дослідження ефективності управління при різних режимах функціонування

При перевищенні **числа Рейнольдса** деякої критичної величини аналітичне точне рішення для просторового або плоского потоку дає хаотичний вигляд течії (так звана **турбулентність**). В окремому випадку воно пов'язане з **теорією Фейгенбаума** або іншими сценаріями переходу до хаосу. При зменшенні числа Рейнольдса нижче критичного рішення знову дає нехаотичний вид течії.

Виняткова чутливість до зміни коефіцієнтів рівняння при турбулентному режимі: при зміні числа Re на 0,05% рішення абсолютно відрізняються один від одного.

Стратегія управління моментом **ПП** судна, працюючого у режимі **DP**, полягає у заміні зовнішнього контуру зворотного зв'язку за швидкістю петлею прямого управління моментом (англ. *Direct Torque Control* – **DTC**). Це здійснюється за допомогою функції розрахунку F_p (**Рис. 4.6**), яка визначається із уставки, як похідна від стандартної (4.23).

Функція розрахунку (**Рис. 4.6**), виходячи із завдання T_r , за допомогою опорного генератору та генератору форсування формує обмежені за

максимумами M_{max} і P_{max} скореговані завдання обертаючого моменту. Дану блок-схему можна удосконалювати застосовуючи, наприклад, у ланці зворотного зв'язку матриці аеродинамічних та інерційних коефіцієнтів [262, 267].

Але, за великим рахунком, таке ускладнення ніяк не вплине на поведінку ПП у разі одночасного зниження тяги і зміни напрямку тяги через взаємодію потоку від ПП з корпусом, викликаного ефектами тиску – коли мала тяга ПП проноситься вздовж корпусу (ефект Коанда).

Можна зрозуміти: зменшення тяги потребує керування *DP* з підтримкою, наприклад – за допомогою підпорядкованої системи управління розподілом потужності (англ. *Power Management System* – *PMS*), яка підпорядковується системі управління електроенергією (англ. *Energy Management System* – *EMS*) за відповідною інформацією датчиків. Але тенденція втрати судном позиції триває, бо продовжує діяти вищезгаданий ефект.

Закінчується це тим, що після того, як потік ПП «відірветься» від корпусу судна, його вплив на потоки інших ПП буде на кшталт дії струї води з раптово відкритого бронзбойту, що й призведе до виникнення крос-поєднання опорів. Поведінка всієї системи *DP* у цьому випадку непередбачувана, відомий лише кінцевий результат – судно втрачає позицію.

Для утримання судном позиції у таких випадках можливе визначення дій операторів *DP*, які призводять до поліпшення параметрів експлуатаційного режиму. Тобто, вирішити зворотну задачу і «навчити» всі системи управління у ланцюгу *DP–PMS–DTC*. діяти «інтелектуально» і нестандартно – за рахунок удосконалювання алгоритмів функціонування «захитих» у них програм.

На багатопривідних суднах з 6–8 ПП, ця проблема частково вирішується таким алгоритмом – виведення слабкого потоку із зони контакту з корпусом судна здійснюється перерозподілом упорів між діаметрально-

[До змісту](#)

протилежними ПП. Деколи, під час виникнення подібних ситуацій у режимі [DP](#), допомагає рестарт системи з постановкою лопатей у нульове положення у разі використання ГРК, або скидання обертів ПП у випадку застосування ГФК з подальшим терміновим накиданням моменту, а значить і упору.

Урахування означених складних режимів дозволило удосконалити роботу вузла ШІМ у складі системи управління ПП. Це удосконалення здійснюється введенням СІФК, де замість розподілу керуючих сигналів по фазах пропонується одночасна їх подача на електроди силових комутаторів з синхронізацією з будь-якої із фаз з необхідною шпаруватістю. За рахунок дії такої СІФК розширюється зона стійкого регулювання, практично до максимально-можливих меж $0^\circ < \alpha < 180^\circ$ [[250](#)].

Це досягається із одночасним використанням сучасних безінерційних, наприклад – п'єзо-електронних, давачів, миттєво реагуючих на відхилення упору [ПП](#) від розрахованих значень ([Рис. 6.6](#)) [[251](#), [252](#)].

Кут α , який у вказаній зоні є кутом відкриття, у разі перевищення значення π стає кутом регулювання інтенсивності наростання упору у квадратичній залежності, а ШІМ – засобом згладжування пульсацій, бо є складовою ланки постійного струму, половина рівня напруги на якій визначається, наприклад, таким чином:

$$U_{dc_N} = \frac{1}{\text{modind_}N} \cdot \frac{U_m \sqrt{2}}{\sqrt{3}}, \quad (6.34)$$

де: – U_m – максимальне значення лінійної напруги живлення;

– $\text{modind_}N = 1,01$ – значення випадкової величини оптимальних кутів переключення, як функції індексу модуляції для усунення 5-ої, 7-ої, ... 25-ої гармонік із основної.

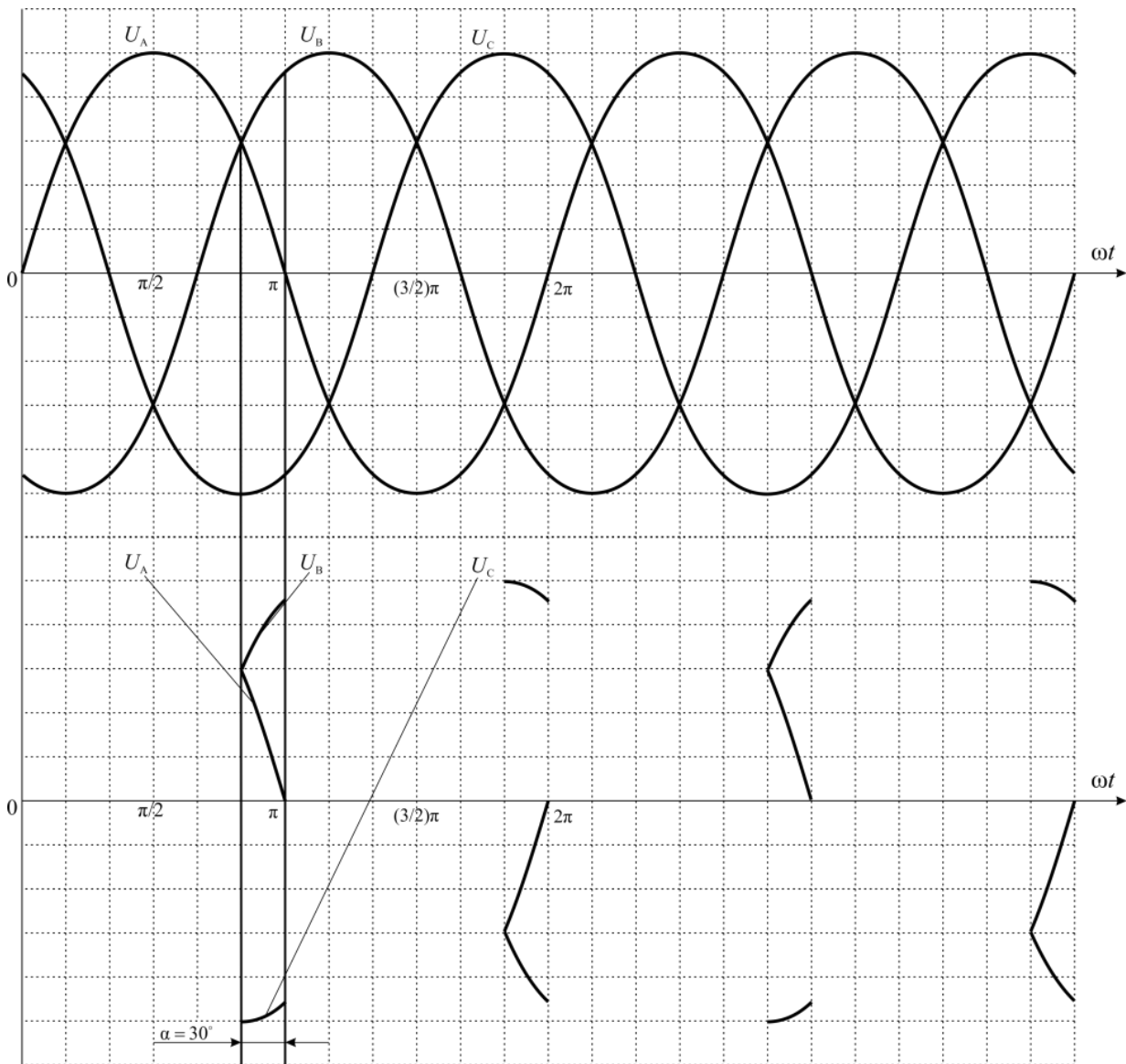


Рис. 6.6 Діаграми управляючих напруг СІФК

Тоді генерація імпульсів управління, з точки зору отримання синусоїдальної форми напруги на [ПП](#), підвищить ефективність передачі потужності до гвинта і виходить із основної форми хвилі вихідної напруги ПЧ:

$$U(\varphi_U - \alpha, (t - t_{\text{ПЧ}})/S) = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{U_{dc_N}}{2} \cdot \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{1}{n} \cdot \sin(n \cdot \frac{\pi}{2}) [\cos(n(\omega \times ((t - t_{\text{ПЧ}})/S) + (\varphi_U - \alpha))) + \cos(n(\omega((t - t_{\text{ПЧ}})/S) - (\varphi - \alpha)))] \quad (6.35)$$

де:

- φ_U – фаза вихідної напруги;
- n_g – номер гармоніки вихідної напруги;
- s_U – необхідна шпаруватість вихідної напруги, яка залежить від інтенсивності завдання T_p .

За таких умов побудови *DTС*, системі *DP* немає потреби «знати» у якому положенні знаходиться ПП відносно корпусу судна, оскільки не необхідно тільки для того, щоб не заважати роботі інших ПП. Уніфікація представлених блок-схем регуляторів і алгоритмів управління для різноманітних комплектацій СЕУ КПК різними типами ПП наведено у роботах [249, 253].

Ефективність функціонування СЕУ КПК при різних режимах управління ПП досліджена в віртуальній лабораторії *MatLab/Simulink* для судна типу АНТС (Додаток Б.1.).

До складу СЕУ входили: чотири *СОДГ* потужністю 3000 кВт, 3300 В, 60 Гц; два *ГЕД* по 150 об/хв. і потужністю 4600 кВт, 3100 В; два ПП тунельного типу по 600 кВт, 1200 об/хв; напруга на шинах головних розподільних щитів 3300 В, 60Гц. Результати моделювання наведені на *Рис. 6.7*, де представлені робочі характеристики одного *ГЕД*.

На *Рис. 6.8*, *Рис. 6.9* представлені результати моделювання енергетичних процесів, що протікають в СЕУ *КПК*, представленої на *Рис. Ж.1* за умови роботи 4-х *СОДГ* і 4-х азимутних ПП для судна типу *Supply vessel*, що здійснює динамічне позиціонування.

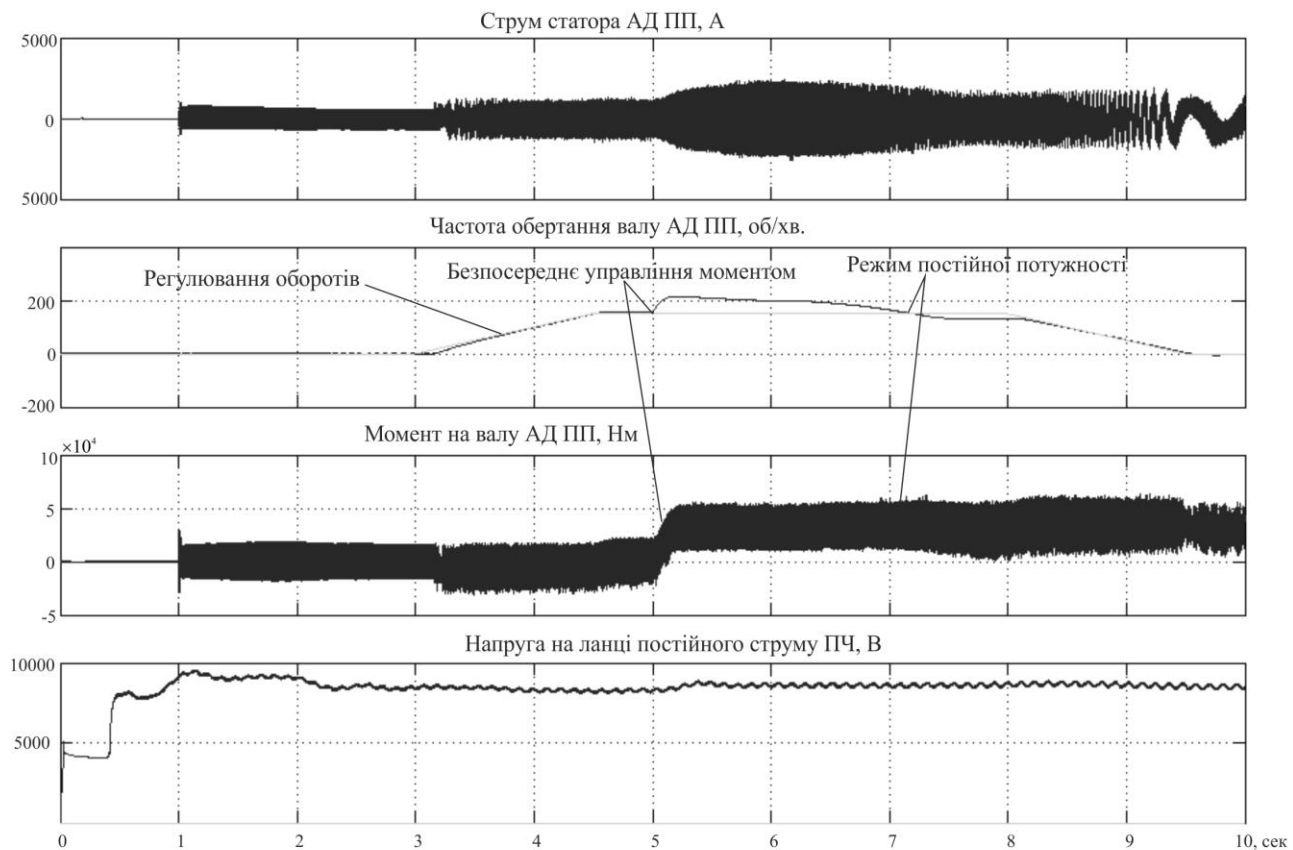


Рис. 6.7 Робочі характеристики ГЕД судна типу *ANTS* при використанні всережимного регулятора (підрозділ 4.4) [232]

На 55 секунді моделювання відбувається «запит» потужності від СК ГЕД азимутних ПП внаслідок виниклого збурення. Короткочасне перевищення загальної споживаної електродвигунами ПП понад 100% призводить до запуску резервного генератора. Подальше зменшення запиту потужності (130 с) дозволяє системі розподілу навантаження (*PMS*) перевести один генератор в «гарячий резерв», а другий в режим роботи на гіперболі постійної потужності.

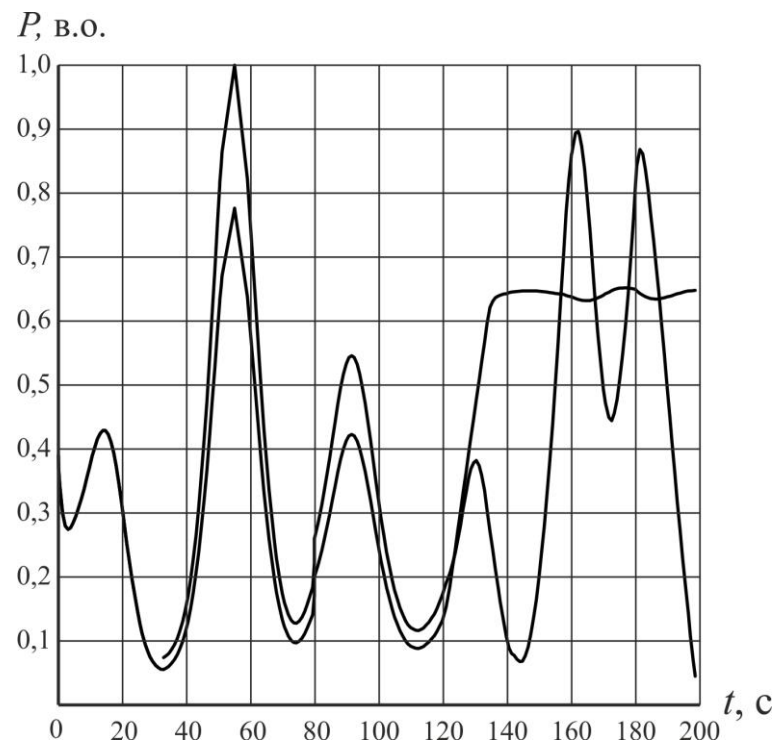


Рис. 6.8 Характеристики споживаної активної потужності 4-ма СОДГ СЕУ
КПК

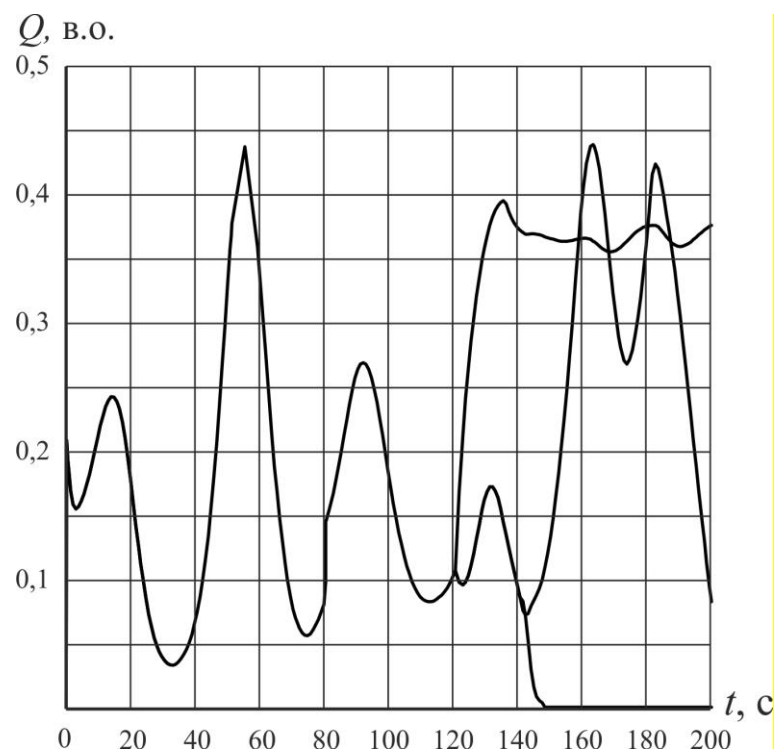


Рис. 6.9 Характеристики споживаної реактивної потужності 4-ма СОДГ СЕУ
КПК

Таким чином, при переході регулятора з одного режиму роботи в інший зміни величин моменту гвинта, оборотів ГЕД і тяги гвинта в залежності від експлуатаційних умов роботи судна здійснюються без стрибків, що свідчить про ефективність запропонованого алгоритму регулювання.

Запропоноване удосконалення методу управління моментом ПП СЕУ КПК на основі синергетичної структури з ШІМ і СІФК дозволяє вирішувати завдання оптимізації процесу керуваності системи *DP* з одночасним підвищенням ефективності передачі потужності до гвинтів, збільшення надійності та розширення функціональних можливостей.

6.7. Комп'ютерне моделювання конфігурацій ПП з урахуванням типізації технологічного процесу

На Рис. 6.10 представлено комп'ютерну модель для налаштування конфігурації ПП на прикладі КПК судна типу *Supply Vessel*.

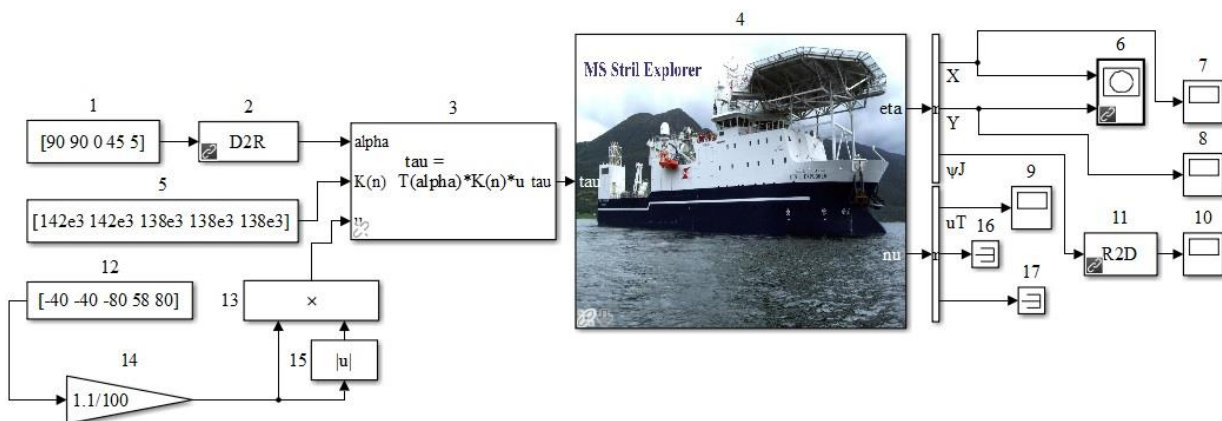


Рис. 6.10 Комп'ютерна модель у *MatLab Simulink* конфігурації підрулюючих пристроїв для судна типу *Supply Vessel*: 1 – завдання кута розташування

[До змісту](#)

азимутальних пристроїв відносно діаметральної площини судна α_A , град.; 2 – блок перетворення градусів у радіани; 3 – модель КПК; 4 – модель ідентифікації параметрів судна; 5 – завдання коефіцієнту упору гвинта, K_T ; 6 – плоттер ХУ-координат, в.о.; 7...10 – осцилографи, що фіксують: ХУ-координати судна, м; значення середньозваженого упору, що прикладено до судна u_T , $H \times 10^6$; кут нищпорення судна ψ_J , град., відповідно; 11 – блок перетворення радіан у градуси; 12 – завдання крокового відношення гвинтів H_p , $-100\% \div +100\%$; 13 – функція перемноження; 14 – блок розрахунку крокового відношення $p_D = H_p / D_p$, де D_p – діаметр гвинта, м; 15 – блок розрахунку абсолютної величини; 16 – 17 – пристрої поглинання вихідних сигналів моделі судна, що не відстежуються.

Згідно методики, що описана у [70, 235] створено комп'ютерну модель ідентифікації параметрів (Рис. 6.10) судна типу *Supply Vessel* (Рис. Б.27) текст *m*-файлу якої надано у додатку В.1.

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

$$\tau_T = T_{matrix} K_{Tmatrix} u_T, \quad (6.36)$$

де: – u_T – вектор змінних упорів ПП, що прикладені до судна (6.37);

– $K_{Tmatrix}$ – матриця коефіцієнтів упору гвинтів (6.38);

– T_{matrix} – матриця конфігурації ПП (6.39), (6.40), (6.41), (6.42).

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

$$u_T = [p_{D1} - p_{D10} | (p_{D1} - p_{D10}), p_{D2} - p_{D20} | (p_{D2} - p_{D20}), \dots,$$

$$\left| p_{Dk_{TR}} - p_{Dk_{TR}0} \right| \left(p_{Dk_{TR}} - p_{Dk_{TR}0} \right) \Big]^{T_{matrix}}, \quad (6.37)$$

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

Коефіцієнти упорів гвинтів визначаються діагональною матрицею:

$$K_{Tmatrix} = \begin{pmatrix} K_{T1}(n_1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & K_{T2}(n_2) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & K_{Tr}(n_r) \end{pmatrix}, \quad (6.38)$$

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

Сили упорів ПП, що визначаються вектором (6.36), розподіляються на продовжні, поперечні та кутові (нишпорення) складові матрицею конфігурації ПП.

Наприклад, на судні типу *Supply Vessel* (Рис. Б.27) встановлено чотири азимутальних ПП (два головних та два допоміжних, що розташовано між діаметральною площиною та носовою частиною і висувуються з корпусу судна), які можуть повертатися на будь-який кут α_A відносно діаметральної площини судна, та один носовий тунельний ПП. Виходячи з цього маємо наступну конфігурацію упорів, що прикладено до судна: $u_{T1,2}$ – упори головних азимутальних ПП; $u_{T3,4}$ – упори допоміжних азимутальних ПП, u_{T5} – упор носового ПП. Тоді матриця конфігурації ПП буде мати вигляд:

$$T_{matrix(0)} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_{A1} & \cos \alpha_{A2} & \cos \alpha_{A3} & \cos \alpha_{A4} & 0 \\ \sin \alpha_{A1} & \sin \alpha_{A2} & \sin \alpha_{A3} & \sin \alpha_{A4} & 1 \\ l_{T1} \sin \alpha_{A1} & l_{T2} \sin \alpha_{A2} & l_{T3} \sin \alpha_{A3} & l_{T4} \sin \alpha_{A4} & l_{T5} \end{pmatrix}, \quad (6.39)$$

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.

При чому, треба мати на увазі, що позитивним рухом судна у x -напрямку є рух вперед, у y -напрямку – праворуч, а у z -напрямку (нишпорення) – назад, тобто проти годинникової стрілки.

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 $T_{matrix(1)}$ ([6.40](#)); $T_{matrix(2)}$ ([6.41](#)); $T_{matrix(3)}$ ([6.42](#)); $T_{matrix(4)}$ ([6.44](#)).

Конфігурація (1):

– два головних класичних ГФК лівого та правого бортів у кормовій частині судна;

– один азимутальний ПП, що висувається з корпусу судна у носовій частині судна, який може повертатися на будь-який кут α_A відносно діаметральної площини судна, та один носовий тунельний [ПП](#);

– $u_{T1,2}$ – упори головних класичних ГФК;

– u_{T3} – упор допоміжного азимутального ПП;

– u_{T4} – упор носового ПП.

$$T_{matrix(1)} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \cos\alpha_{A3} & 0 \\ 0 & 0 & \sin\alpha_{A3} & 1 \\ l_{T1} & -l_{T2} & l_{T3}\sin\alpha_{A3} & l_{T4} \end{pmatrix}. \quad (6.40)$$

Конфігурація (2):

– два головних класичних ГФК лівого та правого бортів у кормовій частині судна; два кормових тунельних ПП; один азимутальний ПП, що

висувається з корпусу судна у носовій частині судна, який може повертатися на будь-який кут α_A відносно діаметральної площини судна;

- один носовий тунельний ПП;
- $u_{T1,2}$ – упори головних класичних ГФК;
- $u_{T3,4}$ – упори кормових тунельних ПП;
- u_{T5} – упор допоміжного азимутального ПП;
- u_{T6} – упор носового ПП).

$$T_{matrix(2)} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & \cos\alpha_{A5} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & \sin\alpha_{A5} & 1 \\ l_{T1} & -l_{T2} & -l_{T3} & -l_{T4} & l_{T5}\sin\alpha_{A5} & l_{T6} \end{pmatrix}. \quad (6.41)$$

Конфігурація (3):

– три азимутальних ПП (два головних лівого та правого бортів та один допоміжний, розташований між діаметральною площиною та носовою частиною і висувається з корпусу судна), які можуть повертатися на будь-який кут α_A відносно діаметральної площини судна;

- один кормовий тунельний ПП;
- один носовий тунельний ПП;
- $u_{T1,2}$ – упори головних азимутальних ПП;
- u_{T3} – упор кормового ПП;
- u_{T4} – упор допоміжного азимутального ПП;
- u_{T5} – упор носового тунельного ПП.

$$T_{matrix(3)} = \begin{pmatrix} \cos\alpha_{A1} & \cos\alpha_{A2} & 0 & \cos\alpha_{A4} & 0 \\ \sin\alpha_{A1} & \sin\alpha_{A2} & 1 & \sin\alpha_{A4} & 1 \\ l_{T1}\sin\alpha_{A1} & l_{T2}\sin\alpha_{A2} & -l_{T3} & l_{T4}\sin\alpha_{A4} & l_{T5} \end{pmatrix}. \quad (6.42)$$

Конфігурація (4):

- шість азимутальних ПП (два головних лівого та правого бортів та чотири допоміжних, що висуюються з корпусу судна;
- два розташовані у носовій частині;
- два розташовані між діаметральною площиною та носовою частиною, можуть повертатися на будь-який кут α_A відносно діаметральної площини судна;
- (u_{T1-6} – упори азимутальних ПП).

$$T_{matrix(4)} = \begin{pmatrix} \cos\alpha_{A1} & \cos\alpha_{A2} & \cos\alpha_{A3} & \cos\alpha_{A4} & \cos\alpha_{A5} & \cos\alpha_{A6} \\ \sin\alpha_{A1} & \sin\alpha_{A2} & \sin\alpha_{A3} & \sin\alpha_{A4} & \sin\alpha_{A5} & \sin\alpha_{A6} \\ l_{T1}\sin\alpha_{A1} & l_{T2}\sin\alpha_{A2} & l_{T3}\sin\alpha_{A3} & l_{T4}\sin\alpha_{A4} & l_{T5}\sin\alpha_{A5} & l_{T6}\sin\alpha_{A6} \end{pmatrix}. \quad (6.43)$$

Для різних типів суден 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. m -файли ідентифікації параметрів суден для різних експлуатаційних режимів наведені у [Додаток А](#).

m -файл ідентифікації параметрів судна типу *Supply Vessel*, що знаходиться у режимі динамічного позиціонування, наведено у додатку [В.1](#).

На [Рис. 6.11](#), [Рис. 6.12](#) відповідно показані графіки зміни ХУ-координат та кута нищпорення ψ_L в функції часу продовж 200 с судна типу *Supply Vessel* при різних конфігураціях [ПП](#), взаємного розташування осей основних і допоміжних гребних гвинтів відносно діаметральної площини судна; значеннях крокових відношень і коефіцієнтів упорів.

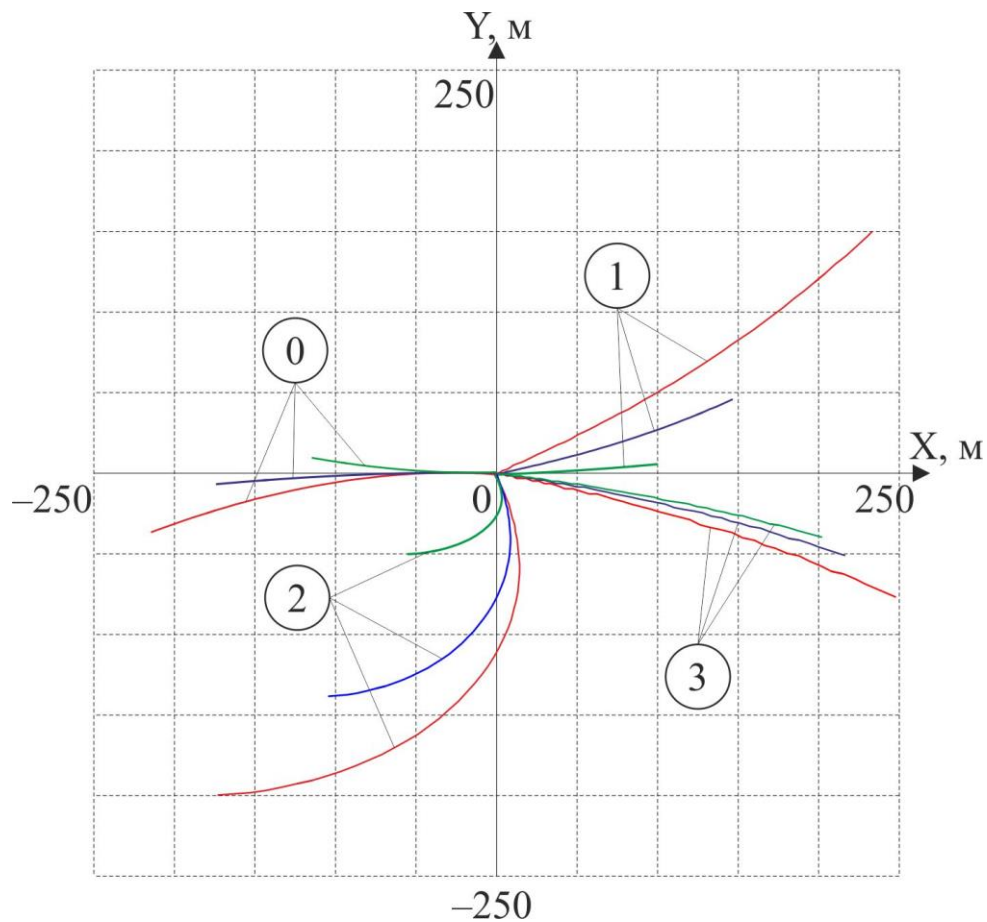


Рис. 6.11 Зміна координат судна типу *Supply Vessel*, довжиною 76 м, при різних конфігурації ПП: 0 – 3 – номери відповідних конфігурацій (6.39), (6.40), (6.41), (6.42): — — взаємно-перпендикулярне розташування осей основних і допоміжних гребних гвинтів з незмінними значеннями крокових відношень і коефіцієнтів упорів; — — взаємно-перпендикулярне розташування осей основних і допоміжних гребних гвинтів 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 XY -координат судна.

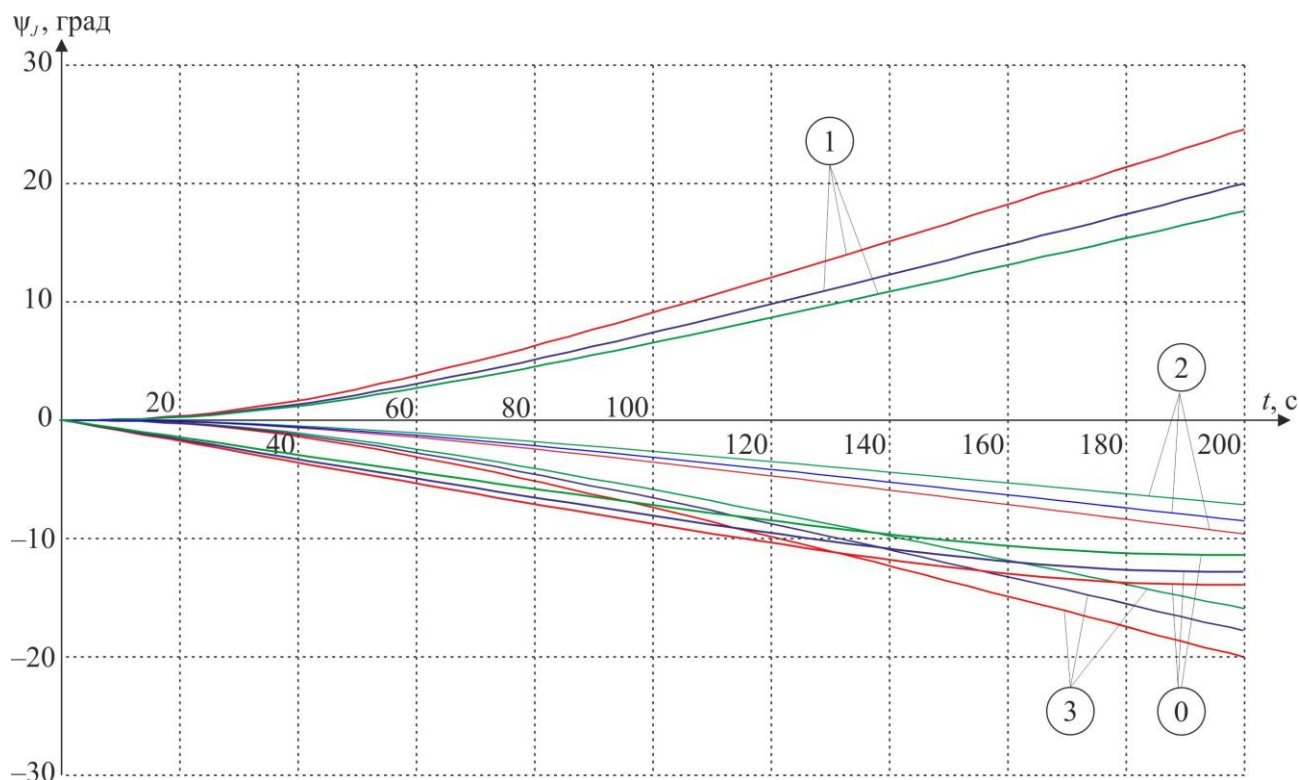


Рис. 6.12 Графіки залежності кута нищпорення судна типу *Supply Vessel*, довжиною 76 м (додаток Б.1), у функції часу: 0 – 3 – номери відповідних конфігурацій (6.39), (6.40), (6.41), (6.42): — — взаємно-перпендикулярне розташування осей основних і допоміжних гребних гвинтів з незмінними значеннями крокових відношень і коефіцієнтів упорів; — — взаємно-перпендикулярне розташування осей основних і допоміжних гребних гвинтів 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. 6.11, Рис. 6.12 можна зробити висновок, що оптимальною з точки зору мінімуму зсуву судна у ХУ-площині є конфігурація ІІІ №2, яка визначається матрицею (6.41).

6.8. Емпіричний метод оцінки якості проектування і прийняття рішення

Для оцінки якості проєктованих СЕУ **КПК** і прийняття технічних рішень щодо підвищення ефективності їхнього функціонування необхідно на ранніх етапах проєктування задовго до будівництва мати у своєму розпорядженні характеристики, що представляють властивості СЕУ КПК. З цією метою використовуються моделі процесів у СЕУ КПК і систем, що описуються математичними залежностями, які цікавлять проєктувальника, характеристики експлуатаційних режимів і параметри пристроїв СЕУ КПК.

В процесі проєктування будь-якого СЕУ КПК, в тому числі і СК, на різних його етапах використовуються різні види моделей. Спочатку, якщо це можливо, складаються аналітичні моделі задач управління, наприклад у вигляді систем диференціальних рівнянь або логіко-алгебраїчних виразів. Потім вибираються алгоритми, що дозволяють доводити рішення задач до чисельних значень.

З цією метою широко використовуються чисельні методи рішень і чисельні моделі задач. Для дослідження на ЕОМ необхідно перевести чисельні моделі в програми та інформаційні масиви, тобто створити інформаційно-програмні моделі.

Такий шлях дослідження, заснований на використанні аналітичних моделей, часто виявляється малопридатним через велику розмірність і складність отриманих моделей. Тому значне поширення отримали людино-машинні методи імітаційного моделювання складних систем.

Імітаційні моделі реалізуються на ЕОМ з використанням універсальних алгоритмічних мов високого рівня або мов системного моделювання, і **СППР**. Імітаційне моделювання полягає в проведенні експериментів з моделлю, представленої у формі сукупності алгоритмів, що описують поведінку СЕУ **КПК**, шляхом прогонів побудованих на їх основі програм на

[До змісту](#)

множині експериментальних даних відповідно до експлуатаційного режиму та ситуаційних чинників.

Основною перевагою імітаційного моделювання є його універсальність і можливість забезпечення високої адекватності досліджуваної моделі СЕУ КПК реальному об'єкту. Це досягається за рахунок глибокої деталізації алгоритмічного опису, що неможливо при дослідженні аналітичними методами, які пов'язані зі спрощеннями процесів і жорсткими обмеженнями на умови використання моделі.

Так, наприклад, спроба врахувати в моделі СЕУ КПК вплив випадкових чинників експлуатаційного режиму призводить при аналітичному дослідженні передачі потужності до гребних гвинтів до значних труднощів, які не завжди вдається подолати.

Імітаційне моделювання при дослідженні СЕУ КПК в умовах випадкових впливів довкілля не викликає ускладнень і є в даний час найбільш ефективним, а часом і єдиним практично доступним засобом отримання інформації про поведінку СЕУ КПК, особливо на стадії його проектування.

Роблячи висновок, можна констатувати, що моделювання процесів у СЕУ КПК під час передачі потужності до гребних гвинтів є однією з основних задач проектування будь-якої СК. Моделі і методи оптимізації, що використовуються в процесі проектування СК СЕУ КПК, визначаються змістом конкретних завдань управління, засобами дослідження, технічної реалізації компонентів СЕУ [КПК](#) та є актуальною проблемою.

Конкретно це стосується процесу прийняття рішення щодо вибору і удосконаленню структури СЕУ і конструкції КПК, а також налагодженню всережимних регуляторів СК [ПП](#).

Моделі СЕУ КПК, що використовуються в процесі їх проектування можна розділити на класи, кожному з яких відповідає певна мета дослідження при проектуванні у рамках розробленої [СППР](#).

До класу динамічних моделей належать моделі, що представляють математичний опис процесів передачі потужності до гребних гвинтів КПК. Ці моделі широко використовуються при проектуванні СК ПП та систем розподілу потужністю. Математичні форми моделей залежать від прийнятого способу вимірювання координат стану об'єкту і часу. У зв'язку з цифровою реалізацією СК все більшу питому вагу набувають дискретно-безперервні моделі, що представляють процеси в дискретному часі у формі різницевих рівнянь.

Методи класичного і розширеного варіаційного обчислення знайшли широке застосування в аналітичному конструюванні всережимних регуляторів. Багато задач по визначенню оптимальних значень параметрів управління можуть бути вирішені з використанням принципу максимуму Понтрягіна.

Таким методом, наприклад, може бути вирішена задача побудови оптимальної за швидкодією багаторівневої стратегії управління СЕУ КПК, що забезпечує перехід судна з одного експлуатаційного режиму на інший в умовах існуючих обмежень на дії.

У зв'язку з використанням СППР великий розвиток отримали моделі і методи оптимізації, засновані на принципах математичного програмування. Так, у різноманітних СППР високу ефективність мають алгоритми оптимізації енергетичних процесів у СЕУ КПК, що знаходиться у режимі утримання позиції, засновані на принципах динамічного програмування. Завдання і методи оптимізації знайшли широке висвітлення в літературі.

Використання імовірнісних моделей обумовлено необхідністю обліку в процесі проектування СЕУ КПК різноманітних випадкових факторів і ситуаційних чинників експлуатаційних режимів, які в багатьох випадках роблять визначальний вплив на характеристики СК.

Так, наприклад, облік випадкового характеру надходження запитів від численних пристроїв СЕУ КПК необхідний при визначенні продуктивності багаторівневої СК розподілом потужністю.

Випадкові значення вимірюваних в процесі управління величин є причиною недетермінованого числа операцій, які виконуються СК при реалізації алгоритмів керування.

При обґрунтуванні обраної стратегії управління розподілом потужністю особливо важливу роль набувають моделі енергетичних процесів у СЕУ КПК, що дозволяють визначати необхідну продуктивність пристроїв обробки інформації і пропускну здатність каналів зв'язку, раціональну послідовність функціонування СК і розробляти алгоритми управління ресурсами СЕУ КПК.

До дискретних моделей відносять графові і алгебраїчні моделі, призначені для розробки повної моделі функціонування СЕУ КПК при імітаційному моделюванні у рамках розробленої [СППР](#).

Керуючі комплекси (КК) СЕУ КПК складаються з великої кількості різноманітних пристроїв і систем і характеризуються наявністю численних зовнішніх і внутрішніх випадкових впливів.

Випадковий характер носять обурення довкілля, зміни гідродинамічних характеристик КПК, пов'язані з обростанням корпусу, виникнення відмов елементів систем, що вимагають локалізації несправностей для запобігання розвитку аварійних ситуацій тощо. У зв'язку з цим потреби в рішенні окремих завдань обробки інформації і час вирішення цих завдань мають також випадковий характер.

Незважаючи на те, що багато завдань обробки інформації, пов'язані з контролем і управлінням технічними засобами (ТЗ) СЕУ КПК, носять циклічний характер, випадковість впливу на КПК призводять до того, що звернення до пристроїв, які виконують різні функції контролю і управління, в загальному випадку не є регулярними.

Випадковою величиною є і час, що витрачається СК на обробку інформації в процесі управління, так як алгоритми вирішення завдань мають розгалуження, містять цикли. Число операцій, що виконуються при реалізації подібних алгоритмів, залежить від випадкових значень вимірюваних параметрів.

Все це обумовлює необхідність використання імовірнісних моделей при проектуванні КК СЕУ [КПК](#). Такі моделі необхідні як при описі процесів виконання окремих алгоритмів задач, так і при описі систем, що виконують певну сукупність завдань контролю і управління.

В якості моделей функціонування СК СЕУ КПК, призначених для вирішення певної сукупності обчислювальних задач в процесі управління розподілом потужності, можуть бути використані [СППР](#) із моделями масового обслуговування.

Такі дослідження є складним трудомістким процесом, що вимагає розробки спеціальних програмних засобів моделювання на ЕОМ. Імітаційне моделювання, як правило, проводиться при проектуванні СЕУ КПК, структура яких може змінюватися у певних заданих межах. Більш точні оцінки характеристик СК СЕУ КПК отримують шляхом імітаційного моделювання із залученням методу статистичних випробувань та побудови моделей СЕУ КПК по даним експериментальних досліджень.

Для крокових відношень $p_{Di}=H_P/D_{pi}$ величини упорів і моментів судна, що працює у режимі динамічного позиціонування, будуть визначатися вектором зусилля τ_T , що описується рівнянням [\(6.36\)](#).

Упори, що прикладено до судна у режимі динамічного позиціонування, внаслідок роботи [ПП](#), визначаються вектором зусиль (упорів) [\(6.37\)](#).

Коефіцієнти упорів гвинтів визначаються діагональною матрицею [\(6.38\)](#).

Сили упорів ПП, що визначаються вектором (6.36), розподіляються на продовжні, поперечні та кутові (нишпорення) складові матрицею конфігурації ПП (6.39).

Завданням побудови емпіричної моделі є визначення функції $y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)$, що зв'язує вхідні змінні $x_1, x_2, \dots, x_n$ із вихідною змінною y , за даними експерименту, що містить N спільних спостережень вхідних і вихідних величин. При побудові моделі невідома функція представляється у вигляді розкладання у степеневий ряд Тейлора в околиці деякої точки області визначення незалежних змінних:

$$\varphi(x_1, x_2, \dots, x_n) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \beta_{ij} x_i x_j + \dots, \quad (6.44)$$

де $\beta_i = \frac{\partial \varphi}{\partial x_i}$; $\beta_{ij} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_i \partial x_j}$; $i, j = 1, 2, \dots, n$.

На підставі (6.39) вибираємо структуру моделі СЕУ КПК. Визначаємо число врахованих членів степеневого ряду. Обираємо просту модель у вигляді полінома з числом членів, обмеженою лінійною частиною полінома.

При певних статистичних властивостях збурень, прикладених до СЕУ КПК, коефіцієнти моделі будемо оцінювати по експериментальним даним за допомогою процедури регресійного аналізу. Маючи дані експерименту у N точках області визначення незалежних змінних, та маючи матрицю спостережень X і вектор виходів Y модель СЕУ КПК будемо у вигляді рівняння регресії:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{N1} & x_{N2} & \cdots & x_{Nn} \end{bmatrix}; \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_N \end{bmatrix}, \quad (6.45)$$

$$\varphi(x_1, x_2, \dots, x_n) = \beta_0 + \sum_{(i=1)}^n \beta_i x_i + \sum_{(i,j=1)}^n \beta_{ij} x_i x_j + \dots,$$

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{j=1}^n b_{ij} x_i x_j + \dots, \quad (6.46)$$

де b_0, b_1, b_{ij} – вибіркові оцінки коефіцієнтів рівняння (6.44); $\hat{y}$ – оцінка математичного очікування випадкової величини y .

Для розрахунку коефіцієнтів рівняння регресії застосовуємо метод найменших квадратів (МНК). У цьому випадку критерієм наближення моделі до досліджуваної функції буде сума квадратів відхилень вихідної величини, розрахованої з використанням побудованої моделі від фактичних значень, отриманих в експерименті. Найкращим наближенням буде таке рівняння, коефіцієнти якого визначаються з умови мінімуму цієї суми,

$$Y = \min \sum_{k=1}^N \left(y_k - \sum_{i=0}^t b_i x_{ki} \right)^2. \quad Y = \min \sum_{k=1}^N (y_k - \hat{y}_k)^2. \quad (6.47)$$

Для обчислення коефіцієнтів рівняння регресії, що забезпечують мінімальне значення критерію (6.47), необхідно вирішити систему рівнянь, одержуваних дорівнюванням нулю часних похідних від залишкової суми з невідомих змінним $b_0, b_1, \dots, b_t$:

[До змісту](#)

$$\frac{\partial \sum_{k=1}^N \left(y_k - \sum_{i=0}^t b_i x_{ki} \right)^2}{\partial b_i} = 0; i = 1, 2, \dots, t.$$

Отримані таким чином рівняння наближуються до нормальних рівнянь МНК, вирішувати які доцільно, представляючи їх у матричній формі:

$$(X^T X)B = X^T Y \quad (6.48)$$

де X – матриця спостережень незалежних змінних; X^T – транспонована матриця X ; Y – вектор-стовпець спостережень залежної змінної; B – вектор-стовпець коефіцієнтів рівняння регресії.

Коефіцієнти регресійної моделі B і розраховані з її допомогою значення y є випадковими величинами, але для оцінки похибок моделі і придатності її для опису досліджуваних СЕУ і КПК, необхідно робити стільки статистичних обробок результатів експерименту, скільки виконувалось ідентифікаційних процедур.

Тому, для системи випадкових величин $b_0, b_1, \dots, b_t$ з теоретичними середніми значеннями $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_t$ складемо матрицю других центральних моментів, визначаючи всі статистичні властивості коефіцієнтів B , а отже, і рівняння регресії $\hat{Y} = XB$. Отримаємо матрицю дисперсій-коваріацій M^{-1} , по головній діагоналі якої розташовані оцінки дисперсій, а решта місць займають оцінки до варіацій коефіцієнтів рівняння регресії:

$$M^{-1} = \begin{bmatrix} s^2 \{b_0\} & cov\{b_0 b_1\} & \cdots & cov\{b_0 b_m\} \\ cov\{b_1 b_0\} & s^2 \{b_1\} & \cdots & cov\{b_1 b_m\} \\ .. & .. & .. & .. \\ cov\{b_m b_0\} & cov\{b_m b_1\} & \cdots & s^2 \{b_m\} \end{bmatrix}.$$

Звідси отримуємо співвідношення для оцінок дисперсій і ковариацій коефіцієнтів рівняння регресії $s^2\{b_i\}=c_{ij}^2\{y\}$; $cov\{b_i b_j\}=c_{ij}s^2\{y\}$.

Оцінка дисперсії відтворюваності $s^2\{y\}$ визначаємо за формулою

$$s^2\{y\} = \frac{\sum_{k=1}^N \sum_{q=1}^{m_k} (y_{kq} - \bar{y}_k)^2}{\sum_{k=1}^N (m_k - 1)},$$

де $\bar{y}_k$ – середнє значення величини y_k , визначається за даними m_k

повторюваних дослідів. Величина $f_y = \sum_{k=1}^N (m_k - 1)$ є число ступенів свободи

дисперсії відтворюваності всього експерименту. Оцінка дисперсій коефіцієнтів рівняння регресії дозволяє визначити значимість коефіцієнтів, тобто уточнити структуру моделі СЕУ [КПК](#).

Для цього за допомогою t -критерію Стюдента визначаємо довірчий інтервал

$$\Delta b_i = \pm t(\alpha, f_y) s^2\{b_i\}, \quad (6.49)$$

де $t(\alpha, f_y)$ – табличне значення t -критерію для обраного рівня значимості α і числі ступенів свободи f_y .

Для визначення придатності отриманої моделі зробимо оцінку дисперсії передбаченого значення вихідної величини в точці k $s^2\{\hat{y}_k\}$ і дисперсію адекватності s_{ad}^2 , що характеризує розсіювання експериментальних результатів щодо передбачених рівнянням регресії значення.

Оцінку дисперсії передбаченого значення відгуку $s^2\{\hat{y}_k\}$ в кожній точці експерименту визначаємо на основі закону складання помилок

$$s^2\{\hat{y}_k\} \approx \sum_{i=0}^n \left(\frac{dy}{db_i} \right)_k^2 s^2\{b_i\} + \sum_{i=1}^t \sum_{j=0}^t \left(\frac{d^2 y}{db_i db_j} \right) \text{cov}\{b_i b_j\},$$

або в матричній формі $s^2\{\hat{y}_k\} = X_k^T (X^T X)^{-1} s^2\{y_k\} X_k = X_k^T M^{-1} X_k$,

де X_k – вектор координат k -ої точки експерименту. Оцінка дисперсії адекватності визначаємо виразом

$$s_{ad}^2 = \frac{1}{N-L} \sum_{k=1}^N (\bar{y}_k - \hat{y}_k)^2,$$

де L – число коефіцієнтів, що входять в рівняння регресії після відкидання незначущих коефіцієнтів. Величина $f_{ad} = N - L$ називається числом ступенів свободи дисперсії адекватності.

Для перевірки статистичної гіпотези про однорідність дисперсій використовуємо критерій Фішера:

$$F_e = \frac{s_{ad}^2}{s^2\{y\}}.$$

Якщо отримана модель не адекватна, то необхідно включити в рівняння додаткові члени, скоротити область зміни незалежних змінних або збільшити кількість ідентифікаційних процедур, щоб модулі векторів (6.36) – (6.39) дорівнювали одиничному значенню.

6.9. Результати оцінки якості модельного проектування

Наведемо результати визначення залежності моменту опору M_c на валу **ПП** СЕУ **КПК** з гвинтами фіксованого кроку (ГФК) від числа оборотів валу n_s та крокового відношення H . На вигляд статичної характеристики установки $M_c=f(n_s, H)$ впливають різні зовнішні фактори (стан довкілля, обростання гвинта, зміна осідання тощо). Тому для забезпечення оптимальних режимів роботи СЕУ в процесі динамічного позиціонування необхідно уточнювати цю залежність, тобто робити ідентифікацію характеристик.

У **Таблиця 6.3** для різних значень оборотів валу n_s і крокового відношення гвинта H наведені результати вимірювання моменту на валу двигуна M_s в сталих режимах (при $dn/dt=0$) коли $M_s=M_c$. Всі значення представлені у відносних одиницях: $m_c=M_c/M_n$; $n=n_s/n_n$; $h=H/H_m$, де M_n , n_n – номінальні значення моменту і оборотів двигуна; H_m – крокове відношення, яке відповідає максимальному упору ГФК.

Таблиця 6.3

Значення оборотів валу, крокового відношення гвинта і моменту опору в різних точках експерименту.

Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
n_s	0,32	0,44	0,49	0,57	0,63	0,68	0,73	0,77	0,81	0,86	0,91	0,95	0,96	1,0
H	0,6	0,95	0,01	0,3	0,6	0,01	0,95	0,96	0,3	0,6	0,95	0,01	0,3	0,6
m_c	0,16	0,34	0,06	0,11	0,38	0,07	0,66	0,74	0,21	0,55	1,08	0,10	0,30	0,76

Залежність $M_c=f(n_s, H)$ істотно нелінійна, тому подаємо рівняння регресії у вигляді

$$m_c = b_0 m_0 + b_1 n + b_2 h + b_3 nh + b_4 n^2 + b_5 h^2.$$

Введемо фіктивну змінну $x_0=1$ і позначимо $x_1=n$; $x_2=h$; $x_3=nh$; $x_4=n^2$; $x_5=h^2$; $y=m_c$. Тоді рівняння регресії набуде вигляду

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5.$$

Використовуючи дані вимірювань ([Таблиця 6.3](#)), розрахуємо значення змінних x_3 , x_4 , x_5 і за допомогою вирішення матриці умов експерименту визначимо коефіцієнти рівняння $b_0 = 0,4476$; $b_1 = -1,0242$; $b_2 = -0,8385$; $b_3 = 1,6512$; $b_4 = 0,9213$; $b_5 = 0,3368$.

Рівняння регресії в цьому випадку набуде вигляду $\hat{y} = 0,4476 - 1,0242x_1 - 0,8385x_2 + 1,6512x_3 + 0,9213x_4 + 0,3368x_5$, а відповідна йому модель статичної характеристики $m_c=f(n,h)$ запишеться наступним чином: $m_c = 0,4476 - 1,0242n - 0,8385h + 1,6512nh + 0,9213n^2 + 0,3368h^2$.

Зробимо статистичну обробку отриманих результатів. Представлені в [Таблиця 6.3](#) значення моменту опору m_c визначені шляхом усереднення результатів повторних дослідів. У кожній з 14 точок експерименту проводилося по п'ять дублюючих дослідів.

У [Таблиця 6.4](#) наведені результати вимірювань в процесі експерименту і проміжних розрахунків оцінки дисперсії адекватності.

Таблиця 6.4

Дані повторних дослідів і результати проміжних розрахунків оцінки дисперсії адекватності

k	y_{k1}	y_{k2}	y_{k3}	$\bar{y}_k$	$\hat{y}_k$	$\bar{y}_k - \hat{y}_k$	$(\bar{y}_k - \hat{y}_k)^2$
1	0,26	0,28	0,29	0,25	0,2656	0,0128	0,0000
2	0,36	0,34	0,345	0,36	0,3344	0,0147	0,0001
3	0,008	0,05	0,03	0,07	0,0822	0,0226	0,0004
4	0,24	0,24	0,06	0,21	0,2316	0,0216	0,0005
5	0,38	0,40	0,035	0,38	0,3280	0,0520	0,028
6	0,031	0,09	0,08	0,07	0,0308	0,0398	0,0018
7	0,612	0,69	0,68	0,66	0,7065	0,0465	0,0024
8	0,76	0,71	0,73	0,74	0,7845	0,0445	0,0021
9	0,26	0,26	0,23	0,21	0,2331	0,0231	0,0006
10	0,56	0,58	0,54	0,55	0,5204	0,0296	0,0008
11	1,11	1,06	1,12	1,02	1,0322	0,0489	0,0023
12	0,20	0,08	0,22	0,20	0,0810	0,0190	0,0008
13	0,32	0,27	0,31	0,30	0,3598	0,098	0,0032
14	0,79	0,77	0,72	0,76	0,7486	0,0114	0,0001

Для оцінки значущості коефіцієнтів і адекватності отриманої моделі зробимо оцінку дисперсії відтворюваності. В даному випадку має місце рівномірне дублювання дослідів $m_1 = m_2 = \dots = m = 5$ і оцінка дисперсії відтворюваності знаходиться в вигляді

$$s^2 \{y\} = \frac{\sum_{k=1}^N \sum_{q=1}^{m_k} (y_{kq} - \bar{y}_k)^2}{N(m_k - 1)} = \frac{0,0308}{14(5-1)} = 1,0967 \cdot 10^{-3}.$$

Таблиця 6.5

Значення t -критерію Ст'юденту

Число ступенів свободи	Рівень значущості				Число ступенів свободи	Рівень значущості			
	0,21	0,06	0,027	0,012		0,21	0,06	0,027	0,012
1	6,321	11,8326	24,452	65,487	12	1,787	2,179	2,56	3,054
2	2,814	4,823	6,312	9,876	14	1,767	2,145	2,510	2,977
3	2,373	3,173	4,236	5,771	16	1,757	2,120	2,473	2,921
4	2,342	2,826	3,565	4,124	18	1,748	2,101	2,445	2,878
5	2,345	2,561	3,233	4,442	20	1,734	2,086	2,423	2,845
6	1,945	2,456	2,988	3,707	25	1,719	2,059	2,385	2,787
7	1,888	2,366	2,845	3,499	30	1,697	2,042	2,36	2,750
8	1,872	2,344	2,766	3,347	40	1,684	2,000	2,329	2,712
9	1,845	2,257	2,688	3,264	60	1,656	1,976	2,288	2,658
10	1,823	2,234	2,645	3,177					

Оцінимо значимість отриманих коефіцієнтів. З цією метою, користуючись виразом (6.49), для кожного коефіцієнта рівняння визначимо довірчий інтервал Δb_i , $i = 0, 1, \dots, 5$.

У [Таблиця 6.5](#) наведені значення t -критерію Ст'юденту для різних рівнів значущості при різних ступенях свободи. Для рівня значущості $\alpha=0,06$ і числі ступенів свободи $f_y = 30$ $t(0,06;30) = 2,042$.

Таким чином, $\Delta b_i = \pm 2,042 \cdot 0,14 = 0,286$; $\Delta b_1 = \pm 0,762$; $\Delta b_2 = \pm 0,294$; $\Delta b_3 = \pm 0,296$; $\Delta b_4 = \pm 0,505$; $\Delta b_5 = \pm 0,188$.

Всі коефіцієнти отриманого рівняння значимі, так як їх абсолютна величина більше довірчих інтервалів. Для перевірки адекватності отриманої моделі розрахуємо значення F -критерію Фішера. З цією метою для кожної точки експерименту визначимо відхилення розрахункового значення $\hat{y}_k$ (див.

Таблиця 6.4) і отримаємо оцінку дисперсії адекватності

$$s_{ad}^2 = \frac{\sum_{k=1}^N (\bar{y}_k - \hat{y}_k)^2}{N - L} = \frac{0,0177}{14 - 6} = 2,1677 \cdot 10^{-3}.$$

Обчислимо значення F -критерію, відповідне даним експерименту

$$F_e = \frac{s_{ad}^2}{s^2\{y\}} = 2,1677 \cdot 10^{-3} / (1,0967 \cdot 10^{-3}) = 1,98.$$

Табличне значення критерію для рівня значущості $\alpha = 0,06$ і числі ступенів свободи $f_1 = 8$ і $f_2 = 28$ (Таблиця 6.6) складає $F_t(0,06; 8; 28) = 2,31$

Таблиця 6.6

Значення F -критерію Фішера

Число ступенів свободи для знаменника	Число ступенів свободи для чисельника									
	1	2	3	4	5	6	8	12	16	24
1	162,3	197,6	217,9	226,4	231,9	233,3	235,1	244,8	247,3	248,1
2	19,65	19,1	19,5	19,32	19,4	19,33	19,38	19,56	19,67	19,54
3	11,14	9,67	9,32	9,18	9,05	8,88	8,82	8,76	8,68	8,62
4	7,74	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,07	5,91	5,84	5,77
5	6,63	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,82	4,68	4,6	4,53
6	5,89	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,15	4,0	3,92	3,84
7	5,63	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,73	3,57	3,49	3,41
8	5,38	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,44	3,28	3,2	3,12
9	5,18	4,26	3,86	3,63	3,46	3,37	3,23	3,07	2,98	2,9
10	4,95	4,1	3,71	3,48	3,33	3,22	3,07	2,91	2,82	2,74
12	4,76	3,38	3,49	3,26	3,11	3,0	2,85	2,69	2,63	2,5
15	4,48	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,59	2,42	2,33	2,25
20	4,37	3,49	3,1	2,87	2,71	2,6	2,45	2,28	2,18	2,08
30	4,19	3,36	2,88	2,65	2,57	2,48	2,31	2,12	1,98	1,87
40	4,12	3,28	2,83	2,67	2,48	2,37	2,19	2,01	1,93	1,78
50	4,02	3,16	2,69	2,54	2,43	2,32	2,18	1,96	1,87	1,73

Оскільки значення F -критерію, відповідне даним експерименту, менше табличного значення, слід зробити висновок, що отримане рівняння адекватно відображає існуючу залежність $m_c = f(n, k)$.

При побудові моделі СЕУ **КПК** за даними активного експерименту зробимо спрощення процедури обчислення коефіцієнтів рівняння регресії і отримаємо модель СЕУ КПК з заданими властивостями. Досягається це шляхом планування експерименту з використанням так званих ортогональних планів. Одним з найважливіших ефектів ортогонального планування експерименту є отримання незалежних оцінок коефіцієнтів рівняння регресії, що дозволяє при необхідності ускладнювати модель, додаючи нові та не перераховуючи вже знайдені члени рівняння.

Умовою ортогональності плану є наступне:

$$\sum_{k=1}^N x_{ki} x_{kj} = 0, i \neq j; j = 0, 1, \dots, t.$$

Оцінки коефіцієнтів рівняння знаходимо за виразом

$$b_i = \sum_{k=1}^N x_{ki} y_k / \sum_{k=1}^N x_{ki}^2,$$

а оцінки дисперсій коефіцієнтів за виразом

$$s^2 \{b_i\} = s^2 \{y\} / \sum_{k=1}^N x_{ki}^2.$$

При побудові ортогональних планів використаємо кодовані безрозмірні значення незалежних змінних (факторів), що відповідають вибраним рівням варіювання, а повний факторний експеримент (ПФЕ) з варіюванням n факторів на двох рівнях, що позначаються ПФЕ дорівнює 2^n . Кодованими значеннями факторів при такому експерименті є $x_i = \pm 1$, які виходять як $x_i = (\tilde{x}_i - x_{i0}) / (\Delta x_i)$, **$x_i = (\tilde{x}_i - x_{i0}) / (\Delta x_i)$** , де $\tilde{x}_i$ – натуральне значення фактору;

x_{i0} – центральне значення фактору; Δx_i – інтервал варіювання фактору.

Варіанти дослідів ПФЕ складають повний набір комбінацій рівнів факторів.

[До змісту](#)

Матриця планування ПФЕ 2^3 має вигляд

k	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1

Матриця планування ПФЕ має такі властивості:

$$\sum_{k=1}^N x_{ki} x_{kj} = 0; \sum_{k=1}^N x_{kj} = 0; \sum_{k=1}^N x_{kj}^2 = N; i = j; j = 1, 2, \dots, t.$$

Отже, коефіцієнти рівняння регресії обчислюємо за формулою

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_{kj} y_k = 0, j = 0, 1, \dots, t.$$

а оцінки дисперсій коефіцієнтів рівняння – по виразу

$$s^2 \{b_i\} = s^2 \{y\} / (mN),$$

Де N – число варіантів дослідів ПФЕ; m – число повторних дослідів.

Модель будуюмо у вигляді рівняння, що містить менше ніж $N = 2^n$ членів та скорочуємо число проведених дослідів, застосовуючи дробовий факторний експеримент (ДФЕ). Тоді матриця планування буде являти собою частину матриці ПФЕ. Коефіцієнти рівняння регресії при ДФЕ обчислені за тими ж виразами, що і у разі ПФЕ, та представляють собою змішані оцінки $b_j \rightarrow \beta_j \pm \beta_{ij} \pm \dots$, що визначаються по генеруючим співвідношенням ДФЕ. Розглянемо задачу побудови наближеної аналітичної моделі СК [ПП](#) для

визначення оптимальних параметрів системи рівняння. Закон управління в даній СК має вигляд

$$U = k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3 + k_4 x_4,$$

де $x_1, \dots, x_4$ – координати системи ПП – АД; $k_1, \dots, k_4$ – параметри всережимного регулятора оборотів АД.

Оптимізованим показником є середньоквадратичне відхилення регульованої величини Q в умовах випадкових збурюючих впливів.

Користуючись схемою повного факторного експерименту, побудуємо лінійну модель залежності $Q = Q(k_1, \dots, k_4)$. Для забезпечення адекватності моделі експерименти проводяться не у всій області зміни параметрів, а в деякій обмеженій її частині. При цьому рух до екстремуму відбувається послідовно з використанням моделей, побудованих на кожному з етапів. Діапазони зміни параметрів наведені в [Таблиця 6.8](#), матриця планування і результати експерименту для одного з етапів оптимізації СК ПП – в [Таблиця 6.9](#), в яку внесені також отримані значення коефіцієнтів моделі $b_0, \dots, b_4$ і розраховані за допомогою моделі значення оптимізованого показника Q_k .

Таблиця 6.8

Абсолютні значення змінних параметрів

Параметр	Основний рівень	Інтервал варіювання	Верхній рівень	Нижній рівень
k_1	0,7	0,11	0,75	0,55
k_2	1,1	0,12	1,15	0,95
k_3	2,1	0,55	2,55	1,55
k_4	10,0	20,0	12,0	8,0

Таким чином, отримане рівняння регресії має вигляд

$$\hat{Q} = 0,4527 + 0,1126k_1 + 0,0848k_2 + 0,0277k_3 + 0,0856k_4.$$

Для перевірки значущості коефіцієнтів побудуємо довірчий інтервал:

$$\Delta b_j = \pm t(\alpha, f) \sqrt{s^2 \{Q\} / N}.$$

$\Delta b_i = \pm t(\alpha, f) \sqrt{s^2\{Q\}/N}$. Табличне значення t -критерію Стюдента

(див. Таблиця 6.5) при числі ступенів свободи $f = 2$ для рівня значущості $\alpha = 0,06$ складає $t(0,06; 2) = 4,823$. Дисперсія відтворюваності, що визначається з трьох дублюючих дослідів, дорівнює $s^2\{Q\} = 0,82 \cdot 10^{-3}$.

Тоді $\Delta b_j = \pm 4,823 \sqrt{0,00082/16} = \pm 0,345$. Коефіцієнт рівняння b_3 не значущий, так як для нього не виконується умова $|b_i| > \Delta b_i$. Виходить $Q = 0,4628 - 0,1028k_1 + 0,0887k_2 + 0,0836k_4$.

$$\hat{Q} = 0,4628 - 0,1028k_1 + 0,0887k_2 + 0,0836k_4.$$

Користуючись критерієм Фішера, перевіримо адекватність моделі:

$$s_{ad}^2 = \frac{\sum_{k=1}^N (Q_k - \hat{Q}_k)^2}{N - L} = \frac{0,0356}{14 - 6} = 0,00445;$$

$$F_e = \frac{s_{ad}^2}{s^2\{Q\}} = 0,00445/0,000822 = 5,43.$$

Отримана модель адекватна, так як значення F_e менший табличного значення $F_t(0,06; 12; 2) = 19,56$. На основі побудованої регресійної моделі з'являється можливість коригування взаємного розташування ПП КПК відносно один одного і діаметральної площини судна, та напрямків обертання ПП. Отримані моделі застосовуються в процесі оптимізації параметрів фізичних моделей СК ПП, удосконалення методики проектування багатоцільових суден льодового класу, розробки інтелектуальних систем розподілу потужності у СЕУ КПК та оцінки структурного та функціонального ризиків складних технічних систем.

Матриця планування і результати експерименту

Номер експерименту	Змінний параметр				Показник, що оптимізується	
	k_1	k_2	k_3	k_4	Q	$\hat{Q}$
1	1	1	1	1	0,5315	0,4870
2	1	1	1	-1	0,3331	0,3183
3	1	1	-1	1	0,5218	0,5438
4	1	1	-1	-1	0,3148	0,3751
5	1	-1	1	1	0,3323	0,3075
6	1	-1	1	-1	0,2002	0,1388
7	1	-1	-1	1	0,2954	0,3644
8	1	-1	-1	-1	0,2014	0,1957
9	-1	1	1	1	0,6108	0,6895
10	-1	1	1	-1	0,5201	0,5208
11	-1	1	-1	1	0,8406	0,7463
12	-1	1	-1	-1	0,5857	0,5776
13	-1	-1	1	1	0,4963	0,5100
14	-1	-1	1	-1	0,2890	0,3413
15	-1	-1	-1	1	0,5868	0,5669
16	-1	-1	-1	-1	0,4214	0,3982
Коефіцієнти моделі: $b_0 = 0,4527$; $b_1 = -0,1126$; $b_2 = 0,0848$; $b_3 = -0,0277$; $b_4 = 0,0856$. $b_0 = 0.4527$; $b_1 = -0.1126$; $b_2 = 0.0848$; $b_3 = -0.0277$; $b_4 = 0.0856$.						

6.10. Висновки до розділу

У рамках вирішення четвертої головної задачі вперше створено [СППР](#) для дослідженні способів автоматизації і комп'ютеризації процесів проектування і експлуатації СЕУ КПК. Розроблена система заснована на теоретичних, чисельних і експериментальних дослідженнях, що дозволило всебічно обґрунтовувати, перевіряти і тестувати нові розрахункові методи і математичні моделі, що входять до неї. До числа найбільш важливих відмінностей розробленої СППР від інших відносяться: 1) застосування інтегрального критерію ефективності СЕУ КПК, що дозволило приймати

рішення при варіюванні будь-яких істотних параметрів СЕУ КПК, які забезпечували б підвищення енергетичної ефективності; 2) можливість передбачити загальну кількість та тип [ПП](#) і гребних гвинтів, систему 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. Це досягається за рахунок того, що розроблена система заснована на когнітивному (у синергізмі з інженерним) науково-дослідницькому процесі прийняття рішення, що включає в себе поетапне удосконалення даних, які надходять від дослідження конкретного експлуатаційного режиму роботи СЕУ КПК конкретного судна; 5) застосування методу взаємної імплементації характеристичних просторових векторів енергетичних процесів в СЕУ і гідродинамічних в [КПК](#). Ці відмінності розробленої [СППР](#) дозволило 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. Новизна отриманих результатів полягає у вирішенні проблеми створення методології удосконалення СЕУ КПК шляхом розробки методів імплементації ідентифікаційних маркерів взаємно-впливаючих технологічних процесів у СЕУ КПК і розробки реалізуючих ці методи СППР.

Запропонований підхід до проектування СППР СЕУ КПК дозволяє передбачити загальну кількість та тип [ПП](#) і гребних гвинтів, систему живлення електродвигунів із можливістю багаторазової зміни конструкції навіть при наявності мінімальних даних про існуючий проект та може бути

[До змісту](#)

використаний практично для будь-якого типу судна. Також СППР дозволяє проводити модернізацію різноманітних типів суден для їхньої адаптації до режиму динамічного позиціонування та дає можливість синтезувати рекомендації розробникам ПП, контролерів керування та систем живлення для суден, працюючих у режимі динамічного позиціонування. Це досягається за рахунок того, що запропонований підхід засновано на когнітивному (у синергізмі з інженерним) науково-дослідницькому процесі прийняття рішення, що включає в себе поетапне удосконалення даних, які надходять від дослідження конкретного експлуатаційного режиму роботи судна. Його характерною відмінністю є застосування методу взаємної імплементації характеристичних просторових векторів енергетичних процесів в СЕУ і гідродинамічних в КПК. Саме завдяки цій відмінності розроблена СППР не вимагає застосування критеріїв подібності та дозволяє багаторазовий аналіз структури СЕУ і КПК при мінімальних вихідних даних.

Можливість зміни налаштувань ПП, зокрема: значень крокових відношень, коефіцієнтів упорів і розташування осей основних і допоміжних гребних гвинтів, для конкретного судна значно розширило використання підходу з точки зору прискорення збіжності синтезованих *DMI*-моделей суден, а для заданих швидкостей обертання гребних гвинтів, тяги, крутного моменту і крокового відношення дозволило встановити, що коефіцієнт тяги (упору) зростає зі зміною взаємного розташування ПП відносно один одного та діаметральної площини судна [223].

Також становлено, що співвідношення коефіцієнтів упорів краще корелюються до коефіцієнтів потужності ніж до крокових коефіцієнтів гвинтів, що дає підстави вважати про можливість поліпшувати енергетичну ефективність СЕУ КПК в експлуатаційних режимах та 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 [241].

Експериментальні дослідження для застосованих конфігурацій ПП

проводилися на фізичній моделі КПК [40, 144, 251, 252, 254]. У рамках вирішення п'ятої головної задачі, яка стала невід'ємною передумовою вирішення інших головних задач, вперше створено фізичну модель багатофункціонального КПК зі змінною структурою, яка у синергізмі із вирішенням четвертої головної задачі дозволила багаторазовий аналіз структур СЕУ і КПК при мінімальних вихідних даних, а саме: 1) можливість верифікації налаштувань ПП, зокрема значень крокових відношень, коефіцієнтів упорів і розташування осей основних і допоміжних гребних гвинтів; 2) синтез *DMI*-моделей суден для заданих швидкостей обертання гребних гвинтів, тяги, крутного моменту і крокового відношення; 3) розрахунок коефіцієнтів тяги (упору) зі зміною взаємного розташування ПП відносно один одного та діаметральної площини судна; 4) кореляцію коефіцієнтів упорів до коефіцієнтів потужності та крокових коефіцієнтів гвинтів. Розроблена фізична модель дозволяє досліджувати якісні та надійнісні показники СЕУ КПК, їх агрегатів на стадіях проектування конструкцій та технологій, виробництва і експлуатації, встановлювати закономірності змінювання параметрів технічного стану в процесі експлуатації, впроваджувати методи і засоби діагностування та прогнозування технічного стану СЕУ КПК, забезпечувати високу ефективність їх використання і надійність роботи.

У розділі методами обчислювальної гідродинаміки розроблені принципи формалізації фізичних моделей азимутальних підрулюючих пристроїв з точки зору відстежування деградаційних ефектів на лініях потоків гребних гвинтів.

Наукові та прикладні результати, висновки та рекомендації полягають у наступному:

– розрахована геометрія фізичної моделі підрулюючого пристрою із двома ступенями свободи і зазначені необхідні фізичні умови її реалізації;

– формалізовані геометричні параметри моделі, задані початкові і граничні умови диференціальних рівнянь, що описують поведінку потоків гребних гвинтів у рециркуляційних зонах і коефіцієнти, що враховують наявність деградаційних ефектів;

– у відповідності до заданому алгоритму, отримані рішення основних рівнянь з точки зору фундаментальних фізичних параметрів, а також впорядковані результати рішень.

– отримані залежності коригуючих чинників, що впливають на компоненти упорів і моментів, пропорційних радіусу моделі і реального ПП, прив'язаних до вихідної геометрії. Дані систематизовані і зведені у таблицю, що дозволить робити подібні розрахунки для будь якого типу ПП аналогічних суден для різних експлуатаційних умов і ситуаційних чинників.

На підставі вивчення внутрішніх властивостей компонентів СЕУ КПК, що працює у режимі динамічного позиціонування, та особливостей побудови рівнянь, що характеризують енергетичні процеси у конкретній СЕУ конкретного КПК, визначено конфігурацію упорів, що прикладено до судна, сформовано матрицю конфігурації ПП і встановлено відстань від місця прикладення упору окремого ПП до проекції вектору зусилля τ_T на площину руху судна.

За даними експерименту, що містить 14 точок виміру (Таблиця 6.3) вхідних і вихідних параметричних координат ПП КПК судна, що працює у режимі динамічного позиціонування, зроблена оцінка дисперсій коефіцієнтів рівняння регресії та визначені коефіцієнти $b_0 = 0,4476$; $b_1 = -1,0242$; $b_2 = -0,8385$; $b_3 = 1,6512$; $b_4 = 0,9213$; $b_5 = 0,3368$, які уточнюють структуру моделі СЕУ КПК.

У результаті побудови наближеної аналітичної моделі КПК для визначення параметрів системи управління ПП КПК за допомогою ортогонального композиційного планування експерименту із ПФЕ $= 2^n = 16$ складено відповідну матрицю і отримано результати у вигляді коефіцієнтів

моделі (Таблиця 6.9): $b_0 = 0,4527$; $b_1 = -0,1126$; $b_2 = 0,0848$; $b_3 = -0,0277$; $b_4 = 0,0856$.

Для різних рівнів значущості і ступенів свободи обчислено t -критерії Стьюдента (для рівня значущості $\alpha = 0,06$ та числі ступенів свободи 30 $f_y = 30t(0,06; 30) = t(0,06; 2) = 4,823$ та F -критерій Фішера $F_e(0,06; 12; 2) = 5,43$, на підставі чого підтверджено адекватність отриманої регресійної моделі СЕУ КПК за даними експериментальних випробувань.

Збільшення статистики частоти значущих ідентифікаційних чинників характеристик процесів передачі потужностей у СЕУ та КПК під час ітераційних процедур пропорційно обсягу вибірки та не призводить до збільшення змінних та коефіцієнтів регресійної моделі СЕУ КПК.

Випадкові значення змінних збурюючих впливів не корелюються, що є свідченням передумови застосування розроблених принципів композиції регресійних моделей СЕУ КПК за результатами експериментальних досліджень.

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 батарей 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 батарей 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 перпендикулярами L_{PP} , 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 площині судна від вертикального положення із оптимізацією системи керування 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

[До змісту](#)

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.

Предметний покажчик

Адаптація		діюче значення моменту гвинта	34, 170
структури моделі	142	діюче значення упору гвинта	34, 138, 170, 394
Азимутально гвинто–рульова колонка.	30, 82, 106, 379	ефективність гвинта.....	34, 138, 168
Алгоритм		кількість гвинтів	33, 169
управління.....	125	кількість лопатей гвинта.....	33, 168
Альтернативне джерело енергії	30, 104, 121, 208, 209, 210	конструктивний крок гвинта.....	33, 394
Апарат		крокове відношення гвинта	33, 138, 275
дистанційно-керований підводний.....	31, 64, 368	момент	34, 138, 167, 394
Блок		потужність гвинта	167
управління живленням.....	88	протилежного обертання.....	6, 31, 51
Буксировочна потужність	95, 96, Див.	радіус.....	34, 138, 394
Суднова енергетична установка		радіус перетину лопаті.....	34, 138
Бурове судно	64, 65, 84, 86	регульованого кроку	31, 78, 79, 84, 97, 138, 269, 359
Вага		сила поштовху гвинта	34, 167
питома.....	35, 126	товщина лопаті	34, 138
Вектор		упор гвинта	35, 138, 167, 394
збурюючих впливів	36, 115, 236	фіксованого кроку	31, 79, 83, 138, 167, 173, 269
змінних зусиль.....	36	Гвинто–рульова колонка.....	78
керуючих впливів	115, 236	Генератор	
координат <i>k</i> -ої точки експерименту	291	аварійний дизельний	30
координат динамічної моделі	36, 115, 236	середньо-обертовий газовий	32, 371
поміж фазної напруги	36, 110	середньо-обертовий дизельний	32
потокосцеплення обмотки статора	36, 201	Гіпербола постійної потужності	3, 100, 165, 178, 179, 272
стовпець коефіцієнтів рівняння регресії	289	Глобальна навігаційна супутникова система.....	31, 79
стовпець спостережень залежної змінної.....	289	Головний силовий агрегат	31, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371
струму	36	Граничне значення погрішності.....	114
струму навантаження	110	Двигун	
упору і моменту.....	36, 381, 382, 395	азимутальний лівого борту	30, 347, 348, 349, 350
управляючих впливів	36	азимутальний правого борту.....	30
Векторизація тяги	84	синхронний.....	32, 80
Векторне поле		Декомпозиція	
масових сил	36, 117	об'єкта дослідження.....	109
швидкостей	36, 117	ситуаційна.....	115
Водотоннажність судна.....	33	Дизель–генератор	
Встановлена потужність	Див. Суднова енергетична установка	аварійний	90
Гвинт		Динамічне позиціонування, DP	27, 67, 78, 84, 88, 91, 96, 98, 103, 129, 133, 195, 228, 240, 241, 268, 381, 382, 383, 385, 392
відносний крок гвинта	33, 138, 168, 275, 394		
дискове співвідношення гвинта..	33, 168		
діаметр.....	33, 394		

- Динамічний функціональний аналог31, 235
- Діаграма
вільної води167
- Діаметр гвинта.....137, 168, 275
- Діелектрична проникність середовища 35, 126
- Довжина
моделі судна.....33, 394
судна.....33, 394
- Дробовий факторний експеримент 31, 298
- Електродвигун
асинхронний.....30, 172
гребний31
- Електропривод
тиристорний156
- Ефект
деградаційний.....117, 131
Коанда3, 95, 100, 123, 124, 131, 268, 393
- Ефективність
функціонування271
- Задавач інтенсивності.....156
- Закон
керування електроприводом156
- Зворотнє вейвлет–перетворення212
- Зворотній зв'язок268
- Змінна
допоміжна індикаторна ітераційного процесу36, 165
допоміжна індикаторна прогресивного ітераційного процесу.....37, 165
допоміжна індикаторна регресивного ітераційного процесу.....37, 165
- Змінна швидкість обертання31, 357, 360, 361
- Зона
рециркуляційна131
- Ідентифікатор
експлуатаційного режиму143, 165
- Ідентифікація
експлуатаційного режиму142
контролерів159
математичної моделі142
- Імпеданс
перетворювача з електричного боку127
перетворювача з електричної боку ...37
перетворювача з механічного боку...37, 127
- Інвертор
напруги 31, 211
струму залежний 171
- Інтегральний вимикач 195
- Інтелектуальний підхід 158
- Інтерфейс
введення/виводу 87
- Кавітація 3, 95, 100, 124
- Коефіцієнт
аеродинамічний 268
в'язкості середовища 35, 119, 126
взаємоіндукції між обмоткою збудження и демпферною 37, 201
взаємоіндукції між обмоткою статора і демпферною 37, 201
відносної турбулентної в'язкості..... 132
відносної турбулентної в'язкості4, 35, 50, 131
відносної турбулентної в'язкості ... 133
відносної турбулентної в'язкості ... 151
внутрішнього тертя матеріалу сенсора 35, 125, 126
водотоннажності судна..... 33, 69
горизонтального утримання33, 110, 169, 394
грузлого тертя..... 35, 119, 126
динамічної в'язкості 35, 395
допустимих пульсацій 38, 110
доступності інноваційних технологій енергоефективності... 33, 69, 73, 101
доступності технології компенсації деградаційних ефектів33, 69, 94, 99, 100
енергоефективності експлуатаційний 30, 47, 73
енергоефективності експлуатаційний транспортної стратегії.. 33, 94, 100
жорсткості тросу..... 162
ідентифікаційний експлуатаційного режиму..... 139
інерційний 268
кінематичної в'язкості..... 35, 117, 395
кінематичної пружності матеріалу34, 125
конструктивний енергоефективності 31, 47
конструктивний енергоефективності технології DP 33, 94, 101
конструктивний енергоефективності транспортної технології..... 33, 93

- коригування елементів конструкції судна.....33, 68, 69, 101, 309
- коригування коефіцієнту водотоннажності судна.....33, 69
- корисної дії.....31
- корисної дії валопроводу і реверс-редукторної передачі34, 170
- корисної дії гвинта для даного значення K_F34, 133, 170
- корисної дії копрусу.....34
- корисної дії корпусу.....170
- корисної дії пропульсивний34, 170
- моменту гвинта33, 137, 168
- насичення.....38
- несинусоїдальності напруги38, 110
- передачі регуляторів159
- передачі регулятора157
- попутного потоку33, 110, 137, 169, 220
- пульсацій.....118
- середньозважений постійний конструктивний давача напруги ..38, 142
- середньозважений постійний конструктивний давача струму...38, 142
- середньозважений постійний конструктивний давачів збурюючих впливів.....38, 142
- середньозважений постійний конструктивний зворотнього зв'язку АІН по напрузі38, 142
- середньозважений постійний конструктивний зворотнього зв'язку АІС по струму38, 142
- середньозважений постійний конструктивний системи самозбудження СОДГ.....38, 142
- середньозважений постійний конструктивний трансформатору амплітудно фазового компаундування.....38, 142
- упору гвинта33, 137, 168, 275, 394
- фактору погоди33, 68
- Комп'ютер
- персональний32, 146
- Контролер
- PD fuzzy158
- нейронний.....158
- Контур
- керування157
- Координата
- динамічної моделі235
- стану.....114
- Коригування
- керованих величин157, 160
- Критерій
- мінімуму споживання електроенергії121
- Ст'юденту295
- стійкості.....159
- Фішера291
- Крос-поєднання опорів 3, 94, 99, 124, 269
- Кут
- відкриття тиристорів38, 155, 269
- навантаження38, 200
- нишпорення судна34, 67, 98, 103, 275, 279, 381, 382
- регулювання інтенсивності.....269
- розташування азимутальних пристроїв.....34, 275
- Ланка постійного струму110, 171, 270
- Людина, що приймає рішення.....31, 144
- Маркер
- характеристичний енергетичного потоку.....139
- Маса
- контактної області сенсора.....34, 125
- неконтактної області сенсора34
- Матриця
- активної складової схеми заміщення комплексного навантаження37, 128, 142, 147
- коефіцієнтів упорів37
- конфігураційних параметрів підрулюючих пристроїв...37, 128, 147
- лінійних нерівностей159
- планування298
- реактивної складової схеми заміщення комплексного навантаження37, 128, 142, 147
- спостережень незалежних змінних.289
- транспонована289
- Машинне відділення.....31, 86
- Менеджмент якості3, 99, 196
- Метод
- декомпозиції237
- декомпозиції для статичних задач..113
- найменших квадратів.....31, 288
- нелінійного програмування113
- обчислювальної гідродинаміки117, 129, 130, 137, 393
- скінченних об'ємів.....4, 50, 129, 151
- Механізм
- підйомно-транспортний.....32, 156

Міжнародна конвенція по запобіганню забруднення з суден.....	31, 47
Міжнародна конференція опитових басейнів.....	66
Міжнародна морська організація	78
Множина	
допустимих значень	236
допустимих значень координат динамічної моделі	37
допустимих значень управляючих впливів	37
допустимих рішень	116
змінних управляючих координатних завдань	37
змінних, що враховані у модифікованій задачі.....	166
типових ситуаційних чинників	166
характерних ознак типового ситуаційного чинника	37, 166
Модель	
двовимірна	158
динамічна.....	109
динамічна функціональна.....	112
математична системи керування ..	142
турбулентності.....	129
Модуль	
конденсаторний	145
обробки сигналу.....	89
синхронізації та розподілу навантаження	87
цифрової синхронізації та контролю навантаження	88
Момент	
гвинта	171
інерції судна	34, 171
судна поворотний	34
Насос	
зі змінною швидкістю обертання.....	31, 357, 360, 361
Недетермінований вплив	110
Номер гармоніки.....	38, 271
Нуково–технічне товариство	Див.
Міжнародна конференція опитових басейнів	
Об'єкт	
автоматичного керування.....	31, 157
дослідження	109, 142
Обчислювальна гідродинаміка.....	128
Ознака ситуаційного чинника	37, 166
Оператор	
відображення вектору стану.....	37
диференціювання.....	37, 166
Лапласа векторний	36, 117
набла.....	37, 117
Операторська консоль управління	88
Операція	
усереднення.....	118
усереднення у часі	118
Опір	
активний електричний	201
реактивний електричний	38
руху судна.....	34, 169
Осідання	
моделі судна.....	34, 395
судна	34, 395
Параметри	
збурюючих впливів.....	112
Перевантажувальна спроможність3, 100, 174	
Перетворювач	
аналога–цифровий.....	30, 146
постійної напруги	32, 211
силовий	88
частоти	3, 32, 100, 171
Питома витрата палива.....	32, 71
Підсистема	
функціонально–закінчена	32, 157
Плаваючий буровий засіб	64
План управління енергоефективністю судна.....	5, 32, 47, 51
Площа	
поперечного перетину	35, 126
Повний факторний експеримент ...	32, 297
Послідовне ітераційне зменшення	159
Постійна	
електротехнічна	35, 126
Постійна часу	
електромеханічного перетворення ..	38, 127
механо–електричного перетворення	38, 127
Потік	
води турбулентний	118
магнітний	35, 172
Потужність	
двигуна гвинта	34, 171
двигуна гвинта діюче значення	34
номінальна	90
Похідна	
контрольованого параметру.....	157

Принцип	
динамічного утримання2, 31, 98, 103	
електромеханічних аналогій.....125	
керування157	
компенсації невизначеності.....158	
управління.....157	
централізованого управління.....142	
Прискорення	
вільного падіння35, 126	
Пристрій	
аварійного живлення88	
автоматичного керування.....32, 157	
обробки сигналів88	
підрулюючий4, 32, 50, 78, 124, 129, 131, 132, 151	
підрулюючий азимутальний30, 352, 353, 354, 355, 356, 365, 366, 367, 368	
підрулюючий боковий367	
підрулюючий висувний31, 347, 349, 350, 367	
підрулюючий кормовий31, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 358, 362, 365, 366, 368, 369, 370, 371	
підрулюючий носовий31, 347, 348, 349, 350, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 366, 368, 369, 370, 371	
Продуктивність	
електроприводу.....157	
Пропорційно–інтегрально–	
диференціальний32, 202	
Пропульсивний комплекс	
дизель–електричний31, 104	
комбінований2, 4, 31, 50, 66, 98, 103, 129, 131, 132, 151, 381, 397	
Протокол передачі даних89	
Процес	
вантажно–розвантажувальний ...31, 159	
Регулювання	
моменту.....124	
моменту безпосереднє145	
потужності.....155, 175	
частоти обертання124	
часу пуску і гальмування157	
Регулятор	
моменту.....155, 172, 174	
ПІД173, 217	
потужності176	
пропорційно–інтегрально–	
диференціальний79, 202	
швидкості.....172	
Реле	
зворотньої потужності88	
Рівняння	
RANS.....29, 129	
динаміки гвинта167	
масообміну на кордоні розділу фаз.....4, 29, 50, 129, 151	
Нав'є–Стокса117	
об'ємно–дробові конвективної дифузії29, 129	
просторове158	
Рейнольдса.....118	
руху твердого тіла159	
трансцендентне126	
усереднені Рейнольдса Нав'є–Стокса 4, 50, 129, 151	
Селективний відбір.....143	
Сенсор	
що реєструє механічний вплив125	
Середнє значення напруги.....110	
Сила	
осьова гвинта138	
тангенціальна132, 133	
тангенціальна гвинта138	
тяжіння.....35, 126	
що діє на сенсор35, 125	
що діє на судно по довжині36, 394	
що діє на судно по ширині.....36, 394	
що діє на судно у напрямку руху36, 138, 394	
Система	
автоматичного керування.....32, 157	
автоматичного регулювання32, 114	
автоматичного регулювання напруги32, 209, 210	
вантажно–розвантажувальна160	
експертна143	
єдина електроенергетична130	
з відкритим контуром158	
імпульсно–фазового керування...32, 269	
керування32, 156	
керування децентралізована.....237	
керування розподіленням електроенергії..32, 180, 208, 209, 211	
контролю та регулювання потужністю87	
накопичення енергії.....32, 121, 208, 210	
нелінійна інваріантна у часі159	
підтримки прийняття рішень5, 29, 32, 51, 62, 102, 301	
розподілу низької напруги87	
складна технологічна32, 237	
стаціонарна лінеаризована.....159	

- суднова електроенергетична*32
управління даними.....88
- Системи
 суднова електроенергетична 4, 5, 50, 99, 196, 223, 307
- Скраплений природний газ.....32, 371
- Сонячний генеруючий елемент32, 211
- Спосіб
 динамічного утримання195
- Стабілізатор125
- Стійкість
 динамічної системи159
 по Ляпунову158
- Стратегія
 управління ...5, 6, 7, 50, 52, 175, 192, 193
 управління енергоспоживанням 197, 223
 управління енергоспоживанням з РІ управлінням (класична) та регулюванням ступеню заряду батарей.....197, 223, 410, 412
 управління енергоспоживанням за критерієм мінімуму споживання електроенергії 5, 50, 197, 208, 224, 410, 412
 управління енергоспоживанням за критерієм отримання максимуму альтернативної енергії та регулюванням ступеню заряду батарей СНЕ 5, 51, 197, 208, 210, 224, 410, 412
 управління енергоспоживанням із контролем за станом СОДГ197, 223, 410, 412
 управління енергоспоживанням із контролем частоти і стану СОДГ та регулюванням ступеню заряду батарей СНЕ.....197, 223, 410, 412
 управління моментом173
- Струм
 статора38, 172
- Ступень заряду батареї.....213, 217
- Суднова енергетична установка 2, 4, 32, 50, 66, 129, 131, 132, 151
- Тиск
 потоку.....35, 117, 394
- Товщина
 контактного шару126
- Трансформатор
 високої напруги.....87
 фідерних вимикачів87
- Упор
 підрулюючого пристрою 35, 394
- Управління
 дистанційне автоматичне 31
 на основі спостерігача 158
- Установка
 бурова 64
 напівзанурювальна бурова 31, 64, 84, 123
 самопідйомна бурова 32, 64, 84
- Фаза
 напруги 38, 271
- Функціональний аналог 165
- Функція
 кусково-аналітична 126
 кусочно-постійна 112
 передавальна 37, 167
 передавальна контролера моменту 172
 протирозгойдування 157
 управління живленням 195
 цільова 37, 113, 236
- Характеристика
 амплітудно-частотна 30, 148
 осьова лопатей 138
- Центральний управляючий комп'ютер . 88
- Частота
 обертання 35, 178, 201, 394, 395
 обертання гвинта 137, 168, 276
- Чинник
 дестабілізаційний 158
 збурюючий 158
 ситуаційний експлуатаційного режиму 139
- Число Рейнольдса ... 35, 137, 138, 168, 394
- Число Фруда 35, 137, 138
- Швидкість
 аксіальна (осева) складова швидкості переміщення судна 36, 395
 бокового переміщення судна 36, 395
 нишпорення судна 36, 395
 обертання 35, 394
 повздовжнього переміщення судна .. 36, 395
 притоку води 34, 137, 168, 227, 394
 руху гвинта 169
 руху системи, що коливається у зоні прикладення сили 35, 126
 руху судна 169
 руху судна абсолютна 33, 67, 98, 103, 110, 137, 169, 394

<i>судна поточна</i>	34, 137, 394	Шпаруватість напруги.....	38, 155
<i>тангенціальна складова швидкості</i>		Щит	
<i>переміщення судна</i>	36, 395	<i>головний розподільний</i>	31, 195
Шина високої напруги	86	<i>головний розподільний високої напруги</i>	
Ширина			31, 77
<i>моделі судна</i>	34, 395	<i>головний розподільний низької напруги</i>	
<i>судна</i>	34, 395		31, 77
Широтно–імпульсна модуляція33,	171,	<i>розподільний</i>	32, 87
269		Щільність води.....	35, 168, 395

Список використаних джерел

1. Abdin, Z. Solar hydrogen hybrid energy systems for off-grid electricity supply: Review Article [Text] / Z. Abdin, C. J. Webb, E. MacA. Gray // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – V. 52. – P. 1791–1808. Doi:[10.1016/j.rser.2015.08.011](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.011).
2. Abdessameud, A. Motion coordination of thrust-propelled under actuated vehicles with intermittent and delayed communications [Text] // A. Abdessameud, I.G. Polushin, A. Tayebi // Systems & Control Letters. – 2015. – V. 79. – P. 15–22. Doi:[10.1016/j.sysconle.2015.02.006](https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2015.02.006).
3. Adamo, F. Estimation of ship emissions in the port of Taranto [Text] / F. Adamo, G. Andria, G. Cavone, C. De Capua, A. M. L. Lanzolla, R. Morello et al. // Measurement. – 2014. – V. 47. – P. 982–988. Doi:[10.1016/j.measurement.2013.09.012](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.09.012).
4. Akyuz, E. A marine accident analyzing model to evaluate potential operational causes in cargo ships [Text] / E. Akyuz // Safety Science. – 2017. – V. 92. – P. 17–25. Doi:[10.1016/j.ssci.2016.09.010](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.09.010).
5. Alam, K. Design and construction of an autonomous underwater vehicle [Text] / K. Alam, T. Ray, S. G. Anavatti // Neurocomputing. – 2014. – V. 142. – P. 16–29. Doi:[10.1016/j.neucom.2013.12.055](https://doi.org/10.1016/j.neucom.2013.12.055).
6. Allan, G. The economics of distributed energy generation: a literature review [Text] / G. Allan, I. Eromenko, M. Gilmartin, I. Kockar, P. McGregor // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – V. 42. – P. 543–556. Doi:[10.1016/j.rser.2014.07.064](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.064).
7. Alli, H. Passive control of overhead cranes [Text] / H. Alli, T. Singh // Journal of Vibration and Control. – 1999. – Vol. 5 (3). – P. 443–459. Doi:[10.1109/CCA.1998.721617](https://doi.org/10.1109/CCA.1998.721617).
8. Almeter, J. Predicting the impact of design and requirement changes on high performance and conventional craft [Text] / J. Almeter, D. Eberhardt; Naval

- Surface Warfare Center // Seventh International Conference On High-Performance Marine Vehicles (HIPER'10); Dr. Ing. P. K. Sahoo. – Melbourne, Florida, USA, 2010 (13 – 15 October). – P. 1–15. Режим доступа: \www/ URL: http://data.hiper-conf.info/Hiper2010_Melbourne.pdf. – 13.05.2016 г. – Загл. с экрана.
9. Arditti, F. Thrust allocation algorithm with efficiency function dependent on the azimuth angle of the actuators [Text] / F. Arditti, F. L. Souza, T. C. Martins, E. A. Tannuri // Ocean Engineering. – 2015. – V. 105. – P. 206–216. Doi:[10.1016/j.oceaneng.2015.06.021](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.06.021).
 10. Arditti, F. Experimental Analysis of a Thrust Allocation Algorithm for *DP* Systems Considering the Interference between Thrusters and Thruster-Hull [Text] / F. Arditti, E. A. Tannuri // IFAC Proceedings Volumes. – 2012. – V. 45, I. 27. – P. 43–48. Doi:[10.3182/20120919-3-IT-2046.00008](https://doi.org/10.3182/20120919-3-IT-2046.00008).
 11. Arora, J. S. Chapter 9 – More on Linear Programming Methods for Optimum Design, In Introduction to Optimum Design (Fourth edition) [Text] / J. S. Arora // Academic Press, Boston. – 2017. – P. 389–421. Doi:[10.1016/B978-0-12-800806-5.00009-3](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800806-5.00009-3).
 12. Aslami, M. About Verification of Multilevel Wavelet-based Numerical Method of Local Structural Analysis for Two-dimensional Problems [Text] / M. Aslami, P. A. Akimov, T. B. Kaytukov // Procedia Engineering. – 2015. – V. 111. – P. 57–64. Doi:[10.1016/j.proeng.2015.07.036](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.036).
 13. Azimuthing Electric Propulsion Drive [Text] / Режим доступа: \www/ URL: [http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/589ea2a5cd61753ec12570c9002ab1d1/\\$file/AzipodNew.pdf](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/589ea2a5cd61753ec12570c9002ab1d1/$file/AzipodNew.pdf). – 24.12.2016 р. – Загол. з екрану.
 14. Azipod Propulsion System [Text] / Режим доступа: \www/ URL: <http://www.dieselduck.info/machine/02%20propulsion/2006%20Introduction%20to%20Azipod%20Propulsion.pdf>. – 24.12.2016 р. – Загол. з екрану.
 15. Babadi, M. K. Effect of hull form coefficients on the vessel sea-keeping performance [Text] / M. K. Babadi, H. Ghassemi; Department of Ocean

- Engineering, AmirKabir University of Technology // Journal of Marine Science and Technology. – 2013. – 11 p. Doi:[10.6119/JMST-013-0117-2](https://doi.org/10.6119/JMST-013-0117-2).
16. Bajec, P. Optimal control of brushless PM motor in parallel hybrid propulsion system [Text] / P. Bajec, B. Pevec, D. Miljavec // Mechatronics. – 2010. – V. 20, I. 4. – P. 464–473. Doi:[10.1016/j.mechatronics.2010.04.004](https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2010.04.004).
 17. Bal Besikçi, E. An artificial neural network based decision support system for energy efficient ship operations [Text] / E. Bal Besikçi, O. Arslan, O. Turan, A. L. Ölçer // Computers & Operations Research. – 2016. – V. 66. – P. 393–401. Doi:[10.1016/j.cor.2015.04.004](https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.04.004).
 18. Balachandran, B. A mechanical filter concept for control of non-linear crane-load oscillation [Text] / B. Balachandran, Y. Y. Li, C. C. Fang // Journal of Sound and Vibration. – 1999. – V. 228, I. 3. – P. 651–682. Doi:[10.1006/jsvi.1999.2440](https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2440).
 19. Balcombe, P. Environmental impacts of microgeneration: integrating solar PV, Stirling engine CHP and battery storage / P. Balcombe, D. Rigby, A. Azapagic // Applied Energy. – 2015. – V. 139. – P. 245–259. Doi:[10.1016/j.apenergy.2014.11.034](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.034).
 20. Baldi, F. Energy Analysis of Ship Energy Systems – The Case of a Chemical Tanker [Text] / F. Baldi, H. Johnson, C. Gabriellii, K. Andersson // Energy Procedia. – 2014. – V. 61. – P. 1732–1735. Doi:[10.1016/j.egypro.2014.12.200](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.200).
 21. Baldi, F. Optimal load allocation of complex ship power plants [Text] / F. Baldi, F. Ahlgren, F. Melino, C. Gabriellii, K. Andersson // Energy Conversion and Management. – 2016. – V. 124. – P. 344–356. Doi:[10.1016/j.enconman.2016.07.009](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.009).
 22. Bassam, A. M. An improved energy management strategy for a hybrid fuel cell/battery passenger vessel [Text] / A. M. Bassam, A. B. Phillips, S. R. Turnock, P. A. Wilson // International Journal of Hydrogen Energy. – 2016. – V. 41, I. 47. – P. 22453–22464. Doi:[10.1016/j.ijhydene.2016.08.049](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.049).

23. Bekker, J. R. A Packaged System Approach to *DP* Vessel Conversion [Text] / J. R. Bekker, S. X. Dou // Dynamic positioning conference: Workboats. – 2002 (September 17 – 18). – 22 p. Режим доступу: \www/ URL: http://dynamic-positioning.com/proceedings/dp2002/workboats_packaged_system.pdf. – 13.05.2016 г. – Загол. з екрану.
24. Belunce, A. Novel control method for overhead crane's load stability [Text] / A. Belunce, V. Pandolfo, H. Roozbahani, H. Handroos // Proceedings of the 2nd International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM2014) September 15 – 17, 2014 Samara, Russia. – 2015. – V. 106. – P. 108–125. Doi:[10.1016/j.proeng.2015.06.014](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.014).
25. Benetazzo, F. Advanced control for fault-tolerant dynamic positioning of an offshore supply vessel [Text] / F. Benetazzo, G. Ippoliti, S. Longhi, P. Raspa // Ocean Engineering. – 2015. – V. 106. – P. 472–484. Doi:[10.1016/j.oceaneng.2015.07.001](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.07.001).
26. Bentin, M. A New Routing Optimization Tool-influence of Wind and Waves on Fuel Consumption of Ships with and without Wind Assisted Ship Propulsion Systems [Text] / M. Bentin, D. Zastrau, M. Schlaak, D. Freye, R. Elsner, S. Kotzur // Transportation Research Procedia. – 2016. – V. 14. – P. 153–162. Doi:[10.1016/j.trpro.2016.05.051](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.051).
27. Bigdeli, N. Optimal management of hybrid PV/fuel cell/battery power system: a comparison of optimal hybrid approaches [Text] / N. Bigdeli // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – V. 42. – P. 377–393. Doi:[10.1016/j.rser.2014.10.032](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.032).
28. Blais, B. A conservative lattice Boltzmann model for the volume-averaged Navier-Stokes equations based on a novel collision operator [Text] / B. Blais, J.-M. Tucny, D. Vidal, F. Bertrand // Journal of Computational Physics. – 2015. – V. 294. – P. 258–273. Doi:[10.1016/j.jcp.2015.03.036](https://doi.org/10.1016/j.jcp.2015.03.036).
29. Brezina, A. J. Measurement of Static and Dynamic Performance Characteristics of Electric Propulsion Systems [Text] / A. J. Brezina,

- S. K. Thomas; American Institute of Aeronautics and Astronautics // 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. – Grapevine (Dallas/Ft. Worth Region), Texas, 2013 (07 – 10 January). Doi:[10.2514/6.2013-500](https://doi.org/10.2514/6.2013-500).
30. Bucknall, R. W. G. On the Conceptual Design and Performance of a Matrix Converter for Marine Electric Propulsion [Text] / R. W. G. Bucknall, K. M. Ciaramella // IEEE Transactions on Power Electronics, 2010. – V. 25, I. 6. – P. 1497–1508. Doi:[10.1109/TPEL.2009.2037961](https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2037961).
 31. Butcher, M. Compact DC power and propulsion systems – the definitive solution [Text] / M. Butcher, R. Maltby, P. S. Parvin // IEEE Electric Ship Technologies Symposium. – 2009. – P. 521–528. Doi:[10.1109/ESTS.2009.4906561](https://doi.org/10.1109/ESTS.2009.4906561).
 32. Budashko, V. Decision support system's concept for design of combined propulsion complexes [Text] / V. Budashko, V. Nikolskyi, O. Onishchenko, S. Khniunin / Eastern–European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – V. 3. – № 8(81). – P. 10 – 21. Doi:[10.15587/1729-4061.2016.72543](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72543).
 33. 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).
 34. 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.
 35. 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).
36. 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).
 37. Budashko, V. V. Increasing control's efficiency for the ship's two-mass electric drive [Text] / V. V. Budashko / Electrical engineering & electromechanics. – 2016. – №4. – P. 34 – 42. Doi:[10.20998/2074-272X.2016.4.05](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.4.05).
 38. 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). – P. 17–22. Doi: [10.15276/eltecs.23.99.2016.02](https://doi.org/10.15276/eltecs.23.99.2016.02).
 39. 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).
 40. 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 доступу: \www/ URL: <http://www.maritime.itu.edu.tr/icers12/program.htm>. – 13.05.2016 г. – Загол. з екрану.
 41. Cafieri, S. Plunge milling time optimization via mixed-integer nonlinear programming [Text] / S. Cafieri, F. Monies, M. Mongeau, C. Bes //

- Computers & Industrial Engineering. – 2016. – V. 98. – P. 434–445.
Doi:[10.1016/j.cie.2016.06.015](https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.06.015).
42. Califano, A. Identification of ventilation regimes of a marine propeller by means of dynamic-loads analysis [Text] / A. Califano, S. Steen // Ocean Engineering. – 2011. – V. 38, I. 14–15. – P. 600–1610.
Doi:[10.1016/j.oceaneng.2011.07.009](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.07.009).
 43. Carrera, A. Cognitive system for autonomous underwater intervention [Text] / A. Carrera, N. Palomeras, N. Hurtós, P. Kormushev, M. Carreras // Pattern Recognition Letters. – 2015. – V. 67(1). – P. 91–99.
Doi:[10.1016/j.patrec.2015.06.010](https://doi.org/10.1016/j.patrec.2015.06.010).
 44. Contra-rotating Azipod propulsion selected for Japanese fast ferries // The Naval Architect, June 2003, p. 6. Режим доступу: \WWW/ URL: https://library.e.abb.com/public/94aa9cee1965090dc12571d900432d64/64-67%203M654_ENG72dpi.pdf. – 13.10.2016 р. – Загол. з екрану.
 45. Corradini, M. L. A nonlinear fault-tolerant thruster allocation architecture for underwater remotely operated vehicles [Text] / M. L. Corradini, A. Cristofaro // IFAC-PapersOnLine. – 2016. – V. 49, I. 23. – P. 285–290.
Doi:[10.1016/j.ifacol.2016.10.356](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.356).
 46. Chang, X. Modified alternating direction method of multipliers for convex quadratic semidefinite programming [Text] / X. Chang, S. Liu, X. Li // Neurocomputing. – 2016. – V. 214. – P. 575–586.
Doi:[10.1016/j.neucom.2016.06.043](https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.06.043).
 47. Chen, H. Effect of DGPS failures on dynamic positioning of mobile drilling units in the North Sea [Text] / H. Chen, T. Moan, H. Verhoeven // Accident Analysis & Prevention. – 2009. – V. 41, I. 6 – P. 1164–1171. Doi:[10.1016/j.aap.2008.06.010](https://doi.org/10.1016/j.aap.2008.06.010).
 48. Chen, C. Optimal allocation and economic analysis of *Energy Storage System* in microgrids [Text] / C. Chen, S. Duan, T. Cai, B. Liu, G. Hu // IEEE

- Transactions on Power Electronics. – 2011. V. 26. – P. 2762–2773. Doi:[10.1109/TPEL.2011.2116808](https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2116808).
49. Chen, T.-Y. An interval-valued intuitionistic fuzzy LINMAP method with inclusion comparison possibilities and hybrid averaging operations for multiple criteria group decision making [Text] / T.-Y. Chen // Knowledge-Based Systems. – 2013. – V. 45. – P. 134–146. Doi:[10.1016/j.knosys.2013.02.012](https://doi.org/10.1016/j.knosys.2013.02.012).
 50. Cho, J. *Energy Storage Systems* in energy and ancillary markets: a backwards induction approach [Text] / J. Cho, A. N. Kleit // Applied Energy. – 2015. – V. 147. – P. 176–183. Doi:[10.1016/j.apenergy.2015.01.114](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.114).
 51. Choi, C. H. Development and demonstration of PEM fuel-cell-battery hybrid system for propulsion of tourist boat / C. H. Choi, S. Yu, I.-S. Han, B.-K. Kho, D.-G. Kang et al. // International Journal of Hydrogen Energy. – 2016. – V. 41, I. 5. – P. 3591–3599. Doi:[10.1016/j.ijhydene.2015.12.186](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.186).
 52. Christiaan de Wit. Optimal Thrust Allocation Methods for Dynamic Positioning of Ships / de Wit Christiaan // A thesis submitted to the Delft Institute of Applied Mathematics in partial fulfillment of the requirements. – Delft, the Netherlands: Delft University of Technology. – 2009. – 68 p. Режим доступу: \WWW/ URL: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:4c9685ac-3f76-41c0-bae5-a2a96f4d757e>. – 13.10.2016 р. – Загол. з екрану.
 53. Chuang, S.-J. Improvement of integrated transmission line transfer index for power system voltage stability [Text] / S.-J. Chuang, C.-M. Hong, C.-H. Chen // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2016. – V. 78. – P. 830–836. Doi:[10.1016/j.ijepes.2015.11.111](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.111).
 54. Cozijn, H. Analysis of the velocities in the wake of an azimuthing thruster, using PIV measurements and CFD calculations [Text] / H. Cozijn, R. Hallmann, A. Koop // Dynamic positioning conference: thrusters session. – October 12–13, 2010. – Houston: Maritime Research Institute Netherlands (MARIN). – 25 p. Режим доступу: \WWW/ URL:

<http://www.refresco.org/wp-content/uploads/2015/05/2010-MTS-DP-Cozijn-Hallmann-Koop.pdf>. – 24.12.2016 р. – Загол. з екрану.

55. Cwilewicz, R. Prognosis of marine propulsion plants development in view of new requirements concerning marine fuels [Text] / R. Cwilewicz, Z. Górski ; Marine Power Plants Department Gdynia Maritime University // Journal of KONES Powertrain and Transport. – Gdynia, 2014. – 2, V. 21. Doi:[10.5604/12314005.1133866](https://doi.org/10.5604/12314005.1133866).
56. Dedes, E. K. Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping [Text] / E. K. Dedes, D. A. Hudson, S. R. Turnock // Energy Policy. – 2012. – V. 40. – P. 204–218. Doi:[10.1016/j.enpol.2011.09.046](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.046).
57. Dedes, E. K. Investigation of Diesel Hybrid systems for fuel oil reduction in slow speed ocean going ships [Text] / E. K. Dedes, D. A. Hudson, S. R. Turnock // Energy. – 2016. – V. 114. – P. 444–456. Doi:[10.1016/j.energy.2016.07.121](https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.121).
58. Delucchi, M. A. Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part II: Reliability, system and transmission costs, and policies [Text] / M. A. Delucchi, M. Z. Jacobson // Energy Policy. – 2011. – V. 39. – I. 3. – P. 1170–1190. Doi:[10.1016/j.enpol.2010.11.045](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.11.045).
59. Deng, J.Q. Investigation of directional hydraulic fracturing based on true tri-axial experiment and finite element modeling [Text] / J.Q. Deng, C. Lin, Q. Yang, Y.R. Liu, Z.F. Tao, H.F. Duan // Computers and Geotechnics, Vol. 75, 2016, P. 28–47. Doi:[10.1016/j.compgeo.2016.01.018](https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.01.018).
60. Du, J. Robust dynamic positioning of ships with disturbances under input saturation [Text] / J. Du, X. Hu, M. Krstić, Y. Sun // Automatica. – 2016. – V. 73. – P. 207–214. Doi:[10.1016/j.automatica.2016.06.020](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2016.06.020).
61. de-Troya, J. J. Analyzing the possibilities of using fuel cells in ships [Text] / J. J. de-Troya, C. Álvarez, C. Fernández-Garrido, L. Carral // International

- Journal of Hydrogen Energy. – 2016. – V. 41. – I. 4 – P.2853–2866. Doi:[10.1016/j.ijhydene.2015.11.145](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.145).
62. Diab, F. Novel comparison study between the hybrid renewable energy systems on land and on ship [Text] / F. Diab, H. Lan, S. Ali // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – V. 63. – P. 452–463. Doi:[10.1016/j.rser.2016.05.053](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.053).
 63. Diaf, S. Design and technoeconomical optimization for hybrid PV/wind system under various meteorological conditions [Text] / S. Diaf, G. Notton, M. Belhamel, M. Haddadi, A. Louche // Applied Energy. – 2008. – V. 85. – P. 968–987. Doi:[10.1016/j.apenergy.2008.02.012](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.02.012).
 64. Edmunds, M. An enhanced disk averaged CFD model for the simulation of horizontal axis tidal turbines [Text] / M. Edmunds, A. J. Williams, I. Masters, T. N. Croft // Renewable Energy. – 2017. – V. 101. – P. 67–81. Doi:[10.1016/j.renene.2016.08.007](https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.007).
 65. Encinas, N. Energy market segmentation for distributed energy resources implementation [Text] / N. Encinas, C. Alvarez, D. Alfonso, A. Perez-Navarro, et al. // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2007. – V. 1, I. 2. – P. 324–330. Doi:[10.1049/iet-gtd:20060165](https://doi.org/10.1049/iet-gtd:20060165).
 66. Ess, A. A comprehensive power loss, efficiency, reliability and cost calculation of a 1 MW/500 kW h battery based *Energy Storage System* for frequency regulation application [Text]/ A. Ess, A. L. Stress, I. Energy // Renewable Energy. – 2015. – V. 74. – P. 158–169. Doi:[10.1016/j.renene.2014.07.046](https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.07.046).
 67. Fang, W. Design and implementation of a triple-redundant dynamic positioning control system for deep-water drilling rigs [Text] / W. Fang, L. Ming, X. Feng // Applied Ocean Research. – 2016. – V. 57. – P. 140–151. Doi:[10.1016/j.apor.2016.03.007](https://doi.org/10.1016/j.apor.2016.03.007).
 68. Final report on the investigation of the Macondo well blowout // Deepwater horizon study group, March 1, 2011. Режим доступа: \www/ URL:

http://ccrm.berkeley.edu/pdfs_papers/bea_pdfs/dhsgfinalreport-march2011-tag.pdf. – 24.12.2016 р. – Загол. з екрану.

69. Fontem, B. A decomposition-based heuristic for stochastic emergency routing problems [Text] / B. Fontem, S. H. Melouk, B. B. Keskin, N. Bajwa // Expert Systems with Applications. – 2016. – V. 59. – P. 47–59. Doi:[10.1016/j.eswa.2016.04.002](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.04.002).
70. Fossen, T. I. Identification of dynamically positioned ships [Text] / T. I. Fossen, S. I. Sagatun, A. J. Sørensen // Control Engineering Practice: 1999. – March. – P. 369–376. Doi:[10.1016/0967-0661\(96\)00014-7](https://doi.org/10.1016/0967-0661(96)00014-7), Marine Systems Simulator Режим доступу: \www/ URL: <http://www.marinecontrol.org/>. – 24.02.2015 р. – Загол. з екрану.
71. Fu, L. Models and Algorithms for Dynamic Headway Control [Text] / L. Fu, M. Dessouky // Computers & Industrial Engineering. Available online 27 November 2016. Doi:[10.1016/j.cie.2016.11.030](https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.11.030).
72. Gebreel, A. A. Power quality and total harmonic distortion response for MMC with increasing arm inductance based on closed loop-needless PID controller [Text] / A. A. Gebreel, L. Xu // Electric Power Systems Research. – 2016. – V. 133. – P. 281–291. Doi:[10.1016/j.epsr.2015.12.024](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.12.024).
73. Geertsma, R. D. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments [Text] / R. D. Geertsma, R. R. Negenborn, K. Visser, J. J. Hopm // Applied Energy. – 2017. – V. 194. – P. 30–54. Doi:[10.1016/j.apenergy.2017.02.060](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.060).
74. Ghassemi, H. Computational hydrodynamic analysis of the propeller-rudder and the AZIPOD systems [Text] / H. Ghassemi, P. Ghadimi // Ocean Engineering. – 2008. – V. 35, I. 1. – P. 117–130. Doi:[10.1016/j.oceaneng.2007.07.008](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2007.07.008).
75. Giannoutsos, S. V. Energy management and D/G fuel consumption optimization in the power system of marine vessels through VFD-based process flow control [Text] / S. V. Giannoutsos, S. N. Manias // IEEE 15th

[До змісту](#)

- International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). – 2015. P. 842–850. Doi:[10.1109/EEEIC.2015.7165274](https://doi.org/10.1109/EEEIC.2015.7165274).
76. Gonca, G. Theoretical and experimental investigation of the Miller cycle diesel engine in terms of performance and emission parameters [Text] / G. Gonca, B. Sahin, A. Parlak, Y. Ust, V. Ayhan, İ. Cesur, B. Boru // Applied Energy. – 2015. – V. 138. – P. 11–20. Doi:[10.1016/j.apenergy.2014.10.043](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.043).
 77. Guo, G. Covariance matrix and transfer function of dynamic generalized linear models [Text] / G. Guo, W. You, L. Lin, G. Qian // Journal of Computational and Applied Mathematics. – 2016. – V. 296. – P. 613–624. Doi:[10.1016/j.cam.2015.10.015](https://doi.org/10.1016/j.cam.2015.10.015).
 78. Guo, X. Resonant water motions within a recessing type moonpool in a drilling vessel [Text] / X. Guo, H. Lu, J. Yang, T. Peng // Ocean Engineering. – 2017. – V. 129. – P. 228–239. Doi:[10.1016/j.oceaneng.2016.11.030](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.11.030).
 79. Haaf, C. G. Sensitivity of Vehicle Market Share Predictions to Discrete Choice Model Specification [Text] / C. G. Haaf, J. J. Michalek, W. R. Morrow, Y. Liu // Journal of Mechanical Design. – ASME, 2014 (December). – 136/121402-1. Doi:[10.1115/1.4028282](https://doi.org/10.1115/1.4028282).
 80. Halvaih, A. E. Computer aided design tool for electric, hybrid electric and plug-in hybrid electric vehicles [Text] / A. E. Halvaih, M. Ehsani // 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Chicago, IL, IEEE, 2011. – P. 1–6. Doi:[10.1109/VPPC.2011.6043005](https://doi.org/10.1109/VPPC.2011.6043005).
 81. Haseltalab, A. Multi-Level Predictive Control for Energy Management of Hybrid Ships in the Presence of Uncertainty and Environmental Disturbances [Text] / A. Haseltalab, R. R. Negenborn, G. Lodewijks // IFAC-Papers On Line. – 2016. – V. 49, I. 3. – P. 90–95. Doi:[10.1016/j.ifacol.2016.07.016](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.016).
 82. Hassan, S. R. Evaluation of Propulsion System Used in URRG-Autonomous Surface Vessel (ASV) [Text] / S. R. Hassan, M. Zakaria, M. R. Arshad, Z. A. Aziz // Procedia

Engineering. – 2012. – V. 41, P. – 607–613. Doi:[10.1016/j.proeng.2012.07.219](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.219).

83. Henry, R. J. Cargo pendulation reduction on ship-mounted cranes via boom-luff angle actuation [Text] / R. J. Henry, Z. N. Masoud, A. H. Nayfeh, D. T. Mook // Journal of Vibration and Control. – 2001. – V. 7, no. 8. – P. 1253–1264. DOI: [10.2514/6.2000-1543](https://doi.org/10.2514/6.2000-1543).
84. Hilgert, N. Change detection for uncertain autoregressive dynamic models through nonparametric estimation [Text] / N. Hilgert, G. Verdier, J.-P. Vila // Statistical Methodology. – 2016. – V. 33. – P. 96–113. Doi:[10.1016/j.stamet.2016.08.003](https://doi.org/10.1016/j.stamet.2016.08.003).
85. Hodge, C. G. The electric warship then, now and later [Text] / C. G. Hodge, D. J. Mattick // In: Proceedings of the 9th international naval engineering conference. – 2008. – P. 556–65. Режим доступу: \www/ URL: <https://www.bmtdsl.co.uk/media/6097927/BMTDSL-Electric-warship-then-now-and-later-Conpaper-INEC-Apr08.pdf>. – 24.02.2017 р. – Загол. з екрану.
86. Hoffmann, C. Active damping of container crane load swing by hoisting modulation [Text] / C. Hoffmann, C. Radisch, H. Werner // An LPV approach, IEEE 51st Annual Conference on Decision and Control (CDC). – 2012. ISSN: 0743-1546.
87. Home Kongsberg Maritime: Dynamic positioning – *DP* system Single system K-Pos *DP*-11/12 Режим доступу: \www/ URL: <https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0240.nsf/AllWeb/E477FA13B4BCC535C1256A570031678D?OpenDocument> – 24.02.2017 р. – Загол. з екрану.
88. Hreniuc, V. A Pleading for Ship Manned Models as a “Physical” Simulator in the Ship Handling Training Process [Text] / V. Hreniuc, G. Batrinca // Procedia Engineering. – 2014. – V. 69. – P. 1410–1419. Doi:[10.1016/j.proeng.2014.03.136](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.136).

89. Huacan, F. Chapter 2 – Offshore Oil and Gas Drilling Engineering and Equipment [Text] / F. Huacan, D. Menglan // Offshore Operation Facilities: Equipment and Procedures. – 2014. – P. 141–340. Doi:[10.1016/B978-0-12-396977-4.00002-0](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396977-4.00002-0).
90. Hussein, A. A. Design considerations and performance evaluation of outdoor PV battery chargers [Text] / A. A. Hussein, A. A. Fardoun // Renewable Energy. – 2015. – V. 82. – P. 85–91. Doi:[10.1016/j.renene.2014.08.063](https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.08.063).
91. Huynh, D. B. P. A static condensation reduced basis element method: Complex problems [Text] / D. B. P. Huynh, D. J. Knezevic, A. T. Patera // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2013. – V. 259. – P. 197–216. Doi:[10.1016/j.cma.2013.02.013](https://doi.org/10.1016/j.cma.2013.02.013).
92. Indragandhi, V. Resources, configurations, and soft computing techniques for power management and control of PV/wind hybrid system [Text] / V. Indragandhi, V. Subramaniaswamy, R. Logesh // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – V. 69. – P. 129–143. Doi:[10.1016/j.rser.2016.11.209](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.209).
93. Jaguemont, J. A comprehensive review of *Lithium-ion batteries* used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures [Text] / J. Jaguemont, L. Boulon, Y. Dubé // Applied Energy. – 2016. – V. 164. – P. 99–114. Doi:[10.1016/j.apenergy.2015.11.034](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.034).
94. Jeyaprabha, S. B. Optimal sizing of photovoltaic/battery/diesel based hybrid system and optimal tilting of solar array using the artificial intelligence for remote houses in India [Text] / S. B. Jeyaprabha, A. L. Selvakumar // Energy and Buildings. – 2015. – V. 96. – P. 40–52. Doi:[10.1016/j.enbuild.2015.03.012](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.012).
95. Jian, L. Numerical investigation into effects on momentum thrust by nozzle's geometric parameters in water jet propulsion system of autonomous underwater vehicles [Text] / L. Jian, L. Xiwen, Z. Zuti, L. Xiaohui, Z. Yuquan // Ocean Engineering. – 2016. – V. 123. – P. 327–345. Doi:[10.1016/j.oceaneng.2016.07.041](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.07.041).

96. Johnson, H. Barriers to improving energy efficiency in short sea shipping: an action research case study [Text] / H. Johnson, M. Johansson, K. Andersson // Journal of Cleaner Production. – 2014. – V. 66. – P. 317–327. Doi:[10.1016/j.jclepro.2013.10.046](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.046).
97. Johnson, H. Increased energy efficiency in short sea shipping through decreased time in port [Text] / H. Johnson, L. Styhre // Transportation Research Part A: Policy and Practice. – 2015. – V. 71. – P. 167–178. Doi:[10.1016/j.tra.2014.11.008](https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.11.008).
98. Jutao, C. Design and implementation of Marine Electric Propulsion Dynamic Load Simulation System [Text] / Jutao C., Huayao Z., Aibing Y. // 2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. – Singapore, IEEE, 2008. – P. 483–488. Doi:[10.1109/ICIEA.2008.4582562](https://doi.org/10.1109/ICIEA.2008.4582562).
99. Kavali, J. Analysis of various control schemes for minimal Total Harmonic Distortion in cascaded H-bridge multilevel inverter [Text] / J. Kavali, A. Mittal // Journal of Electrical Systems and Information Technology. – 2016. – Available online 3 August 2016. Doi:[10.1016/j.jesit.2016.01.007](https://doi.org/10.1016/j.jesit.2016.01.007).
100. Ketsingsoi, S. An Off-line Battery Charger based on Buck-boost Power Factor Correction Converter for Plug-in Electric Vehicles [Text] / S. Ketsingsoi, Y. Kumsuwan // Energy Procedia. – 2014. – V. 56. – P. 659–666. Doi:[10.1016/j.egypro.2014.07.205](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.205).
101. Kibi, Y. Fabrication of high-power electric double-layer capacitors [Text] / Y. Kibi, T. Saito, M. Kurata, J. Tabuchi, A. Ochi // Journal of Power Sources. – 1996. – V. 60, I. 2. – P. 219–224. Doi:[10.1016/S0378-7753\(96\)80014-0](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(96)80014-0).
102. Kim, D. H. Ultimate limit state-based multi-objective optimum design technology for hull structural scantlings of merchant cargo ships [Text] / D. H. Kim, J. K. Paik // Ocean Engineering. – 2017. – V. 129. – P. 318–334. Doi:[10.1016/j.oceaneng.2016.11.033](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.11.033).

103. Kim, H.-S. Study on icebreaking performance of the Korea icebreaker ARAON in the arctic sea [Text] // H.-S. Kim, C.-J. Lee, K.-S. Choi, M.-C. Kim // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. – 2011. – V. 3, I. 3. – P. 208–215. Doi:[10.2478/IJNAOE-2013-0064](https://doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0064).
104. Kim, Y.-S. Weather-optimal control of a dynamic positioning vessel using back stepping: simulation and model experiment [Text] / Y.-S. Kim, J. Kim, H.-G. Sung // IFAC–PapersOnLine. – 2016. – V. 49, I. 23. – P. 232–238. Doi:[10.1016/j.ifacol.2016.10.348](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.348).
105. Kiran, D. R. Chapter 26 – Failure Modes and Effects Analysis [Text] / D. R. Kiran // In Total Quality Management, Butterworth–Heinemann – 2017. – P. 373–389. Doi:[10.1016/B978-0-12-811035-5.00026-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811035-5.00026-X).
106. Ko, J. Comparative investigation of NOx emission characteristics from a Euro 6–compliant diesel passenger car over the NEDC and WLTC at various ambient temperatures [Text] / J. Ko, D. Jin, W. Jang, C.-L. Myung, S. Kwon, S. Park // Applied Energy. – 2017. – V. 187. – P. 652–662. Doi:[10.1016/j.apenergy.2016.11.105](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.105).
107. Kobougias, I. PV Systems Installed in Marine Vessels: Technologies and Specifications: Research Article [Text] / I. Kobougias, E. Tatakis, J. Prousalidis // Advances in Power Electronics. – 2013. – 8 p. Doi:[10.1155/2013/831560](https://doi.org/10.1155/2013/831560).
108. Kobyliński, L. Problems of handling ships equipped with AZIPOD propulsion systems [Text] / L. Kobyliński // Prace naukowe politechniki warszawskiej. – 2013. – V. 95. – P. 232–245. Режим доступа: \www/ URL: <https://pbn.nauka.gov.pl/polindex-webapp/browse/article/article-f315dfd7-df06-463e-8de7-b553f8c232db>. – 24.12.2016 р. – Загол. з екрану.
109. Kozinov, S. Periodic set of limited electrically permeable interface cracks with contact zones [Text] / S. Kozinov, V. Loboda, Y. Lapusta // Mechanics Research Communications. – 2013. – V. 48. – P. 32–41. Doi:[10.1016/j.mechrescom.2012.12.002](https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2012.12.002).

110. Kritzinger, D. Failure Modes and Effects Analysis [Text] / D. Kritzinger // In Aircraft System Safety, Woodhead Publishing. – 2017. – P. 101–132. Doi:[10.1016/B978-0-08-100889-8.00005-2](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100889-8.00005-2).
111. Kurzweil, P. Post-lithium-ion battery chemistries for hybrid electric vehicles and battery electric vehicles [Text] / P. Kurzweil // Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles: A volume in Woodhead Publishing Series in Energy. – 2015. – P. 127–172. Doi:[10.1016/B978-1-78242-377-5.00007-8](https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-377-5.00007-8).
112. Kwatny, H.G. Fuel Optimal Control With Service Reliability Constraints for Ship Power Systems [Text] / H. G. Kwatny, G. Bajpai, K. Miu, M. Yasar // IFAC Proceedings Volumes. – 2014. – V. 47, I. 3. – P. 6386–6391. Doi:[10.3182/20140824-6-ZA-1003.01773](https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01773).
113. Lashway, C. R. Hybrid energy storage management in ship power systems with multiple pulsed loads [Text] / C. R. Lashway, A. T. Elsayed, O. A. Mohammed // Electric Power Systems Research. – 2016. – V. 141. – P. 50–62. Doi:[10.1016/j.epsr.2016.06.031](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.06.031).
114. Lee, K. J. Hybrid photovoltaic/diesel green ship operating in standalone and grid-connected mode in South Korea – Experimental investigation [Text] / K. J. Lee, D. S. Shin, J. P. Lee, D. W. Yoo, H. K. Choi, H. J. Kim // 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). – V. 49. – 2012. – P. 580–583. Doi:[10.1109/VPPC.2012.6422691](https://doi.org/10.1109/VPPC.2012.6422691).
115. Lehner, P. In deep water: the anatomy of a disaster, the fate of the gulf, and how to end our oil addiction [Text] / P. Lehner, B. Deans. – New York: "OR Books". – 2010. – 173 p.
116. Li, C.-Z. Fundamentals of renewable energy processes, 2nd ed. [Text] / C.-Z. Li // Process Safety and Environmental Protection. . – 2006. – V. 84. – I. 6. – P. 476. Doi:[10.1205/psep.br.0606](https://doi.org/10.1205/psep.br.0606).
117. Ling-Chin, J. Investigating the implications of a new-build hybrid power system for Roll-on/Roll-off cargo ships from a sustainability perspective – A life cycle assessment case study [Text] / J. Ling-Chin, A. P. Roskilly //

- Applied Energy. – 2016. – V. 181. – P. 416–434. Doi:[10.1016/j.apenergy.2016.08.065](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.065).
118. Livanosa, G. A. Techno-economic investigation of alternative propulsion plants for Ferries and RoRo ships [Text] / G. A. Livanosa, G. Theotokatos, D.-N. Pagonis // Energy Conversion and Management. – V. 79. March, 2014. P. 640–651. Doi:[10.1016/j.enconman.2013.12.050](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.12.050).
 119. Lujano-Rojas, J. M. Probabilistic modelling and analysis of stand-alone hybrid power systems [Text] / J. M. Lujano-Rojas, R. Dufo-López, J. L. Bernal-Agustín // Energy. – 2013. – V. 63. – P. 19–27. Doi:[10.1016/j.energy.2013.10.003](https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.003).
 120. Lützen, M. Energy efficiency of working vessels – A framework [Text] / M. Lützen, L. L. Mikkelsen, S. Jensen, H. B. Rasmussen // Journal of Cleaner Production. – 2017. – V. 143. – P. 90–99. Doi:[10.1016/j.jclepro.2016.12.146](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.146).
 121. Ma, H. Continuously dynamic additive models for functional data [Text] / H. Ma, Z. Zhu // Journal of Multivariate Analysis. – 2016. – V. 150. – P. 1–13. Doi:[10.1016/j.jmva.2016.05.003](https://doi.org/10.1016/j.jmva.2016.05.003).
 122. Ma, P. Fracture analysis of an electrically conductive interface crack with a contact zone in a magnetoelectroelastic bimaterial system [Text] / P. Ma, R.K.L. Su, W.J. Feng // International Journal of Solids and Structures. – 2015. – V. 53. – P. 48–57. Doi:[10.1016/j.ijsolstr.2014.10.024](https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2014.10.024).
 123. Maciel, P. Modelling Thruster-Hull Interaction with CFD [Text] / P. Maciel, A. Koop, G. Vaz // Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. – OMAE2013. – June 9 – 14, 2013. Режим доступу: \www/ URL: <http://www.marin.nl/web/Publications/Publication-items/Modelling-ThrusterHull-Interaction-with-CFD.htm>. – 24.12.2016 р. – Загол. з екрану.
 124. Maheri, A. Multi-objective design optimization of standalone hybrid wind-PV-diesel systems under uncertainties [Text] / A. Maheri // Renewable Energy. – 2014. – V. 66. – P. 650–661. Doi:[10.1016/j.renene.2014.01.009](https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.009).

125. Maleki, A. Artificial bee swarm optimization for optimum sizing of a stand-alone PV/WT/FC hybrid system considering LPSP concept [Text] / A. Maleki, A. Askarzadeh // Solar Energy. – 2014. – V. 107. – P. 227–235. Doi:[10.1016/j.solener.2014.05.016](https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.016).
126. Maleki, A. Optimal sizing of a PV/wind/diesel system with battery storage for electrification to an off-grid remote region: a case study of Rafsanjan, Iran [Text] / A. Maleki, A. Askarzadeh // Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2014. – V. 7. – P. 147–153. Doi:[10.1016/j.seta.2014.04.005](https://doi.org/10.1016/j.seta.2014.04.005).
127. Mander, S. Slow steaming and a new dawn for wind propulsion: A multi-level analysis of two low carbon shipping transitions [Text] / S. Mander // Marine Policy, In Press, Corrected Proof, Available online. – 2016. Doi:[10.1016/j.marpol.2016.03.018](https://doi.org/10.1016/j.marpol.2016.03.018).
128. Maragkogianni, A. Evaluating the social cost of cruise ships air emissions in major ports of Greece [Text] / A. Maragkogianni, S. Papaefthimiou // Transportation Research Part D: Transport and Environment. – 2015. – V. 36. – P. 10–17. Doi:[10.1016/j.trd.2015.02.014](https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.02.014).
129. Matthé, U. Eberle 8-The Voltec System-Energy Storage and Electric Propulsion [Text] / R. Matthé, U. Eberle // Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications. – 2014. – P. 51–176. Doi:[10.1016/B978-0-444-59513-3.00008-X](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59513-3.00008-X).
130. Mauro, F. Advantages and disadvantages of thruster allocation procedures in preliminary dynamic positioning predictions [Text] / F. Mauro, R. Nabergoj // Ocean Engineering. – 2016. – V. 123. – P. 96–102. Doi:[10.1016/j.oceaneng.2016.06.045](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.06.045).
131. McCamish, B. A backend framework for the efficient management of power system measurements [Text] / B. McCamish, R. Meier, J. Landford, R. B. Bass, D. Chiu, E. Cotilla-Sanchez // Electric Power Systems Research. – 2016. – V. 140. – P. 797–805. Doi:[10.1016/j.epsr.2016.05.003](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.05.003).

132. McCoy, T. J. Trends in ship electric propulsion [Text] / T.J. McCoy // IEEE Xplore Conference: Power Engineering Society Summer Meeting. – 2002. – V. 1. – P. 243–346. Doi:[10.1109/PESS.2002.1043247](https://doi.org/10.1109/PESS.2002.1043247).
133. MDL Home Page: Fanbeam® Laser *DP* reference system [Електронний ресурс]. URL: <http://www.mdl-laser.com/en/rugged-laser-equipment-for-extreme-environments-14735>. (дата звернення: 13.10.2016).
134. Metallinos, K. S. Derivation and evaluation of generic measurement-based dynamic load models [Text] / K. S. Metallinos, T. A. Papadopoulos, C. A. Charalambous // Electric Power Systems Research. – 2016. – V. 140. – P. 193–200. Doi:[10.1016/j.epsr.2016.06.022](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.06.022).
135. Mezzadri, F. A Chebyshev technique for the solution of optimal control problems with nonlinear programming methods [Text] / F. Mezzadri, E. Galligani // Mathematics and Computers in Simulation. – 2016. – V. 121. – P. 95–108. Doi:[10.1016/j.matcom.2015.08.023](https://doi.org/10.1016/j.matcom.2015.08.023).
136. Militello, L. G. The Role of Cognitive Systems Engineering in the Systems Engineering Design Process [Text] / L. G. Militello, C. O. Dominguez, G. Lintern, G. Klein // Systems Engineering: Regular Paper. – Wiley Periodicals, Inc, 2009. – P. 1–13. Doi:[10.1002/sys.20147](https://doi.org/10.1002/sys.20147).
137. Mincheol, R., Prediction and improvement of the solid particles transfer rate for the bulk handling system design of offshore drilling vessels [Text] / R. Mincheol, S. J. Dong, K. Yooil // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. – 2015. – V. 7, I. 6. – P. 964–978. Doi:[10.1515/ijnaoe-2015-0067](https://doi.org/10.1515/ijnaoe-2015-0067).
138. Ming, T. Reliability Analysis and Optimization of the Ship Ballast Water System [Text] / T. Ming, Z. Fa-xin, L. Yu-le // The Open Automation and Control Systems Journal. – 2015. – 7. – P. 100–105. Режим доступу: \www/ URL: <http://benthamopen.com/contents/pdf/TOAUTOCJ/TOAUTOCJ-7-100.pdf>. – 14.05.2016 г. – Загол. з екрану.

139. Mishra, C. Rolling element bearing defect diagnosis under variable speed operation through angle synchronous averaging of wavelet de-noised estimate [Text] / C. Mishra, A.K. Samantaray, G. Chakraborty // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2016. – V. 72–73. – P. 206–222. Doi:[10.1016/j.ymssp.2015.10.019](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.10.019).
140. Muntean, M.I. Visual A Multidimensional View Proposal of the Data Collected Through a Questionnaire. Associated Data Mart Deployment Framework [Text] / M. I. Muntean, D. Târnavăanu; Technical University Munich // ISPRS International Journal of Geo-Information. – München, 2013. – 2. – P. 813–836. Doi:[10.3390/ijgi2030817](https://doi.org/10.3390/ijgi2030817).
141. Natale, F. D. Particulate matter in marine diesel engines exhausts: Emissions and control strategies [Text] / F. D. Natale, C. Carotenuto // Transportation Research Part D: Transport and Environment. – 2015. – V. 40. – P. 166–191. Doi:[10.1016/j.trd.2015.08.011](https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.08.011).
142. Nelson, D. B., Nehrir M. H., Wang C. Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems [Text] / D. B. Nelson, M. N. Nehrir, C. Wang // Renewable Energy. – 2006. – V. 31. – P. 1641–1656. Doi:[10.1016/j.renene.2005.08.031](https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.08.031).
143. Nguyen, V. T. Modelling turbulence with an Actuator Disk representing a tidal turbine [Text] / V. T. Nguyen, S. S. Guillou, J. Thiébot, A. S. Cruz // Renewable Energy. – 2016. – V. 97. – P. 625–635. Doi:[10.1016/j.renene.2016.06.014](https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.06.014).
144. Nikolskyi, V. The monitoring system of the [Coanda effect](#) 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 доступу: \www/ URL: <http://www.maritime.itu.edu.tr/icers12/program.htm>. – 13.05.2016 p. – Загол. з екрану.

145. Ogbe, E. A new cross decomposition method for stochastic mixed-integer linear programming [Text] / E. Ogbe, X. Li // European Journal of Operational Research. – 2017. – V. 256, I. 2. – P. 487–499. Doi:[10.1016/j.ejor.2016.08.005](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.08.005).
146. O'Neill, L. E. Time-averaged and transient pressure drop for flow boiling with saturated inlet conditions [Text] / L. E. O'Neill, C. R. Kharangate, I. Mudawar // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – V. 103. – P. 133–153. Doi:[10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.031](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.031).
147. Oosterveld, M. W. C. Further computer-analyzed Data of the Wageningen B-screw Series [Text] / M. W. C. Oosterveld, P. van Oossanen // Int. Shipbuilding Progress. – 2011. – V. 22. – P. 269–317. Режим доступу: \www/ URL: <http://www.sname.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=1f4cf6d6-4fdc-4238-8470-716717920f07>. – 13.11.2016 р. – Загол. з екрану.
148. Ordoñez, J. Processes and technologies for the recycling and recovery of spent *Lithium-ion batteries* [Text] / J. Ordoñez, E.J. Gago, A. Girard // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – V. 60. – P. 195–205. Doi:[10.1016/j.rser.2015.12.363](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.363).
149. Ortolani, F. Investigation of the radial bearing force developed during ship operations. Part 2: Unsteady maneuvers [Text] / F. Ortolani, S. Mauro, G. Dubbioso // Ocean Engineering. – 2015. – V. 106. – P. 424–445. Doi: [10.1016/j.oceaneng.2015.06.058](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.06.058).
150. Ovrum, E. Modelling lithium-ion battery hybrid ship crane operation [Text] / E. Ovrum, T.F. Bergh // Applied Energy. – 2015. – V. 152. – P. 162–172. Doi:[10.1016/j.apenergy.2015.01.066](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.066).
151. Palmer, A. Modelling Tunnel Thrusters for Autonomous Underwater Vehicles [Text] / A. Palmer, G. E. Hearn, P. Stevenson // IFAC Proceedings

- Volumes. – 2008. – V. 41, I. 1. – P. 91–96. Doi:[10.3182/20080408-3-IE-4914.00017](https://doi.org/10.3182/20080408-3-IE-4914.00017).
152. Papalambrou, G. Robust Control of Manifold Air Injection in a Marine Diesel Engine [Text] / G. Papalambrou, E. Karlis, N. Kyrtatos // IFAC–Papers On Line. – 2015. – V. 48, I. 14. – P. 438–443. Doi:[10.1016/j.ifacol.2015.09.496](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.496).
 153. Papalambrou, G. Controlled Injection of Compressed Air in Marine Diesel Engine Intake for Improved Load Acceptance [Text] / G. Papalambrou, N. Kyrtatos // IFAC Proceedings Volumes. – 2009. – V. 42, I. 26. – P. 140–147. Doi:[10.3182/20091130-3-FR-4008.00019](https://doi.org/10.3182/20091130-3-FR-4008.00019).
 154. Pereira, F. C. Text analysis in incident duration prediction [Text] / F. C. Pereira, F. Rodrigues, M. Ben-Akiva // Transportation Research Part: MIT Alliance for Research and Technology (SMART). – Singapore: Elsevier Ltd, 2013. – 37. – P. 177–192. Doi:[10.1016/j.trc.2013.10.002](https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.10.002).
 155. Power, D. J. Model-driven decision support systems: Concepts and research directions [Text] / D. J. Power, R. Sharda // *Decision Support Systems*. – Elsevier B.V., 2007. – 43. – P. 1044–1061. Doi:[10.1016/j.dss.2005.05.030](https://doi.org/10.1016/j.dss.2005.05.030).
 156. Product catalog modularity redundancy scalability. Power supply modules and systems for industry, power generation & distribution, marine and rail & metro [Text]. Режим доступу: \www/ URL: http://utu.lv/sites/utu.lv/files/attachments/eltek_product_catalog_2012.pdf. – 13.10.2016 р. – Загол. з екрану.
 157. Ramli, M. Economic analysis of PV/diesel hybrid system with flywheel energy storage [Text] / M. A. M. Ramli, A. Hiendro, S. Twaha // Renewable Energy. – 2015. – V. 78. – P. 398–405. Doi:[10.1016/j.renene.2015.01.026](https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.026).
 158. Raubar, E. Anti-Sway System for Ship-to-Shore Cranes [Text] / E. Raubar, D. Vrančić // Journal of Mechanical Engineering. – 2012. – 58. – P. 338–344. Doi:[10.5545/sv-jme.2010.127](https://doi.org/10.5545/sv-jme.2010.127).

159. Rezaie, B. Renewable energy options for buildings: case studies [Text] / B. Rezaie, E. Esmailzadeh, I. Dincer // Energy and Buildings. – 2011. – V. 43. – P. 56–65. Doi:[10.1016/j.enbuild.2010.08.013](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.08.013).
160. Resolution MEPC.212 (63). 2012 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships [Text].
Режим доступу: \www/ URL:
[http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee-\(MEPC\)/Documents/MEPC.212\(63\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee-(MEPC)/Documents/MEPC.212(63).pdf). – 13.10.2015 р. – Загол. з екрану.
161. Rezzouk, H. Feasibility study and sensitivity analysis of a stand-alone photovoltaic-diesel-battery hybrid energy system in the north of Algeria [Text] / H. Rezzouk, A. Mellit // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – V. 43. – 1134–1150. Doi:[10.1016/j.rser.2014.11.103](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.103).
162. Rindaroey, M. Fuel Optimal Thrust Allocation in Dynamic Positioning [Text] / M. Rindaroey, T. A. Johansen // IFAC Proceedings Volumes. – 2013. – V. 46, I. 33. – P. 43–48. Doi:[10.3182/20130918-4-JP-3022.00032](https://doi.org/10.3182/20130918-4-JP-3022.00032).
163. Rozali, N. E. M. Process Integration for Hybrid Power System supply planning and demand management [Text] / N. E. M. Rozali, S. R. W. Alwi, Z. A. Manan, J. J. Klemeš // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – V. 66. – P. 834–842. Doi:[10.1016/j.rser.2016.08.045](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.045).
164. Saha, N. Speed control with torque ripple reduction of switched reluctance motor by hybrid many optimizing liaison gravitational search technique [Text] / N. Saha, S. Panda // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2016. – Doi:[10.1016/j.jestch.2016.11.018](https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.11.018).
165. Sørдален, O. J. Optimal thrust allocation for marine vessels [Text] / O.J. Sørдален // Control Engineering Practice. – 1997. – V. 5, I. 9. – P. 1223–1231. Doi:[10.1016/S0967-0661\(97\)84361-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(97)84361-4).
166. Scherer, T. The Evolution of Machinery Control Systems Support At the Naval Ship Systems Engineering Station [Text] / T. Scherer, J. Cohen; Naval

- Ship Systems Engineering Station // Naval engineers journal. – American Society of Naval Engineers, 2011. – 2. – P. 85–109. Doi:[10.1111/j.1559-3584.2011.00321.x](https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.2011.00321.x).
167. Seenumani, G. A reference governor-based hierarchical control for failure mode power management of hybrid power systems for all-electric ships [Text] / G. Seenumani, H. Peng, J. Sun // Journal of Power Sources. – 2011. – V. 196, I. 3. – P. 1599–1607. Doi:[10.1016/j.jpowsour.2010.07.041](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.07.041).
 168. Sforza, P. M. Chapter 10 – Propellers [Text] / P. M. Sforza // Theory of Aerospace Propulsion (Second Edition). – 2017. – P. 487–524. Doi:[10.1016/B978-0-12-809326-9.00010-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809326-9.00010-5).
 169. Sharafi, M. Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using PSO–simulation based approach [Text] / M. Sharafi, T. Y. ELMekkawy // Renewable Energy. – 2014. – V. 68. – P. 67–79. Doi:[10.1016/j.renene.2014.01.011](https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.011).
 170. Shi, J. P. Past, present, and future of decision support technology [Text] / J. P. Shi, M. Warkentin, J. F. Courtney, D. J. Power, R. Sharda, C. Carlsson // *Decision Support Systems*. – New York: Computer-Supported Decision Making, 2002. – 33(2). – P. 111–126. Doi:[10.1016/S01679236\(01\)00139-7](https://doi.org/10.1016/S01679236(01)00139-7).
 171. Shih, N.-C. Development of a 20 kW generic hybrid fuel cell power system for small ships and underwater vehicles [Text] / N.-C. Shih, B.-J. Weng, J.-Y. Lee, Y.-C. Hsiao // International Journal of Hydrogen Energy. – 2014. – V. 39, I. 25. – P. 13894–13901. Doi:[10.1016/j.ijhydene.2014.01.113](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.01.113).
 172. Shives, M. Adapted two-equation turbulence closures for actuator disk RANS simulations of wind & tidal turbine wakes [Text] / M. Shives, C. Crawford // Renewable Energy. – 2016. – V. 92. – P. 273–292. Doi:[10.1016/j.renene.2016.02.026](https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.026).
 173. Skaf, J. P. Controller coefficient truncation using Lyapunov performance certificate [Text] / J. Skaf, S. P. Boyd // International Journal of Robust and Nonlinear Control. – 2010. Doi:[10.1002/rnc.1577/full](https://doi.org/10.1002/rnc.1577/full).

174. Song, Z. Optimization for a hybrid *Energy Storage System* in electric vehicles using dynamic programming approach [Text] / H. Hofmann, J. Li, X. Han, M. Ouyang // *Apply Energy*. – 2015. – P. 151–62. Doi:[10.1016/j.apenergy.2014.11.020](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.020).
175. Sørensen, A. J. High Performance Thrust Allocation Scheme in Positioning of Ships Based on Power and Torque Control [Text] / A. J. Sørensen, A. K. Ådnanes // *Marine Technology Society, Dynamic Positioning Conference: Session 9 Control Systems*. – Houston, October 21-22, 1997. – P. 1–17. Режим доступу: \www/ URL: https://www.researchgate.net/publication/255649795_High_Performance_Thrust_Allocation_Scheme_in_Positioning_of_Ships_Based_on_Power_and_Torque_Control. – 13.05.2016 г. – Загол. з екрану.
176. Sturge, D. A hybrid actuator disc – Full rotor CFD methodology for modelling the effects of wind turbine wake interactions on performance [Text] / D. Sturge, D. Sobotta, R. Howell, A. While, J. Lou // *Renewable Energy*. – 2015. – V. 80. – P. 525–537. Doi:[10.1016/j.renene.2015.02.053](https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.053).
177. Sulligoi, G. Active front-end for shaft power generation and voltage control in FREMM frigates integrated power system: Modeling and validation [Text] / G. Sulligoi, S. Castellan, M. Aizza, D. Bosich, L. Piva and G. Lipardi // *International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*. – 2012. – P. 452–457. Doi:[10.1109/SPEEDAM.2012.6264570](https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2012.6264570).
178. Symington, W. P. Emerging technologies in marine electric propulsion [Text] / W. P Symington, A. Belle, H. D. Nguyen, J. R. Binns // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. – 2014. – V. 230, I. 1. – P. 187 – 198. Doi: [10.1177/1475090214558470](https://doi.org/10.1177/1475090214558470).
179. Taskar, B. The effect of waves on engine-propeller dynamics and propulsion performance of ships [Text] / B. Taskar, K. K. Yum, S. Steen, E. Pedersen //

- Ocean Engineering. – 2016. – V. 122. – P. 262–277. Doi:[10.1016/j.oceaneng.2016.06.034](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.06.034).
180. The essential guide to everything solar 35th Annual Catalog [Text]. Режим доступу: \www/ URL: <http://aesolar.com/wp-content/uploads/2016/04/2016-AEE-Solar-Catalog.pdf>. – 13.10.2016 р. – Загол. з екрану.
 181. The complete propulsion unit [Text]. Режим доступу: \www/ URL: http://www.schottel.de/fileadmin/data/pdf/eng/NAV_EN_0814_web.pdf. – 13.10.2016 р. – Загол. з екрану.
 182. The SCHOTTEL Rudder propeller. From brilliant invention to global classic [Text]. Режим доступу: \www/ URL: <http://www.schottel.de/marine-propulsion/srp-rudderpropeller>. – 13.10.2016 р. – Загол. з екрану.
 183. Thiébot, J. Modelling the effect of large arrays of tidal turbines with depth-averaged Actuator Disks [Text] / J. Thiébot, S. Guillou, V. T. Nguyen // Ocean Engineering. – 2016. – V. 126. – P. 265–275. Doi:[10.1016/j.oceaneng.2016.09.021](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.09.021).
 184. Tsekouras, G. J. Simplified method for the assessment of ship [Text] / G. J. Tsekouras, J. M. Prousalidis, F. D. Kanellos // IET electrical systems in transportation. – The Institution of Engineering and Technology, 2015. – P. 1–9. Doi:[10.1049/iet-est.2013.0011](https://doi.org/10.1049/iet-est.2013.0011).
 185. Veksler, A. Transient power control in dynamic positioning – governor feedforward and dynamic thrust allocation [Text] / A. Veksler, T. A. Johansen, R. Skjetne // IFAC Proceedings Volumes. – 2012. – V. 45, I. 27. – P. 158–163. Doi:[10.3182/20120919-3-IT-2046.00027](https://doi.org/10.3182/20120919-3-IT-2046.00027).
 186. Vernengo, G. Simulation based design of a fleet of ships under power and capacity variations [Text] / G. Vernengo, T. Gaggero, E. Rizzuto // Applied Ocean Research. – 2016. – V. 61. – P. 1–15. Doi:[10.1016/j.apor.2016.09.003](https://doi.org/10.1016/j.apor.2016.09.003).

187. Vetter, M. Chapter 11 – Rechargeable Batteries with Special Reference to Lithium–Ion Batteries [Text] / M. Vetter, S. Lux // Storing Energy. – 2016. – P. 205–225. Doi:[10.1016/B978-0-12-803440-8.00011-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803440-8.00011-7).
188. Vesali, A. Study on Hydrodynamic Pressure in Grinding Contact Zone Considering Grinding Parameters and Grinding Wheel Specifications [Text] / A. Vesali, T. Tawakoli // Procedia CIRP. – 2014. – V. 14. – P. 13–18. Doi:[10.1016/j.procir.2014.03.053](https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.053).
189. Vrijdag, A. Estimation of uncertainty in ship performance predictions [Text] / A. Vrijdag // Journal of Marine Engineering & Technology. – 2014. – P. 45–55. Doi:[10.1080/20464177.2014.11658121](https://doi.org/10.1080/20464177.2014.11658121).
190. Vrijdag, A. Control of propeller cavitation in operational conditions [Text] / A. Vrijdag, D. Stapersma, T. van Terwisga // Journal of Marine Engineering & Technology. – 2010. – V. 9. – P. 15–26. Doi:[10.1080/20464177.2010.11020228](https://doi.org/10.1080/20464177.2010.11020228).
191. Wang, L. Analysis of a novel autonomous marine hybrid power generation/*Energy Storage System* with a high-voltage direct current link [Text] / L. Wang, D. J. Lee, W. J. Lee, Z. Chen // Journal of Power Sources. – 2008. – V. 185. – P. 1284–1292. Doi:[10.1016/j.jpowsour.2008.08.037](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.08.037).
192. Wang, Q. A critical review of thermal management models and solutions of *Lithium-ion batteries* for the development of pure electric vehicles [Text] / Q. Wang, B. Jiang, B. Li, Y. Yan // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – V. 64. – P. 106–128. Doi:[10.1016/j.rser.2016.05.033](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.033).
193. Wei, C. Dynamic Simulation and Control Strategy for Three-Shaft Marine Electric Propulsion Gas Turbine [Text] / C. Wei, S. Zang // ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air, Glasgow, UK, ASME, 2010. – V. 3 : Controls, Diagnostics and Instrumentation ; Cycle Innovations ; Marine. – P. 1099–1104. Doi:[10.1115/gt2010-23796](https://doi.org/10.1115/gt2010-23796).
194. Willett, F. T. Economic Benefits of Hybrid Drive Propulsion for DDG–51 Class Ships [Text] / F. T. Willett, G. Reed, G. Castles // ASME. Turbo Expo:

- Power for Land, Sea, and Air. – 2009. – V. 7. – P. 377–385. Doi:[10.1109/ESTS.2009.4906560](https://doi.org/10.1109/ESTS.2009.4906560).
195. Wilflinger, J. Simulation and control design of hybrid propulsions in boats [Text] / J. Wilflinger, P. Ortner, L. del Re, M. Aschaber // IFAC Proceedings Volumes. – 2010. – V. 43, I. 20. – P. 40–45. Doi:[10.3182/20100915-3-DE-3008.00001](https://doi.org/10.3182/20100915-3-DE-3008.00001).
 196. Whisper power book marine catalogue 2016 [Text]. Режим доступу: \www/ URL:<http://www.whisperpower.com/ru/2/13/phpimg/WhisperPowerBookMarine2016-UK.pdf>. – 13.10.2016 р. – Загол. з екрану.
 197. Wu, D. An energy optimal thrust allocation method for the marine dynamic positioning system based on adaptive hybrid artificial bee colony algorithm [Text] / D. Wu, F. Ren, W. Zhang // Ocean Engineering. – 2016. – V. 118. – P. 216–226. Doi:[10.1016/j.oceaneng.2016.04.004](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.04.004).
 198. Wua, T.-S. Anti-sway tracking control of tower cranes with delayed uncertainty using a robust adaptive fuzzy control [Text] / T.-S. Wua, M. Karkouba, W.-S. Yub, C.-T. Chena, M.-G. Herc, K.-W. Wua // Fuzzy Sets and Systems. – V. 290. – P. 118–137. Doi:[10.1016/j.fss.2015.01.010](https://doi.org/10.1016/j.fss.2015.01.010).
 199. Yan, R. The combined effects of high penetration of wind and PV on power system frequency response [Text] / R. Yan, T. K. Saha, N. Modi, N.–A. Masood, M. Mosadeghy // Applied Energy. – 2015. – V. 145. – P. 320–330. Doi:[10.1016/j.apenergy.2015.02.044](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.044).
 200. Yang, X. Guaranteed cost neural tracking control for a class of uncertain nonlinear systems using adaptive dynamic programming [Text] / X. Yang, D. Liu, Q. Wei, D. Wang // Neurocomputing. – 2016. – V. 198. – P. 80–90. Doi:[10.1016/j.neucom.2015.08.119](https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.08.119).
 201. Yang, N. Unbalanced discharging and aging due to temperature differences among the cells in a lithium-ion battery pack with parallel combination [Text] / N. Yang, X. Zhang, B. Shang, G. Li // Journal of Power Sources. – 2016. – V. 306. – P. 733–741. Doi:[10.1016/j.jpowsour.2015.12.079](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.12.079).

202. Yari, E. Hydrodynamic analysis of the surface-piercing propeller in unsteady open water condition using boundary element method [Text] / E. Yari, H. Ghassemi // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. – 2016. – V. 8, I. 1. – P. 22–37. Doi:[10.1016/j.ijnaoe.2015.09.002](https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2015.09.002).
203. Yipeng, G. Computer based concurrent design and realization of simulated training system for marine electric propulsion system [Text] / G. Yipeng, Z. Fanming, C. Yutao // Industrial and Information Systems (IIS), 2010 2nd International Conference on, Dalian, IEEE, 2010. – V. 2. – P. 511–513. Doi:[10.1109/INDUSIS.2010.5565766](https://doi.org/10.1109/INDUSIS.2010.5565766).
204. Yoshida, S. Estimation of global tilted irradiance and output energy using meteorological data and performance of photovoltaic modules [Text] / S. Yoshida, S. Ueno, N. Kataoka, H. Takakura, T. Minemoto // Solar Energy. – 2013. – V. 93. – P. 90–99. Doi:[10.1016/j.solener.2013.04.001](https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.04.001).
205. Yutao, C. Integrated Design Platform for Marine Electric Propulsion System [Text] / C. Yutao, Z. Fanming, W. Jiaming; College of Naval Architecture and Power // 2012 International Conference on Future Electrical Power and Energy System. – Wuhan: Naval University of Engineering, 2012. – 17, Part A. – P. 540–546. Doi:[10.1016/j.egypro.2012.02.133](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.133).
206. Xiao, H. Quantifying and reducing model-form uncertainties in Reynolds-averaged Navier–Stokes simulations: A data-driven, physics-informed Bayesian approach [Text] / H. Xiao, J.-L. Wu, J.-X. Wang, R. Sun, C.J. Roy // Journal of Computational Physics. – 2016. – V. 324. – P. 115–136. Doi:[10.1016/j.jcp.2016.07.038](https://doi.org/10.1016/j.jcp.2016.07.038).
207. Xie, L. GA based decomposition of large scale distributed model predictive control systems [Text] / L. Xie, X. Cai, J. Chen, H. Su // Control Engineering Practice. – 2016. – V. 57. – P. 111–125. Doi:[10.1016/j.conengprac.2016.08.016](https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.08.016).

208. Xu, S. A thrust sensitivity analysis based on a synthesized positioning capability criterion in DPCap/DynCap analysis for marine vessels [Text] / S. Xu, X. Wang, L. Wang, S. Meng, B. Li // Ocean Engineering. – 2015. – V. 108. – P. 164–172. Doi:[10.1016/j.oceaneng.2015.08.001](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.08.001).
209. Zahedi, B. Optimized efficiency of all-electric ships by dc hybrid power systems [Text] / B. Zahedi, L. E. Norum, K. B. Ludvigsen // Journal of Power Sources. – 2014. – V. 255. – P.341–354. Doi:[10.1016/j.jpowsour.2014.01.031](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.031).
210. Zakeri, B. Electrical *Energy Storage Systems*: a comparative life cycle cost analysis [Text] / B. Zakeri, S. Syri / Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – V. 42. – P. 569–596. Doi:[10.1016/j.rser.2014.10.011](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.011).
211. Zhang, J. Functional Mechanism: Regression Analysis under Differential Privacy [Text] / J. Zhang, Z. Zhang, X. Xiao, Y. Yang, M. Winslett // The 38th International Conference on Very Large Data Bases: Proceedings. – Istanbul: VLDB Endowment, 2012 (August 27th – 31st). – 11, Vol. 5. – P. 1364–1375. Режим доступу: \www/ URL: http://vldb.org/pvldb/vol5/p1364_junzhang_vldb2012.pdf. – 13.05.2016 р. – Загол. з екрану.
212. Zhang, S. Model predictive control for power management in a plug-in hybrid electric vehicle with a hybrid *Energy Storage System* [Text] / S. Zhang, R. Xiong, F. Sun // Applied Energy. – 2017. – V. 185 (2). – P. 1654–1662. Doi:[10.1016/j.apenergy.2015.12.035](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.035).
213. Zhang, Y. Energy conversion mechanism and regenerative potential of vehicle suspensions [Text] / Y. Zhang, K. Guo, D. Wang, C. Chen, X. Li // Energy. – 2017. – V. 119. – P. 961–970. Doi:[10.1016/j.energy.2016.11.045](https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.045).
214. Zhao, B. Optimal sizing, operating strategy and operational experience of a stand-alone microgrid on Dongfushan Island [Text] / B. Zhao, X. Zhang, P. Li, K. Wang, M. Xue, C. Wang // Applied Energy. – 2014. – V. 113. – P. 1656–1666. Doi:[10.1016/j.apenergy.2013.09.015](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.015).

215. Zhao, D. Characterisation, control, and energy management of electrified turbocharged diesel engines [Text] / D. Zhao, E. Winward, Z. Yang, R. Stobart, T. Steffen // *Energy Conversion and Management*. – 2017. – V. 135. – P. 416–433. Doi:[10.1016/j.enconman.2016.12.033](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.033).
216. Zhao, F. Power management of vessel propulsion system for thrust efficiency and emissions mitigation [Text] / F. Zhao, W. Yang, W. W. Tan, W. Yu, J. Yang, S. K. Chou // *Applied Energy*. – 2016. – V. 161. – P. 124–132. Doi:[10.1016/j.apenergy.2015.10.022](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.022).
217. Zhao, H. Review of *Energy Storage System* for wind power integration support [Text] / H. Zhao, Q. Wu, S. Hu, H. Xu, C. N. Rasmussen // *Applied Energy*. – 2014. – V. 137. – P. 545–553. Doi:[10.1016/j.apenergy.2014.04.103](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.103).
218. Zhao, J. Thermal performance of mini-channel liquid cooled cylinder based battery thermal management for cylindrical lithium-ion power battery [Text] / J. Zhao, Z. Rao, Y. Li // *Energy Conversion and Management*. – 2015. – V. 103. – P. 157–165. Doi:[10.1016/j.enconman.2015.06.056](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.056).
219. Zhao, P. Capacity allocation of a hybrid *Energy Storage System* for power system peak shaving at high wind power penetration level [Text] / P. Zhao, J. Wang, Y. Dai // *Renewable Energy*. – 2015. – V. 75. – P. 541–549. Doi:[10.1016/j.renene.2014.10.040](https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.040).
220. Zhou, Y. A novel health indicator for on-line *Lithium-ion batteries* remaining useful life prediction [Text] / Y. Zhou, M. Huang, Y. Chen, Y. Tao // *Journal of Power Sources*. – 2016. – V. 321. – P. 1–10. Doi:[10.1016/j.jpowsour.2016.04.119](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.04.119).
221. Zimmermann, T. Review of system topologies for hybrid electrical *Energy Storage Systems* [Text] / T. Zimmermann, P. Keil, M. Hofmann, M. F. Horsche, S. Pichlmaier, A. Jossen // *Journal of Energy Storage*. – 2016. – V. 8. – P. 78–90. Doi:[10.1016/j.est.2016.09.006](https://doi.org/10.1016/j.est.2016.09.006).

222. Zivi, E. Design of robust shipboard power automation systems [Text] / E. Zivi // Annual Reviews in Control. – 2005. – V. 29, I. 2. – P. 261–272. Doi:[10.1016/j.arcontrol.2005.08.004](https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2005.08.004).
223. 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.
224. 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).
225. 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).
226. 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.
227. 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.

228. 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.
229. Будашко, В. В. Концепция моделирования и построения электроэнергетической 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.
230. 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.
231. 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.
232. 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.

233. 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.
234. Будашко, В. В. Моделирование элементов судовой энергетической установки для исследования режимов работы пропульсивного комплекса [Текст] / В. В. Будашко, І. М. Тарасов // Сучасні проблеми морського транспорту та безпека мореплавства // Матеріали ІІІ Всеукраїнської студентської наукової конференції, м. Херсон, 21 листопада 2013 року). – Херсон: Видавництво ХДМА, 2013, С. 277 – 279.
235. Будашко, В. В. Моделювання електродинамічних процесів в комбінованому пропульсивному комплексі при утриманні позиції [Текст] / В. В. Будашко, Є. 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.
236. Будашко, В. В. Моделювання енергетичних процесів у пропульсивному комплексі з асинхронним двигуном на лінії валу [Текст] / В. В. Будашко, Є. О. Юшков // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці. Матеріали першої науково-технічної конференції, присвяченої 90-річчю НУК ім. адмірала Макарова. Миколаїв: НУК, 2010, С. 48–51.
237. 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 // [До змісту](#)

Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT–2010). Збірка матеріалів другої Міжнародної науково-практичної конференції у двох томах, т.2. Херсон: ХДМА, 2010, С.77–80.

238. 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.
239. 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.
240. Будашко, В. В. Оптимизация управления энергетической установкой типа *CRP* AZIPOD® [Text] / В. В. Будашко // // XV Международная конференция по автоматическому управлению (Автоматика-2008): Доклады. – Одесса: ОНМА, 2008, С. 84–86.
241. Будашко, В.В. Оценка эффективности компенсации деградационных 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.
242. 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.
243. 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 доступа:

\www/ URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/asts_2008_14_4. – 13.05.2016 г. – Загл. с екрана.

244. 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 978-17-645-140-2. – 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.
245. 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.
246. 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.
247. 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: [До змісту](#)

<http://isdmc.org.ua/modules/smartsection/item.php?itemid=16>. – 16.05.2017 р. – Загол. з екрану.

248. 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 доступа: \WWW/ URL:<http://elibrary.ru/item.asp?id=24015711>. – 16.05.2016 р. – Загол. з екрану.
249. 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.
250. 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 доступа: \WWW/ URL: <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=224863>. – 26.06.2016 р. – Загол. З екрану.
251. 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.
252. Будашко, В. В. Суднова система моніторингу для попередження ефекту Коанда [Текст] / В. В. Будашко, В. В. Нікольський, С. Г. Хнюнин // 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.

253. 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 доступу: \WWW/ URL: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/13378>. – 16.05.2016 р. – Загол. з екрану.
254. 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.
255. Вагущенко, Л. Л. Системы автоматического управления движением судна [Текст] // Л. Л. Вагущенко, Н. Н. Цымбал. – 3-е изд., перераб. и доп. – Одесса: Фенікс, 2007. – 328 с. Режим доступу: \WWW/ URL: http://www.nav-eks.org.ua/CACYDC-na-site/Ychebnik-CACYDC_11.pdf. – 16.05.2016 р. – Загол. з екрану.
256. 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). – [До змісту](#)

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.

257. 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.
258. 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.
259. Дьяконов, В. П. *MatLab*. Обработка сигналов и изображений [Текст] / Дьяконов В.П., Абраменкова И.В. // Специальный справочник. СПб.: Питер, 2002. 602 с.
260. Одесский крьюинг – форум вне политики: Форум Режим доступу: \WWW/URL: <http://wap.odessa-crewing.borda.ru/?1-16-0-00000422-000-80-0>. – 3.06.2016 р. – Загол. з екрану.
261. Представление двигателей Azipod® серии VI [Текст]. Режим доступу: \WWW/URL: https://library.e.abb.com/public/908eb000f6546300c12577e5004191aa/Azipod_VI_project_guide_RU.pdf– 3.06.2016 р. – Загол. з екрану.
262. 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 2079-106. Режим доступу: \WWW/ URL: http://esmo.kdu.edu.ua/publ/ESMO_2017.pdf. – 3.5.2017 р. – Загол. з екрану.

263. Тимченко, В. Л. Робастно-оптимальная стабилизация морских подвижных объектов в режиме динамического позиционирования [Текст] / В. Л. Тимченко, О. А. Ухин // Электротехнические и компьютерные системы. – К.: Техника. – 2014. – № 13 (89). – С. 19–26.
264. Хнюнін, С. Г. Суднова система моніторингу для попередження ефекту Коанда [Текст] / С. Г. Хнюнін, В. В. Нікольский, 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.
265. Холодов, Г. Г. Требования национальных морских классификационных обществ к работам на морских шельфах и системам ориентации судов, оснащенных системами динамического позиционирования, и их классификация [Текст] / Г. Г. Холодов. – Вестник МГТУ, том 13, №4/1. – 2010. – С. 712–718. Режим доступу: \WWW/ URL: <http://vestnik.mstu.edu.ru/show.shtml?art=1006>. – 13.10.2016 г. – Загол. з екрану.
266. Черных, И. В. SimPowerSystems: Моделирование электротехнических устройств и систем в Simulink [Текст] / И. В. Черных // Режим доступу: \WWW/ URL: <http://matlab.exponenta.ru/simpower/book1/2.php> – 13.10.2016 г. – Загол. з екрану.
267. Шрейнер, Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты [Текст] / Шрейнер Р. Т. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
268. Юдин, Ю. И. Расчет радиальной диаграммы предельных значений скорости ветра для бурового судна «В. Шашин» [Текст] / Ю. И. Юдин, А. Б. Гарбаровский, С. Н. Холичев // Вестник [До змісту](#)

государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. – 2014. – Вып. 1. – С. 7–12. Режим доступа: \WWW/ URL: <http://journal.gumrf.ru/files/2014/1/7-11.pdf>. – 13.10.2016 г. – Загол. з екрану.

Додаток А. Акти впровадження результатів досліджень та документи, що підтверджують практичну цінність отриманих результатів

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Проректор Національного університету
«Одеська морська академія» з наукової роботи
д.т.н., професор

В. А. Голіков

04 2017 р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
Будашка Віталія Віталійовича на тему «Підвищення ефективності
функціонування суднових енергетичних установок комбінованих
пропульсивних комплексів» в наукових дослідженнях, які виконувались і
виконуються в університеті

Ми, що нижче підписались, начальник науково-дослідної частини (НДЧ) університету Савчук В. Д., провідний фахівець НДЧ Сопліна В. М. склали цей акт у тому, що:

1. Будашко В. В., як докторант кафедри технічної експлуатації флоту, був науковим керівником науково-дослідницької роботи (НДР) «Концепції, технології та напрямки удосконалення суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів», НУ «ОМА», Одеса – 2014-2017рр. (номер держреєстрації 0114U000340, інвентарний номер науково технічної продукції (НТП) 0717U001535, державний обліковий номер 0217U000533.

Результати дисертаційної роботи Будашка В. В. увійшли складовою частиною у звіт з НДР:

2. «Розвиток сучасної теорії і практики технічної експлуатації морського і річкового флоту: концепції, методи, технології», НУ «ОМА», Одеса – 2014-2017 рр. (номер держреєстрації 0114U000346, науковий керівник – д.т.н., професор Голіков В. А., зав. кафедрою технічної експлуатації флоту), розділ «Концептуалізація розвитку науково-прикладних досліджень у галузі суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів»;

3. «Автоматизація технологічних та адміністративних процесів на транспорті», НУ «ОМА», Одеса – 2015-2018рр. (номер держреєстрації 0115U003577, науковий керівник – д.т.н., професор Горб С. І., зав. кафедрою обчислювальної техніки та програмування), етап 3 «Розробка алгоритмів та програмування моделей технологічно-організаційних процесів системи моніторингу ефекту відхилення потоку рідини».

Начальник науково-дослідної частини НУ «ОМА»,
к.т.н., с.н.с., професор

В. Д. Савчук

Провідний фахівець

В. М. Сопліна



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший проректор

Національного університету

«Одеська морська академія»,

д.ю.н., професор

О. М. Шемякін

» 05 2017 р.

про використання результатів дисертаційної роботи
Будашка Віталія Віталійовича на тему «Підвищення ефективності
функціонування суднових енергетичних установок комбінованих
пропульсивних комплексів» у навчальному процесі університету

Ми, що нижче підписались, начальник навчального відділу університету Пархоменко М. М., декан факультету електромеханіки і радіоелектроніки, к.т.н., доцент Луковцев В. С., декан судномеханічного факультету, к.т.н., професор Колегаєв М. О., декан факультету автоматики, к.т.н., доцент Кар'янський С. А. склали цей акт у тому, що результати дисертаційної роботи Будашка Віталія Віталійовича впроваджені у навчальний процес на відповідних факультетах:

- на факультеті електромеханіки та радіоелектроніки здобувач Будашко Віталій Віталійович є провідним викладачем дисципліни «Комбіновані електричні пропульсивні комплекси», яка викладається для магістрів спеціальності «Річковий та морський транспорт» спеціалізації «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики»; результати дисертаційних досліджень було використано під час розробки навчальної програми вищевказаної дисципліни відповідно до освітньо-професійної програми підготовки;

- на судномеханічному факультеті і факультеті автоматики у методичних рекомендаціях з дипломного проектування для бакалаврів і магістрів спеціальності «Річковий та морський транспорт» спеціалізації «Експлуатація суднових енергетичних установок» і спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» спеціалізації «Автоматизоване управління судновими енергетичними установками» відповідно до освітньо-професійних програм підготовки.

Начальник навчального
відділу

Пархоменко М. М.

Декан факультету електромеханіки
та радіоелектроніки, к.т.н., доцент

Луковцев В. С.

Декан судномеханічного факультету,
к.т.н., професор

Колегаєв М. О.

Декан факультету автоматики,
к.т.н., доцент

Кар'янський С. А.



Приватний
вищий навчальний заклад
"Інститут післядипломної освіти"
"ОДЕСЬКИЙ МОРСЬКИЙ ТРЕНАЖЕРНИЙ ЦЕНТР"

Україна
65026 Одеса, вул. Пастера, 16
р/р 26005312517502 в АБ «Південний» в м. Одеса,
МФО 328209, тел/факс (048)723-52-20

3. 05. 2017 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ результатів дисертаційних досліджень

Цим актом засвідчується, що у приватному вищому навчальному закладі «Інститут післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр» були впроваджені у навчальний процес для слухачів курсів підвищення кваліфікації наступні результати дисертаційної роботи Будашка Віталія Віталійовича «Підвищення ефективності функціонування суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів» у рамках розробленої системи підтримки прийняття рішень (СППР):

методика проведення параметризації пропульсивних і енергетичних характеристик суднових енергетичних установок (СЕУ) комбінованих пропульсивних комплексів (КПК) в залежності від зміни експлуатаційних режимів, гідродинамічних характеристик і умов довкілля;

методика ітераційної оптимізації параметрів СЕУ КПК, яка дозволяє використовувати розроблену СППР як засіб інтелектуального проектування, результатом застосування якого є вдосконалені експлуатаційні характеристики СЕУ КПК;

методика поліпшення енергетичної ефективності СЕУ КПК в експлуатаційних режимах та інтегрування отриманих результатів у базу СППР для їх подальшої модифікації.

Директор ПВНЗ
«Інституту післядипломної освіти»
«Одеський морський тренажерний центр»
К.т.н., професор

Пашченко Ю. В.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Голова комісії, заст. голови
Правління ПрАТ «УДП» з
технічних питань

А. С. Гармаш

2016 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційних досліджень докторанта кафедри технічної експлуатації флоту Національного університету «Одеська морська академія» Будашка Віталія Віталійовича

Комісія у складі:

голова комісії

Гармаш А.С. – заступник голови Правління ПрАТ «УДП»;

члени комісії

Сенілов І.В. – начальник технічної служби ПрАТ «УДП»;

Стеценко А.В. – суперінтендант технічної служби ПрАТ «УДП»;

Тарасенко Т.В., к.т.н., начальник відділу системи менеджменту якості та стандартизації ПрАТ «УДП»

склала цей акт у тому, що результати дисертаційних досліджень Будашка В.В. в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи "Концепції, технології та напрямки вдосконалення суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів" (державний реєстраційний номер 0114U000340), захищені патентами України №№100819, 107006, 108074 використані на судах ПрАТ «Українське Дунайське пароплавство» при експлуатації та моніторингу стану комбінованих пропульсивних комплексів суден з підрулюючими пристроями, з системами керування перетворювачами частоти, імпульсно-фазовими регуляторами напруги та потужними асинхронними електродвигунами.

Практична значимість проведених дисертаційних досліджень зумовлюється запропонованою системою моніторингу виникнення ефекту Коанда для зниження аварійності та поліпшення системи динамічного позиціонування суден, що дозволяє підвищити ефективність процесів у пропульсивних комплексах при передачі потужності до рушія. Відмінність запропонованої системи від існуючих полягає у можливості її застосування без зміни існуючої конструкції пропульсивного комплексу.

Висновок.

1. Дослідження напрямків вдосконалення суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів є актуальними.

2. Результати дисертаційних досліджень Будашка В.В. мають наукову значимість та практичну цінність з точки зору зниження аварійності та поліпшення систем динамічного позиціонування суден.

3. Впровадження результатів дисертаційних досліджень Будашка В.В. дозволять отримати вагомий економічний ефект у випадках:

- налагодження суднових систем управління різного рівня складності з позицій підвищення їхньої ефективності;
- їх використання при проектуванні нових моделей пропульсивних комплексів;
- їх застосування при розробці експертних систем, які забезпечують аналіз процесів у судновій електроенергетиці.

Члени комісії:

 Сенілов І.В.

 Стеценко А.В.

 Тарасенко Т.В.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник начальника Військової академії з
наукової роботи — начальник відділення,
кандидат технічних наук, старший науковий
співробітник

полковник

О. І. Кравчук

« ____ » _____ 2017 р.

ДОВІДКА

Цим підтверджується, що результати дисертаційного дослідження «Підвищення ефективності функціонування суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів» здобувача Будашка В.В. заслухано та обговорено на засіданнях наукового Семінару «Оптимальне управління і експлуатація електроприводів спеціальних установок» Вченої Ради Національної академії наук України з проблеми «Наукові основи електроенергетики» (Військова академія, м. Одеса) у 2015-2017 роках.

У ході апробації на наукових Семінарах встановлено, що результати дисертаційного дослідження Будашка В.В. мають актуальність, наукову новизну та практичну значимість для проектування, побудови та експлуатації технічних систем різного призначення, зокрема суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів.

Учений секретар семінару,
зав. лабораторією, працівник ЗСУ



Т. С. Обнявко

ПОГОДЖЕНО
Проректор з наукової роботи
Національного університету
«Одеська морська академія»,
д.т.н., професор

Голіков В.А.
2017р.



ЗАТВЕРДЖУЮ
Керівник підприємства
Тов. «МОР – АВТО»

Самонов Д.Ф.
2017р.



АКТ

впровадження пропозицій та розробок
дисертаційних досліджень в діяльність підприємства

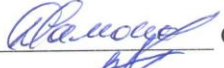
Цим актом підтверджується, що результати дисертаційних досліджень у рамках науково-дослідницької роботи «Концепції, технології та напрями удосконалення суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів» (державний реєстраційний №0114U/000340 від 11.02.2014 р., яка виконувалась під керівництвом докторанта Будашка Віталія Віталійовича за спеціальністю 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту з 1.01.2014 р. по 1.01.2017 р. (державний реєстраційний №0717U/001535 картки науково-технічної продукції від 10.02.2017 р.), що захищені патентами України №№100819, 107006, 108074, впроваджені у вигляді пропозицій в діяльність підприємства Товариства «МОР – АВТО» при моніторингу і визначенні технічного стану азимутальних гвинто-рульових колонок (АГРК) з системами керування перетворювачами частоти та потужними асинхронними електродвигунами.

Практична значимість проведених дисертаційних досліджень зумовлюється тим, що запропонована система моніторингу виникнення ефекту Коанда для зниження аварійності та поліпшення системи динамічного позиціонування суден, дозволила підвищити ефективність процесів в пропульсивних комплексах при передачі потужності до рушіїв. Відмінність запропонованої системи від існуючих полягає в можливості її побудови без втручання в діючу конструкцію АГРК.

Комісія у наведеному нижче складі, розглянувши викладене по суті, робить висновок, що подальші дослідження в цій області дозволять отримати економічний ефект від впровадження результатів дисертаційних досліджень Будашка В.В. у випадках:

- налагодженні суднових систем управління різного рівня складності з точки зору підвищення їхньої ефективності;
- при проектуванні нових типів і моделей пропульсивних комплексів;
- при розробці експертних систем, призначених для аналізу технічного стану систем керування перетворювачами частоти та потужними асинхронними електродвигунами.

Комісія у складі:

Керівник підприємства Тов. «МОР-АВТО»  Самонов Д.Ф.

Доцент кафедри СЕМ і ЕТ НУ «ОМА», к.т.н.  Калусев А. Г.

Доцент кафедри СЕМ і ЕТ НУ «ОМА», к.т.н.  Самонов С. Ф.

Інженер кафедри СЕМ і ЕТ НУ «ОМА»,
електромеханік 1 розряду

 Власов В.Б.

Approve
Master M/T "Allegro"

_____ P. Johansson

_____ 2017 yr.



IMPLEMENTATION ACT

This Act is to certify that on M/T "Allegro" Budashko Vitaliy Vitaliyevich, a doctoral candidate of the department of Fleet Maintenance at National University "Odessa Maritime Academy", has implemented the following findings of his dissertation research performed within the scope of state financed research work "Concepts, Technologies and Optimization Methods of Ship's Power Plants of Combined Propulsion Units" (state registration number 0114U000340), "Development of actual theory and practice of technical exploitation of sea and river fleet: concepts, methods, technologies" (state registration number 0114U000346), "Automation of technological and administrative processes in transport" (state registration number 0115U003577):

- as a result of applying correction methods of power frequency converters' transfer ratios, the range of potential operating torques of induction motors in hot condition has expanded;
- a sufficiently high control response conforming with the time of completion of the process of balancing modes in no excess of 1.2 ... 1.45 seconds has been achieved;
- the compensation of asymmetry parameters of electrical machines, thyristor voltage regulators and frequency converters has been carried out;
- the instability of electrical machines' operating modes intrinsic to motor drive systems with mains locking has been fairly compensated.

Комиссия в составе:

Chief Engineer

S.O. Andersson

ETO

V. Druzhynsky



Approved by
Master of m/v Vancouver Express

R. E. Panko

M/V VANCOUVER EXPRESS

« 11 » July 2016



IMPLEMENTATION ACT

This Act is to certify that on m/v Vancouver Express Budashko Vitaliy Vitaliyevich, a doctoral candidate of the department of Fleet Maintenance at National University "Odessa Maritime Academy", has implemented the following findings of his dissertation research performed within the scope of state financed research work "Concepts, Technologies and Optimization Methods of Ship's Power Plants of Combined Propulsion Complexes" (state registration number 0114U000340): as a result of applying methods of adjusting transfer ratios of frequency converters feeding propulsion motors, the compensation of reduced propulsion power and the change of the direction of thrust caused by the interaction between the flow from thrusters and the ship's hull and the effect of the propeller flow from one motor drive upon adjacent drives have been achieved.

Commission of:

Chief Engineer

2-nd Engineer

ETO



(Nolte Detlev)

(A. A. Kravchenko)

(M. M. Shuptar)







Додаток Б. Тактико-технічні характеристики досліджувальних суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів

Гібридний ДЕПК з ПЧ *BLUEDRIVE*

2 x 2335 кВА – СОДГ

2 x 3330 кВА – СОДГ

2 x 3000 кВт – Головний силовий агрегат (ГСА)

2 x 1000 кВт – Носовий тунельний підрулюючий пристрій (НПП)

2 x 830 кВт – Кормовий азимутальний підрулюючий пристрій (АПП)

690/450/230 В – ГРЩ НН

Система управління живленням

Контроль підрулюючих пристроїв/Джойстикова система управління

Вбудована система сигналізації і моніторингу

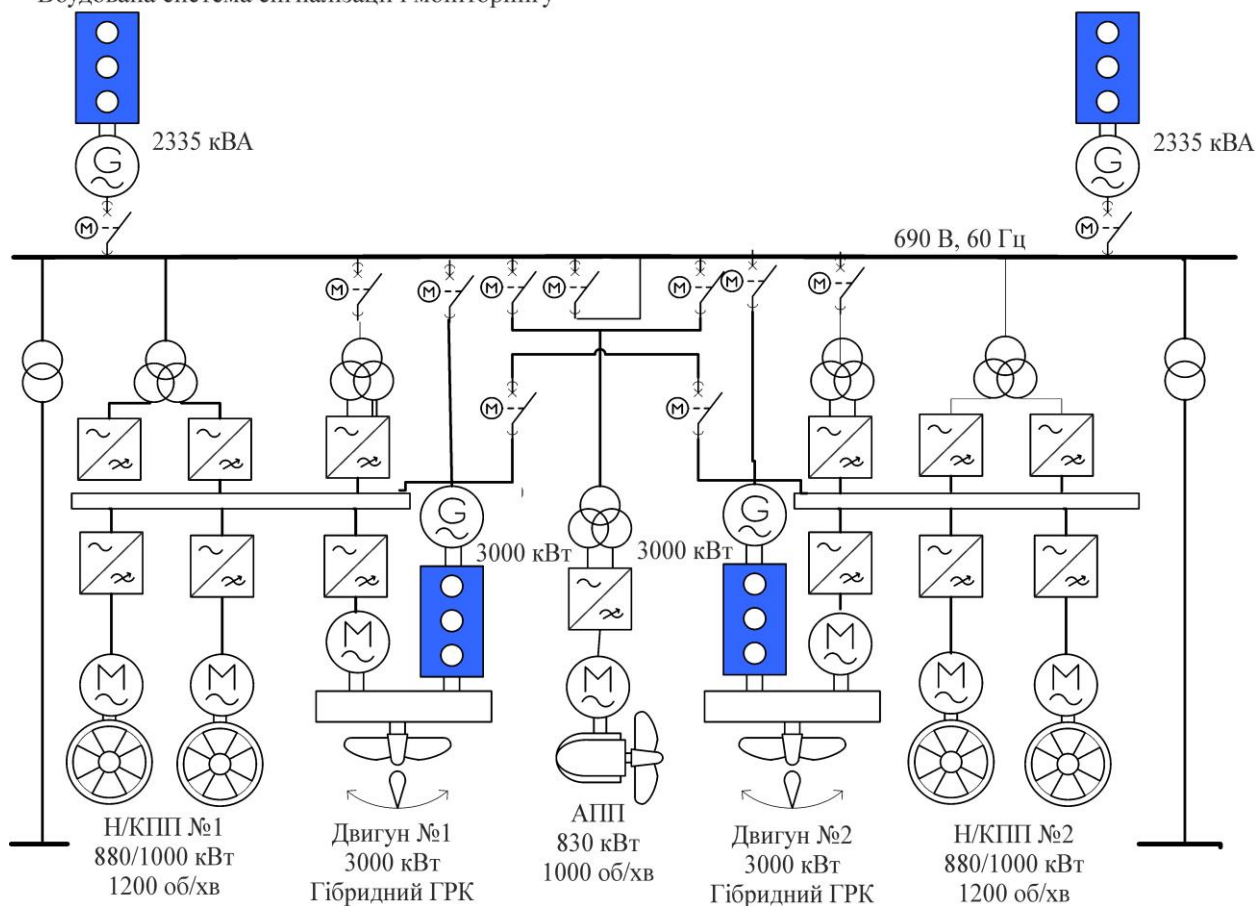


Рис. Б.1 Тактико-технічні характеристики СЕУ **КПК** судна для установки якорів (англ. *Anchor Handling Vessel* – *AHV*): ГСА – головний силовий агрегат; КПП – Кормовий підрулюючий пристрій; НПП – носовий підрулюючий пристрій; АПП – Азимутальний підрулюючий пристрій

Гібридний **ДЕПК** з ЧП *Bluedrive*

2 x 880 кВт – носовий підрулюючий пристрій (НПП)

2 x 590 кВт – кормовий підрулюючий пристрій (КПП)

3 x 1200 кВт – азимутальний підрулюючий пристрій (АПП)

2 x 3600 кВА – валогенератори

2 x 1617кВА – СОДГ

Система управління живленням

Адаптація живлення СОДГ

Захист електростанцій

Трансформатори, фільтри гармонік

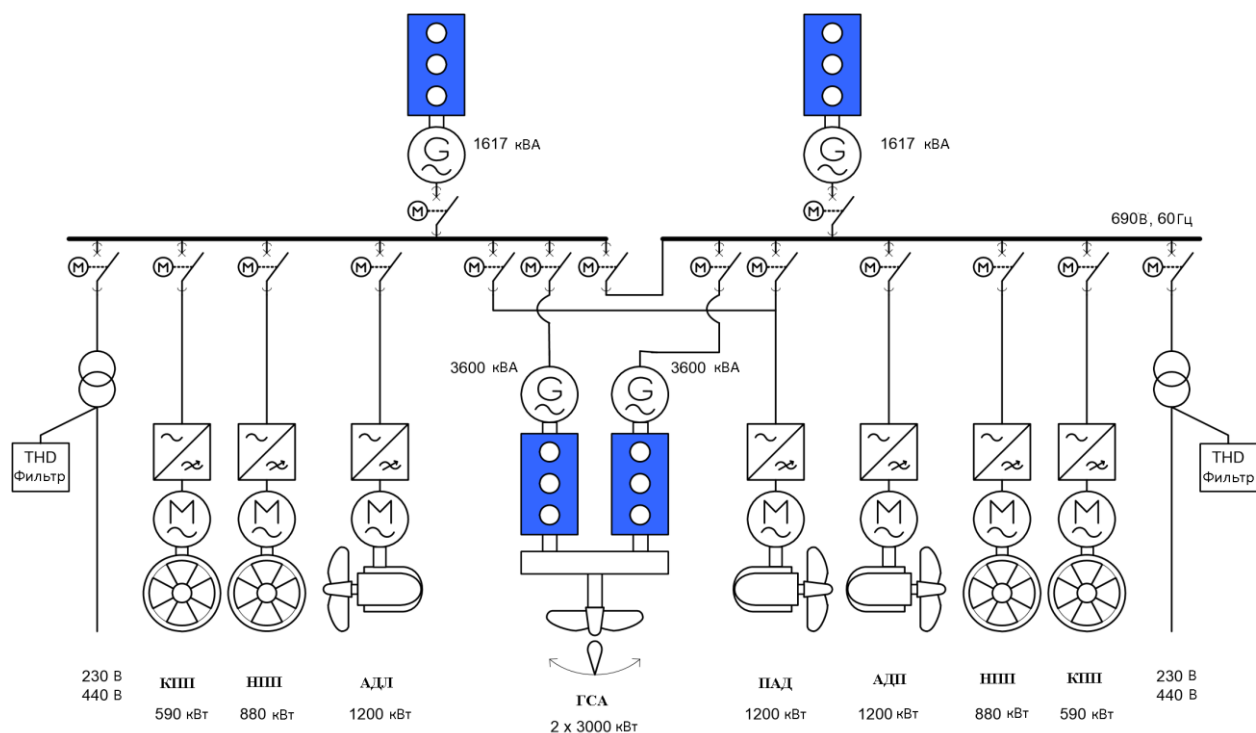


Рис. Б.2 Тактико-технічні характеристики СЕУ **КПК** багатоцільового офшорного судна (англ. *Multipurpose Offshore Vessel* – MOV): ГСА – головний силовий агрегат; КПП – Кормовий підрулюючий пристрій; НПП – носовий підрулюючий пристрій; АДЛ – азимутальний двигун лівого борту; ПАД – передній азимутальний двигун; АДП – азимутальний двигун правого борту

[До змісту](#)

Судно для заведення якорів та офшорного будівництва *Olympic Shipping AS Ulstein Berft 284*

Гібридний **ДЕПК** з ЧП *BlueDrive*

2 x 4000 кВт – головний силовий агрегат (ГСА)

2 x 1000 кВт – тунельний ПП

2 x 1200 кВт – тунельний ПП

1 x 1400 кВт – азимутальний ПП

2 x 3222 кВА – СОДГ

5 x 2333 кВА – СОДГ

Адаптація живлення генератора

Захист електростанції

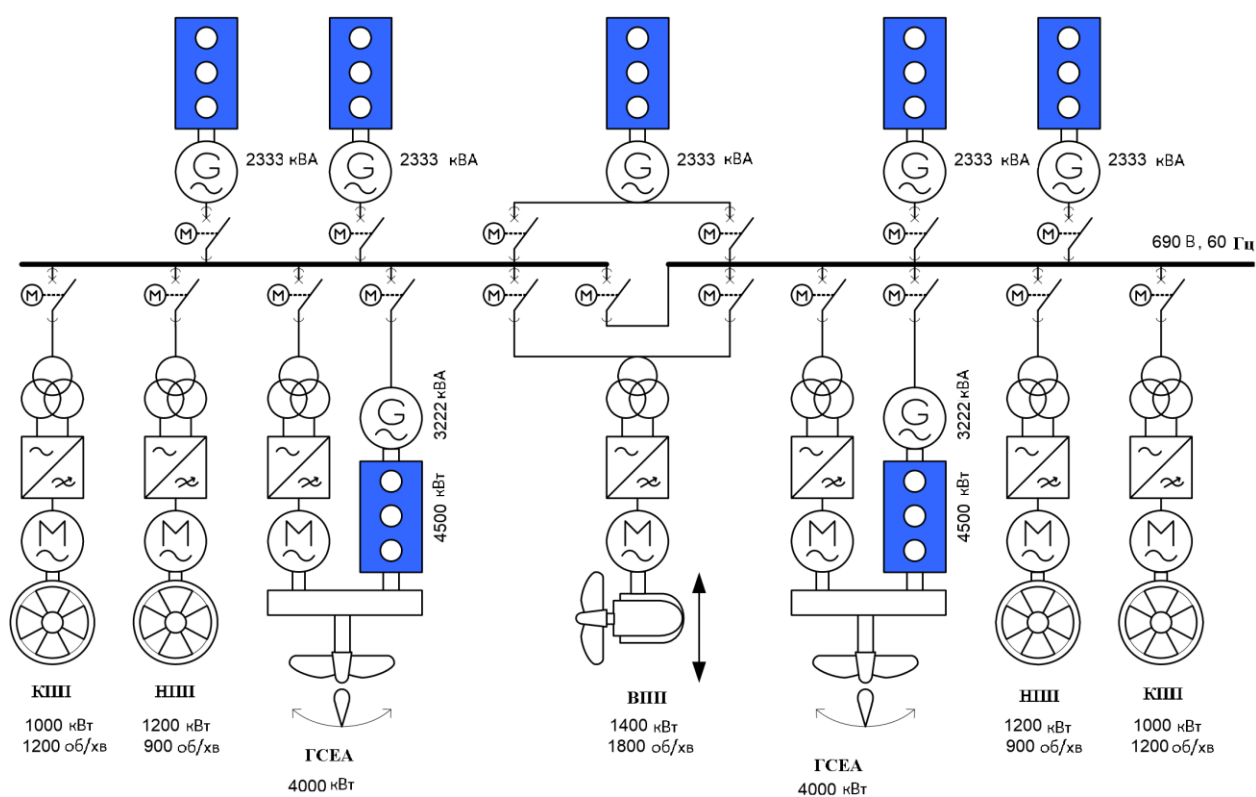


Рис. Б.3 Тактико-технічні характеристики СЕУ **КПК** судна для заведення якорів та офшорного будівництва (англ. *Construction anchor handling vessel – CAHV*): ГСА – головний силовий агрегат; КПП – Кормовий підрулюючий пристрій; НПП – носовий підрулюючий пристрій; ВПП – Висувний підрулюючий пристрій

Судно для заведення якорів та офшорного будівництва *Olympic Shipping AS Ulstein Berft 282*

Гібридний ДЕПК з частотними перетворювачами *Bluedrive*

2 x 4000 кВт – Головний силовий агрегат (ГСА)
 2 x 1000 кВт – Тунельний НПП
 2 x 1200 кВт – Тунельний КПП
 1 x 1400 кВт – Азимутальний ПП
 2 x 3222 кВт – СОДГ
 5 x 2333 кВт – СОДГ
 Адаптація живлення СОДГ
 Захист електростанції

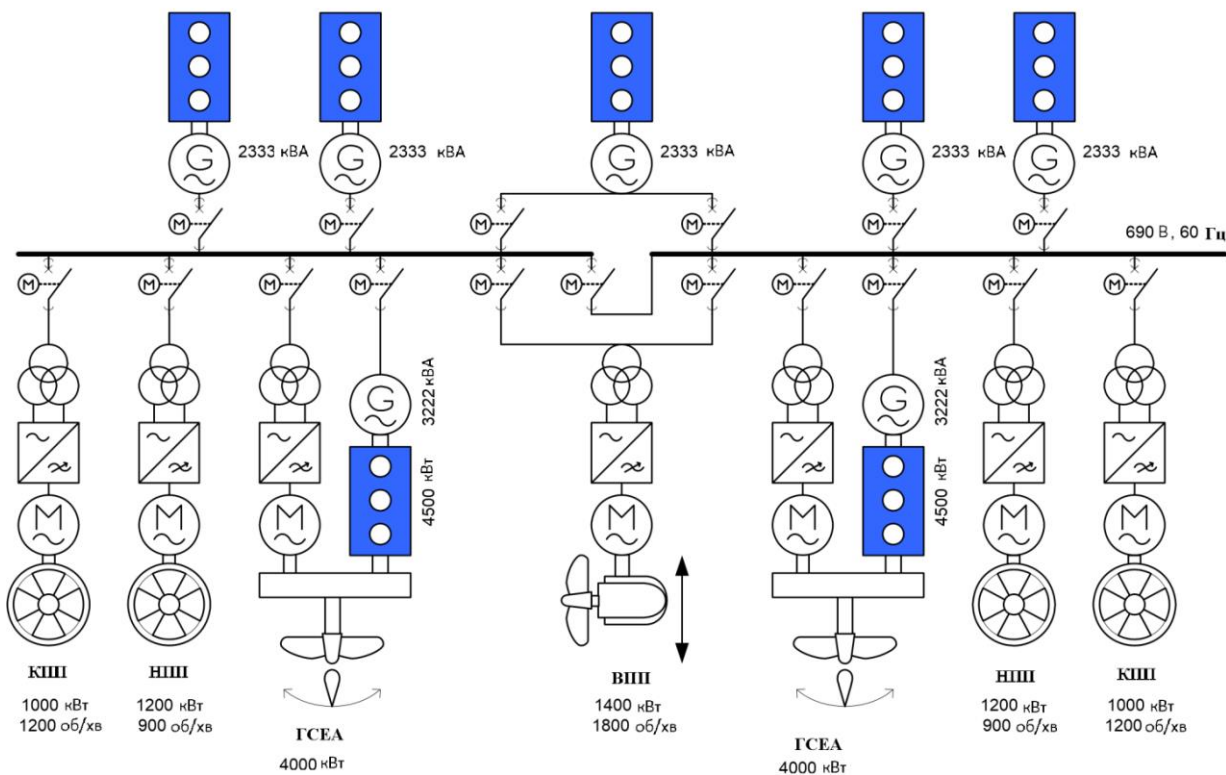


Рис. Б.4 Тактико-технічні характеристики СЕУ **КПК** судна для заведення якорів та офшорного будівництва (англ. *Construction anchor handling vessel – CAHV*): ГСЕА – головний силовий агрегат; КПП – Кормовий підрулюючий пристрій; НПП – носовий підрулюючий пристрій; ВПП – Висувний підрулюючий пристрій

Резервне, рятівне та охоронне судно *Simon Møkster Shipping Flekkefjord 191*Гібридний **ДЕПК** з перетворювачі частоти *Blue drive*

2 x 2000 кВт – ГСА

1 x 1800 кВт – Азимутальний **ПП**

1 x 1200 кВт – Тунельний КПП

2 x 880 кВт – Тунельний НПП

690 В – ГРЩ НН

230 В – ГРЩ НН

Система управління живленням

Адаптація живлення генератора,

захист електростанцій,

трансформатори

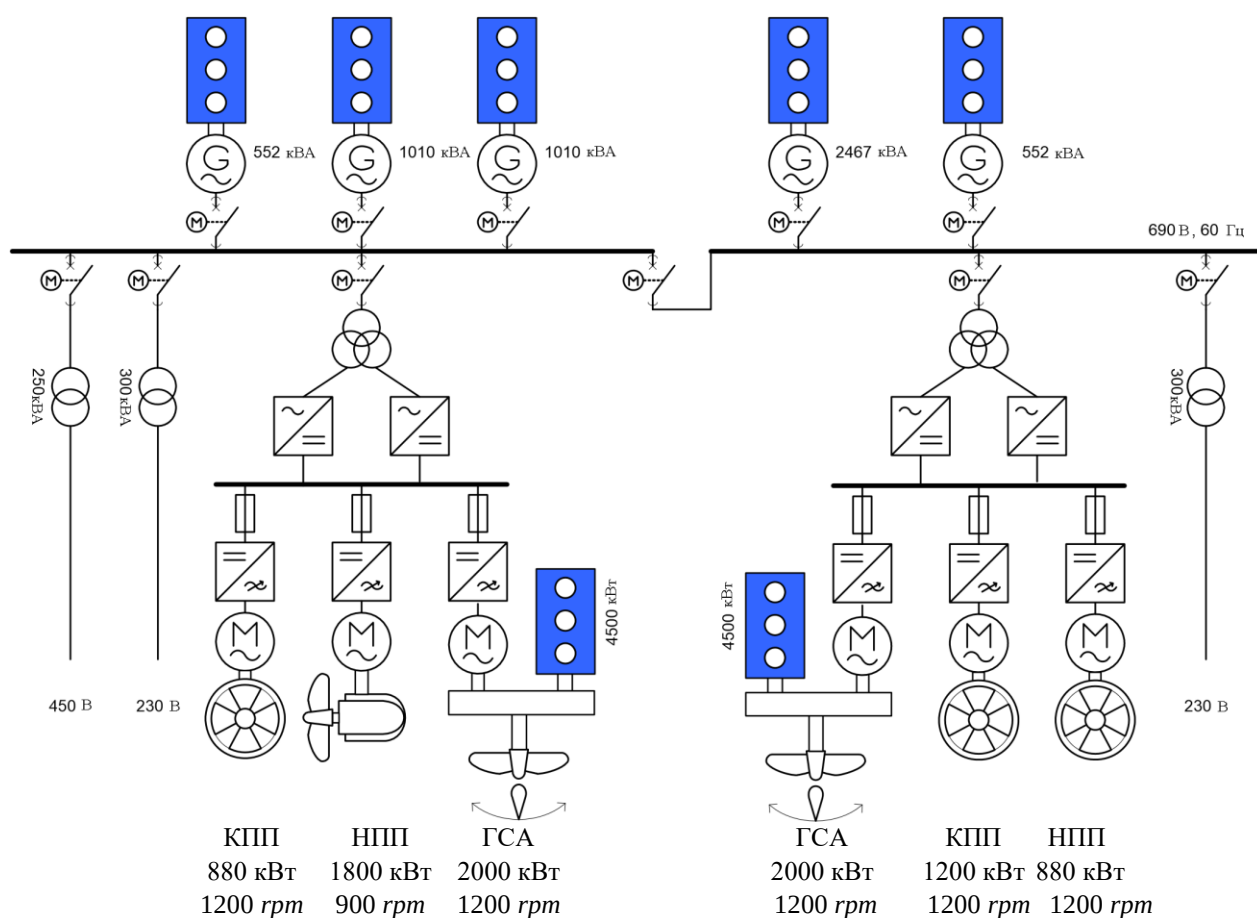


Рис. Б.5 Тактико-технічні характеристики СЕУ **КПК** резервного, рятівного та охоронного судна (англ. *Stand-by and Guard Vessels – SBV*): ГСА – головний силовий агрегат; КПП – Кормовий підрулюючий пристрій; НПП – Носовий підрулюючий пристрій

Судно для офшорного будівництва *Taubåtkompaniet* – “Boa Sub C” *Factorias Vulcano S.A*

Гібридний ДЕПК з ПЧ типу *MASTERDRIVES*

2 x (2 x 3300) кВт – Гребна електрична установка (ГЕУ)

2 x 2150 кВт – Азимутальний підрулюючий пристрій (АПП)

1 x 1800 кВт – Носовий підрулюючий пристрій (НПП)

2 x 1425 кВт – Кормовий підрулюючий пристрій (КПП)

2 x 6144 кВа – Високовольтний СОДГ

4 x 3066 кВа – Високовольтний СОДГ

1 x 910 кВа – Високовольтний СОДГ

6,6 кВ – ГРЩ ВН

450 В, 230 В – ГРЩ НН Трансформатори

Система управління живленням

Адаптація потужності СОДГ

Захист електростанцій

Управління ПП Незалежний джойстик Контроль ГЕУ

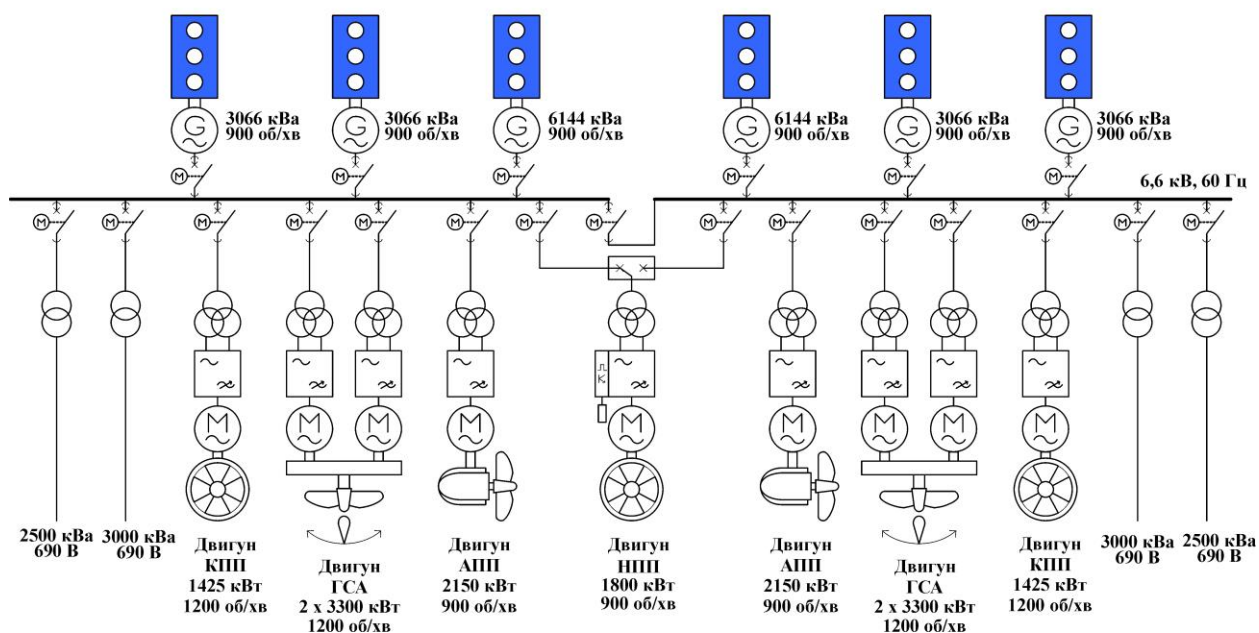


Рис. Б.6 Тактико-технічні характеристики СЕУ **КПК** судна для офшорного будівництва (англ. *Offshore Construction Vessel* – OCV): ГСА – головний силовий агрегат; КПП – Кормовий підрулюючий пристрій; НПП – Носовий підрулюючий пристрій; АПП – Азимутальний підрулюючий пристрій

Дизельна електрична установка постійного струму

MASTERDRIVES конвертери з частотним управлінням підрулюючими пристроями

2 x 1200 кВт – Головний силовий агрегат (ГСА)

1 x 600 кВт – Носовий підрулюючий пристрій (НПП)

1 x 350 кВт – Кормовий підрулюючий пристрій (КПП)

3 x 1450 кВА – СОДГ

Система управління живленням

Адаптація потужності СОДГ

Захист потужності електростанції

Трансформатори, фільтри гармонік

Система управління з мостика

660В, 415В, 240В – ГРЩ НН

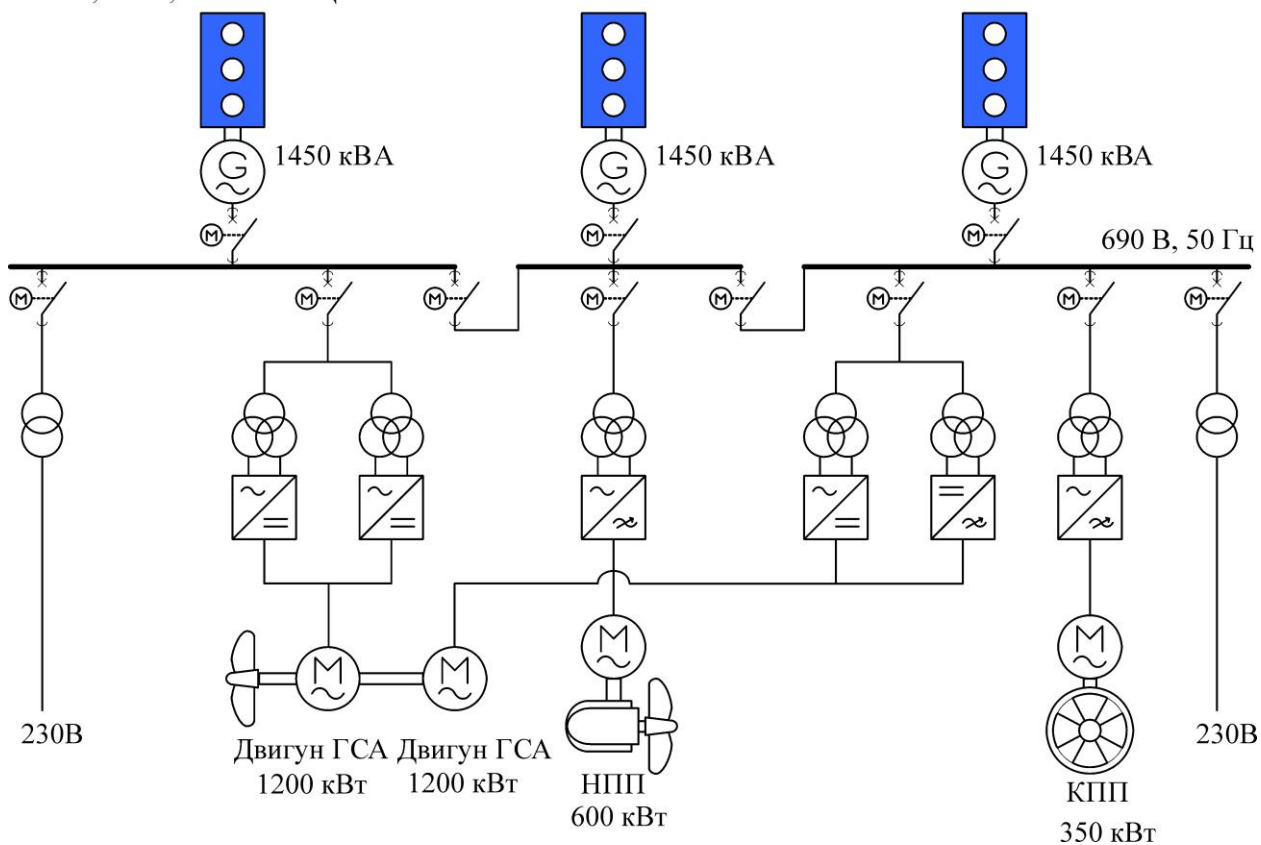


Рис. Б.8 Тактико-технічні характеристики СЕУ **КПК** океанографічного дослідницького судна (англ. *Oceanographic Research Vessels* – ORV): ГСА – головний силовий агрегат; КПП – Кормовий підрулюючий пристрій; НПП – Носовий підрулюючий пристрій; АПП – Азимутальний підрулюючий пристрій

Риболовецьке дослідницьке судно *Institute of Marine Reseah – "G.O. Sars"*
Flekkefjord Slipp & Maskinfabrikk AS

Дизельна електрична установка *SCR*

2 x 3000 кВт – Головний силовий агрегат (ГСА)

3 x 3250 кВА – СОДГ

1 x 625 кВА – СОДГ

690, 450, 230 В ГРЩ НН

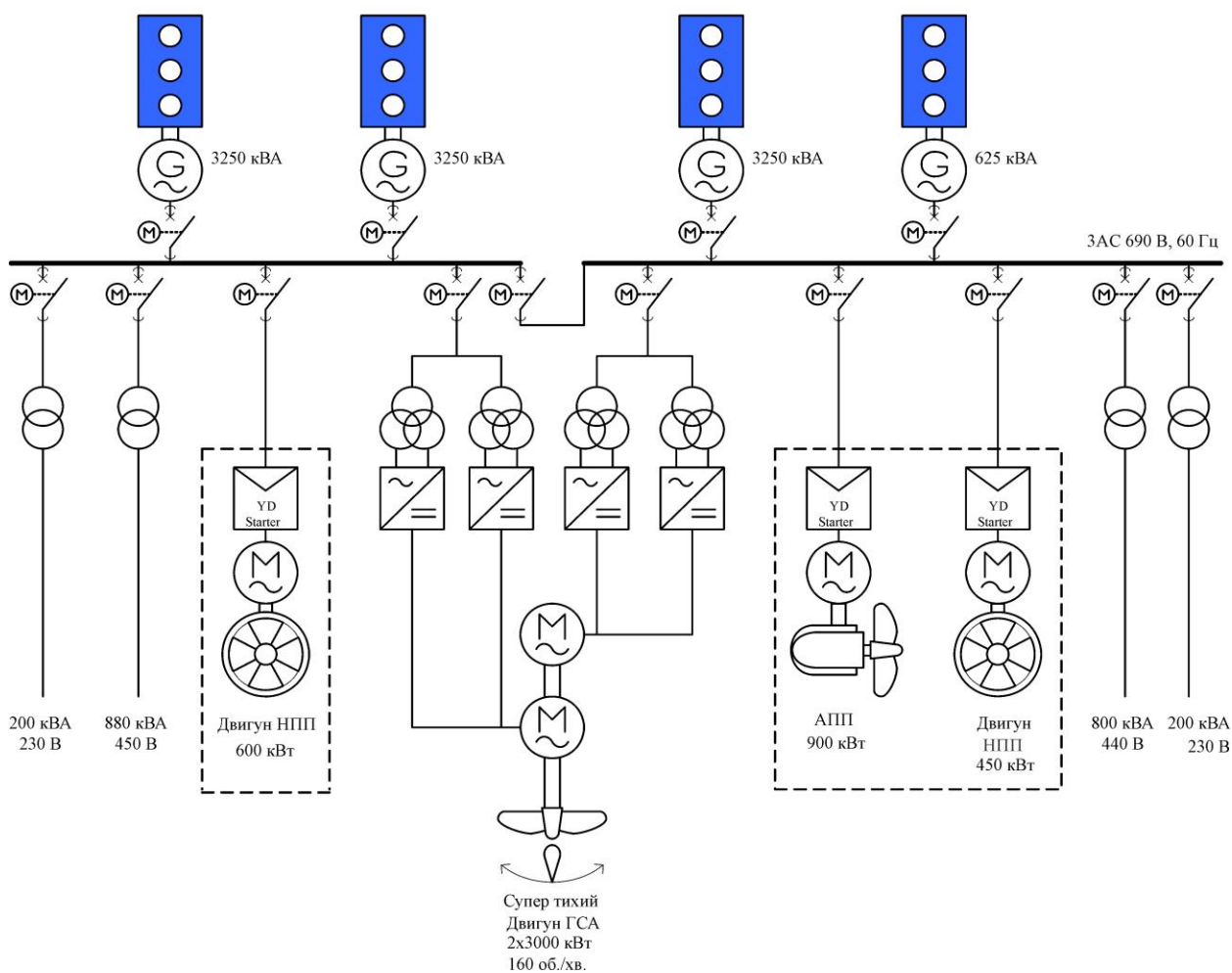


Рис. Б.9 Тактико-технічні характеристики СЕУ **КПК** риболовецького дослідницького судна (англ. *Fisheries research vessel – FRV*): ГСА – головний силовий агрегат; КПП – Кормовий підрулюючий пристрій; НПП – носовий підрулюючий пристрій; АПП – Азимутальний підрулюючий пристрій

Пасажирське судно OVDS – “Fram” Fincantieri

Дизельні електричні установки
MASTERDRIVES з частотними
 конвертерами

2 x 2310 кВт – Головний силовий агрегат (ГСА)

2 x 1000 кВт – Носовий підрулюючий пристрій (НПП)

4 x 2250 кВА – СОДГ

Система управління живленням

Адаптація потужності генератора

Захист потужності електростанції

Трансформатори

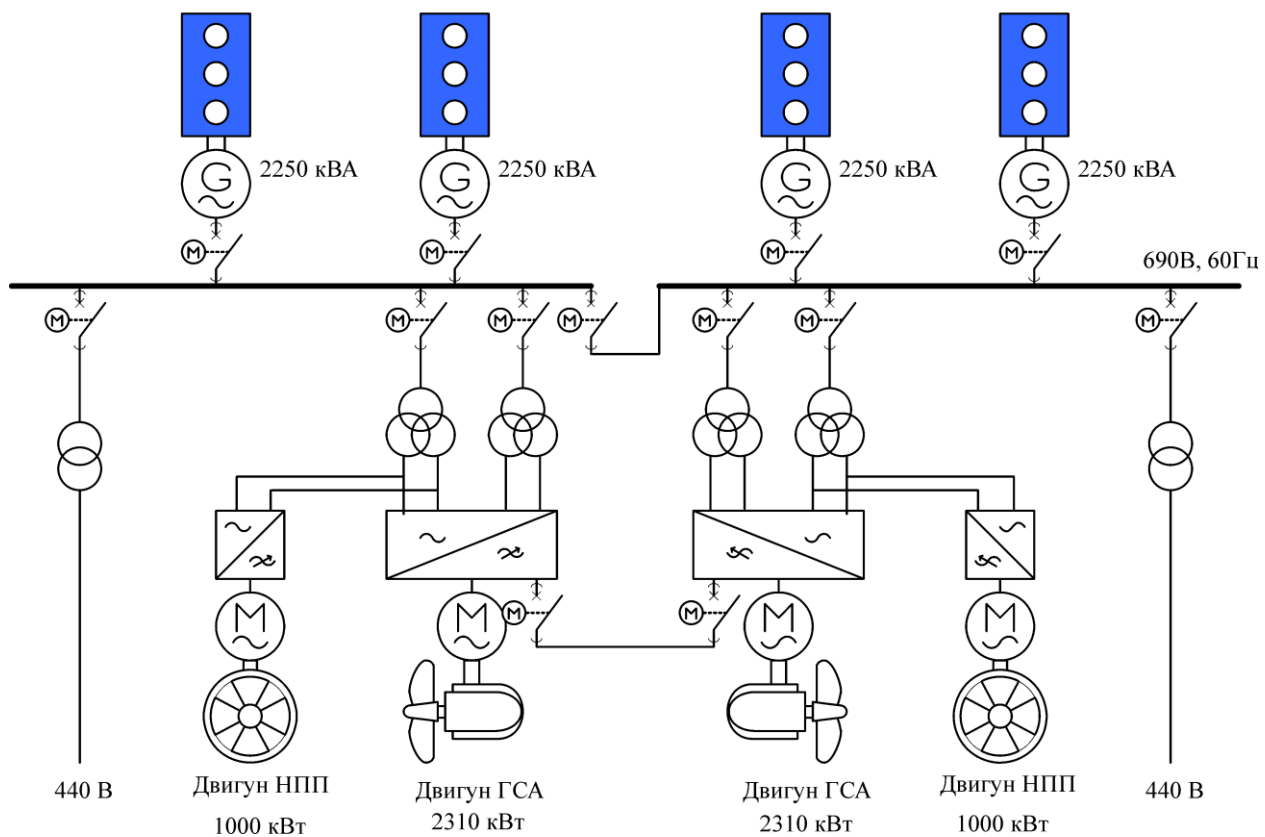


Рис. Б.10 Тактико-технічні характеристики СЕУ **КПК** дизель-електричного пасажирського судна (англ. *Diesel-electric Passenger Vessels – DEPV*): ГСА – головний силовий агрегат; КПП – кормовий підрулюючий пристрій; НПП – Носовий підрулюючий пристрій; АПП – Азимутальний підрулюючий пристрій

Риболовецький траулер *SølvTrans AS “RonjaSuperior” Aas Mekaniske AS 177*

Дизельно-електрична силова установка

з перетворювачем частоти «*BLUEDRIVE*»

1 x 680 кВт - Гребна електрична установка (ГЕУ)

1 x 680 кВт - Гребна електрична установка (ГЕУ)

Система управління живленням

Адаптація потужності генератора

Захист електростанції

Трансформатори

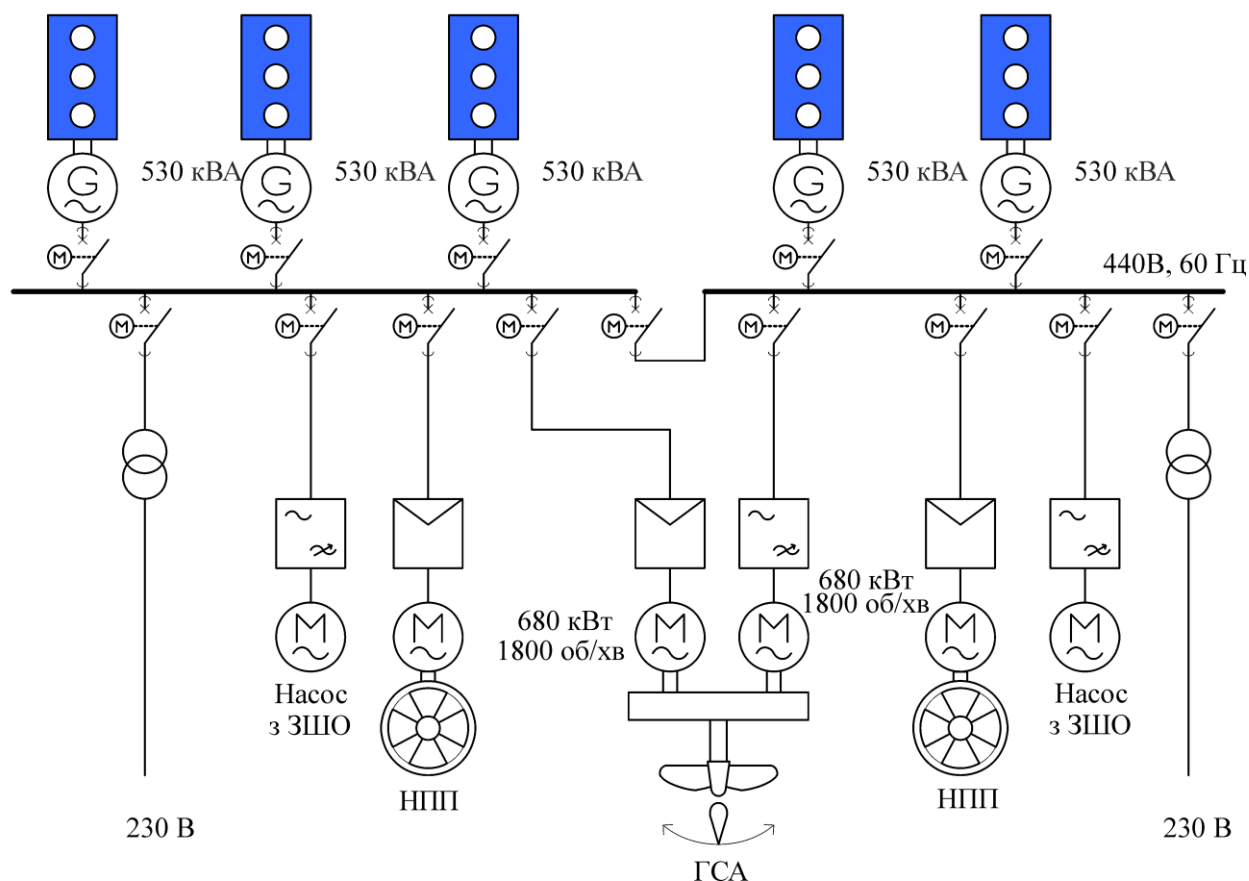


Рис. Б.11 Тактико-технічні характеристики СЕУ **КПК** риболовецького траулера (англ. *Live Fish Carrier* – *LFC*): ГСА – головний силовий агрегат; НЗШО – Насос зі змінною швидкістю обертання (англ. *Variable Speed Drives* – *VSD*, *Variable Speed Pumping* – *VSP*, *Variable Frequency Drive* – *VFD*) ; НПП – Носовий підрулюючий пристрій

Пелагічний сейнер-траулер *Rederi Teigenes AS – “Teigene” Remontowa B 336/1*

Гібридна силова установка з перетворювачами частоти «MASTERDRIVES»

1 x 5800 кВт Гібридна силова установка

1 x Система керування гребними установками

1 x 2900 кВА Валогенератор

2 x 1700 кВА – СОДГ

1 x 1140 кВА – СОДГ

690 В ГРЩ НН

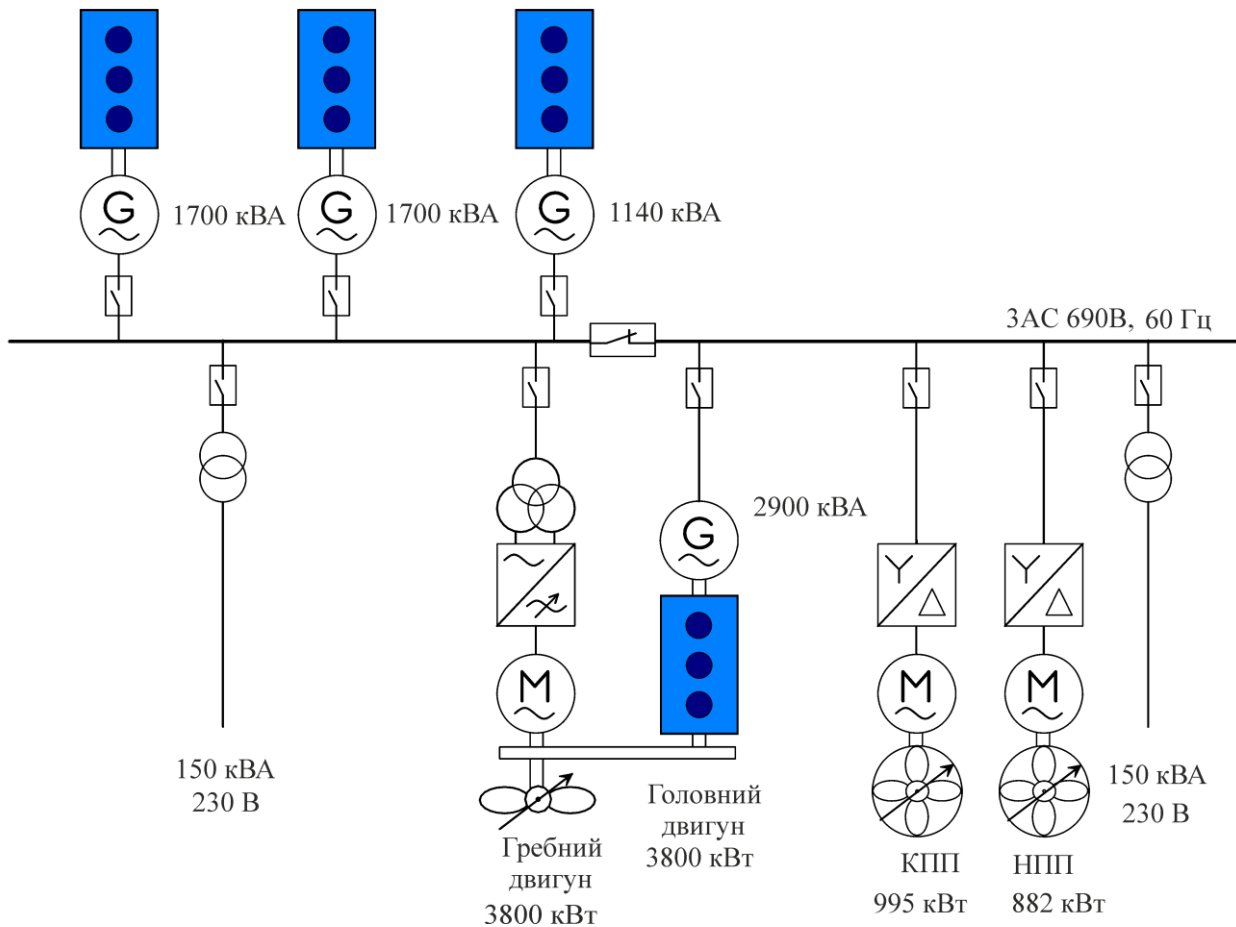


Рис. Б.12 Тактико-технічні характеристики СЕУ **КПК** пелагічного сейнер-траулера (англ. *Purse Seiner/Pelagic Trawler – PST*): ГСА – головний силовий агрегат; КПП – Кормовий підрулюючий пристрій; НПП – носовий підрулюючий пристрій

Риболовецьке судно MT 1110 *Ervik Havfiske AS* – "Frøyanes" Solstrand AS

Дизельно-електрична силова установка
з перетворювачем частоти «MASTERDRIVES»

600 + 800 кВт – ГЕУ

1 x 315 кВт – Носовий підрулюючий пристрій

2 x 1140 кВА – СОДГ

1 x 450 кВА – СОДГ

440 В ГРЩ НН

Siemens – система керування гребними установками з:

- Голосна панель мостика
- Підпорядкована панель
- Гвинт регульованого кроку

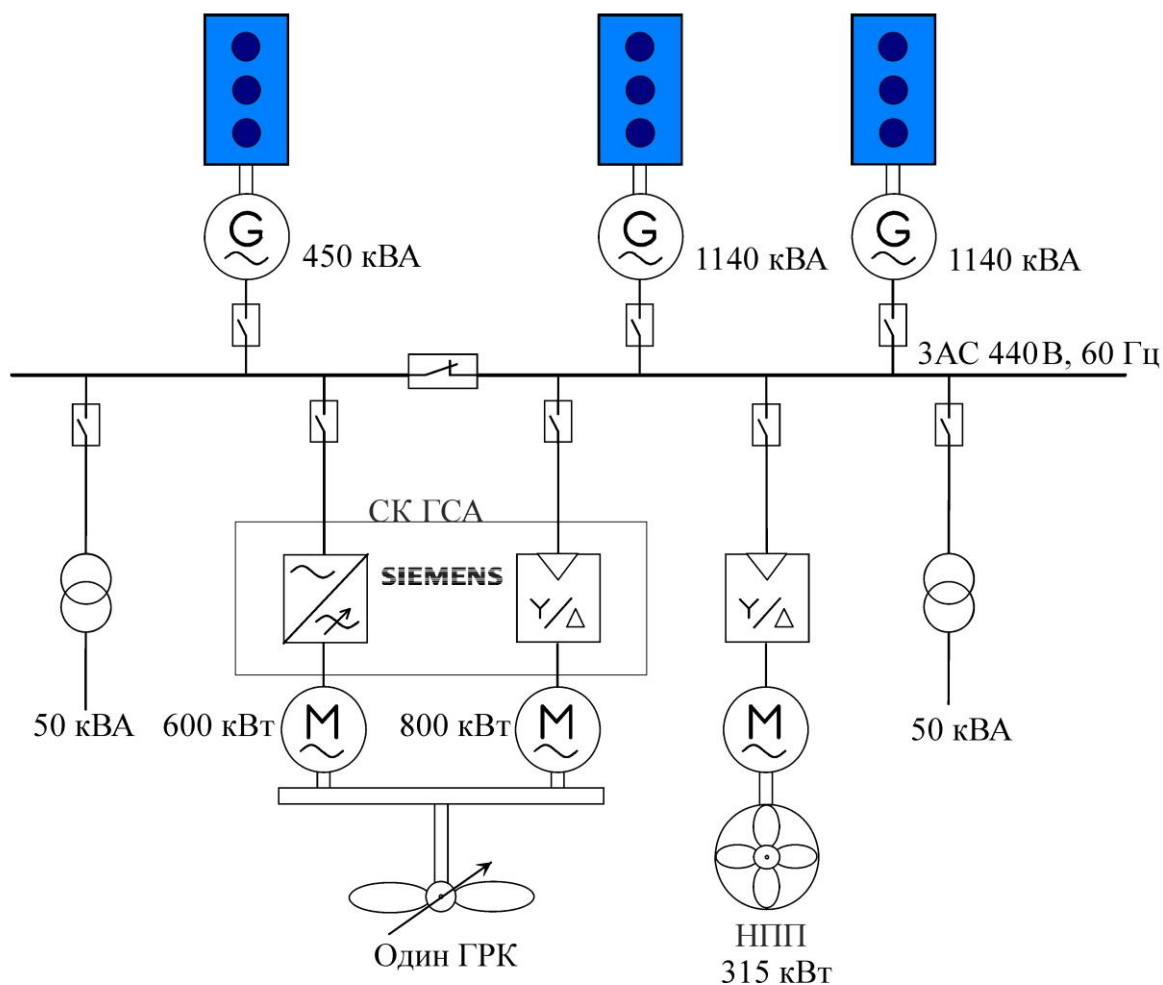


Рис. Б.13 Тактико-технічні характеристики СЕУ **КПК** риболовецького траулера (англ. *Live Fish Carrier* – *LFC*): ГСА – головний силовий агрегат; НПП – Носовий підрулюючий пристрій; Гвинт регульованого кроку

Продуктове судно/хімовоз *BRP Rederi AB – “Fox Sunrise” Aas Mek Verft 175*

Дизельно-електрична силова установка
з перетворювачем частоти «MASTERDRIVES»

2 x 900 кВт – Гребна силова установка (ГСА)

1 x 350 кВт – Носовий підрулюючий пристрій (НПП)

1 x 350 кВт – Вантажний насос

5 x 500 кВА – СОДГ

Система управління живленням

Адаптація потужності СОДГ

Захист електростанції

Трансформатори

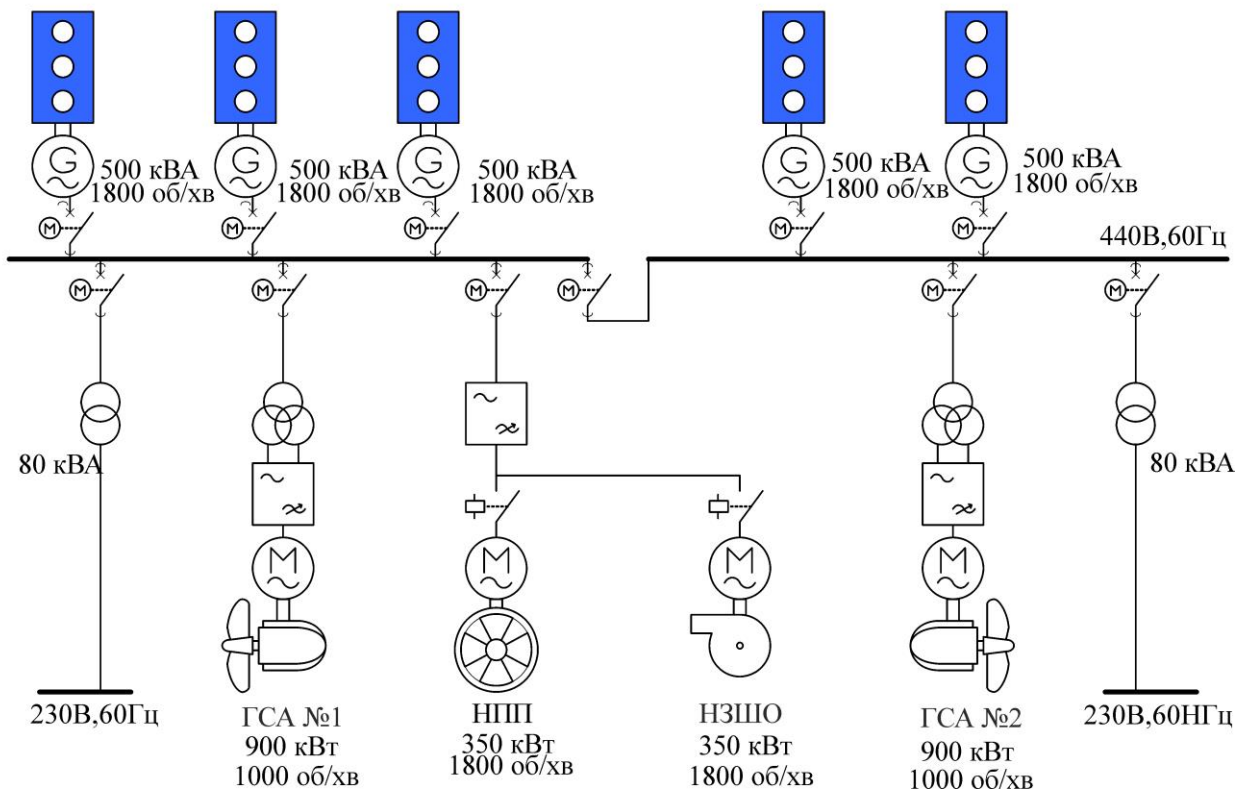


Рис. Б.14 Тактико-технічні характеристики СЕУ **КПК** продуктового судна/хімовоза (англ. *Product/Chemical Tankers – PCT*): ГСА – головний силовий агрегат; НЗШО – Насос зі змінною швидкістю обертання (англ. *Variable Speed Drives – VSD, Variable Speed Pumping – VSP, Variable Frequency Drive – VFD*) ; НПП – носовий підрулюючий пристрій

Продуктовий танкер/хімовоз *Rederi AB Donsötank – "Prospero" Shanghai Edward*

Дизельно-електрична силова установка
з перетворювачем частоти «SIMOVERT D»

5100 кВт – Головний силовий агрегат (ГСА)

1 x 620 кВт – Носовий ПП (НПП)

4 x 2100 кВА – СОДГ

1 x 560 кВА – СОДГ

18 x 40–110 кВт – ПЧ

(Баластні насоси, вантажні насоси)

690, 400, 230 В ГРЩ НН

Трансформатори

Мостові панелі/Панелі контролю

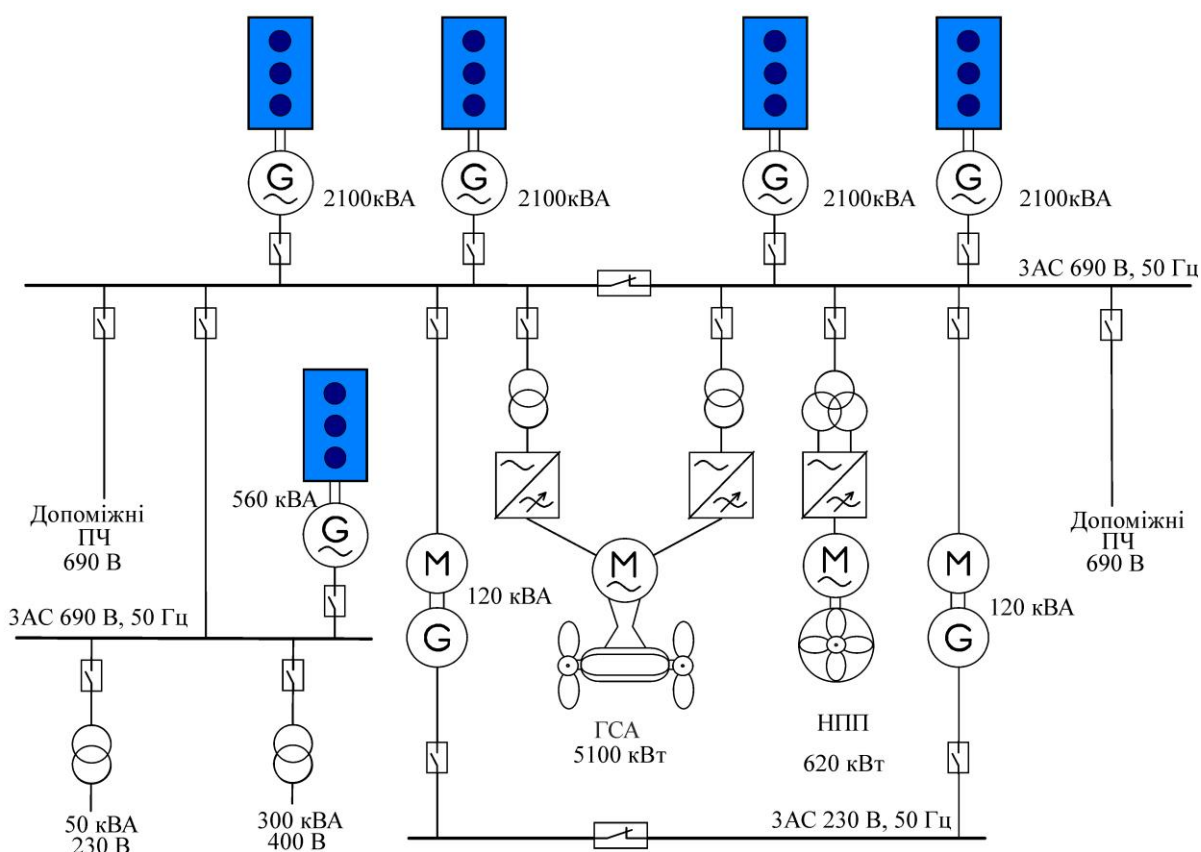


Рис. Б.15 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК продуктового судна/хімовоза (англ. *Product/Chemical Tankers – PCT*): ГСА – головний силовий агрегат; НЗШО – Насос зі змінною швидкістю обертання (англ. *Variable Speed Drives – VSD, Variable Speed Pumping – VSP, Variable Frequency Drive – VFD*) ; НПП – носовий підрулюючий пристрій

Подвійний морський підйомник *SeaMetric International AS Yard TBD*

Дизельно-електрична силова установка
з перетворювачем частоти «BLUEDRIVE»

4 x 3250 кВт – Головний силовий агрегат (ГСА)

2 x 3333 кВА – СОДГ

4 x 2500 кВА – СОДГ

690 В ГРЩ НН

Система управління живленням

Адаптація потужності СОДГ

Захист електростанції

Трансформатори

Вбудована сигналізація та система моніторингу

Система управління ПП

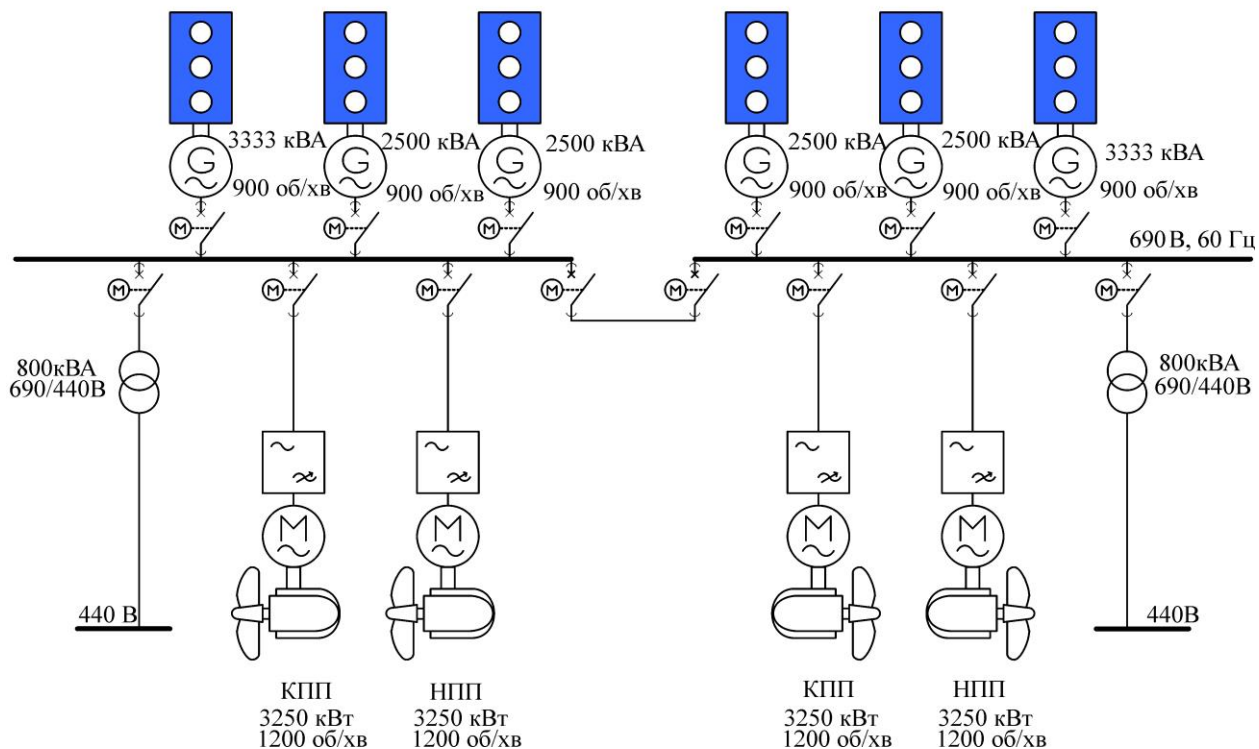


Рис. Б.16 Тактико-технічні характеристики СЕУ **КПК** подвійного морського підйомнику (англ. *Twin Marine Lifter* – *TML*): ГСА – головний силовий агрегат; КПП – Кормовий підрулюючий пристрій; НПП – носовий підрулюючий пристрій

Патрульне судно з подвійним корпусом *Thyssen Krupp Nordseewerke GmbH*
563

Гібридний ДЕПК з ПЧ “*Bluedrive*”

2 x 3800 кВт – Головний силовий агрегат (ГСА)

1 x 280 кВт – Тунельний носовий ПП (НПП)

4 x 2310 кВА – СОДГ

690 В – ГРЩ НН

Система управління живленням

Адаптація потужності СОДГ

Захист електростанції

Трансформування напруги

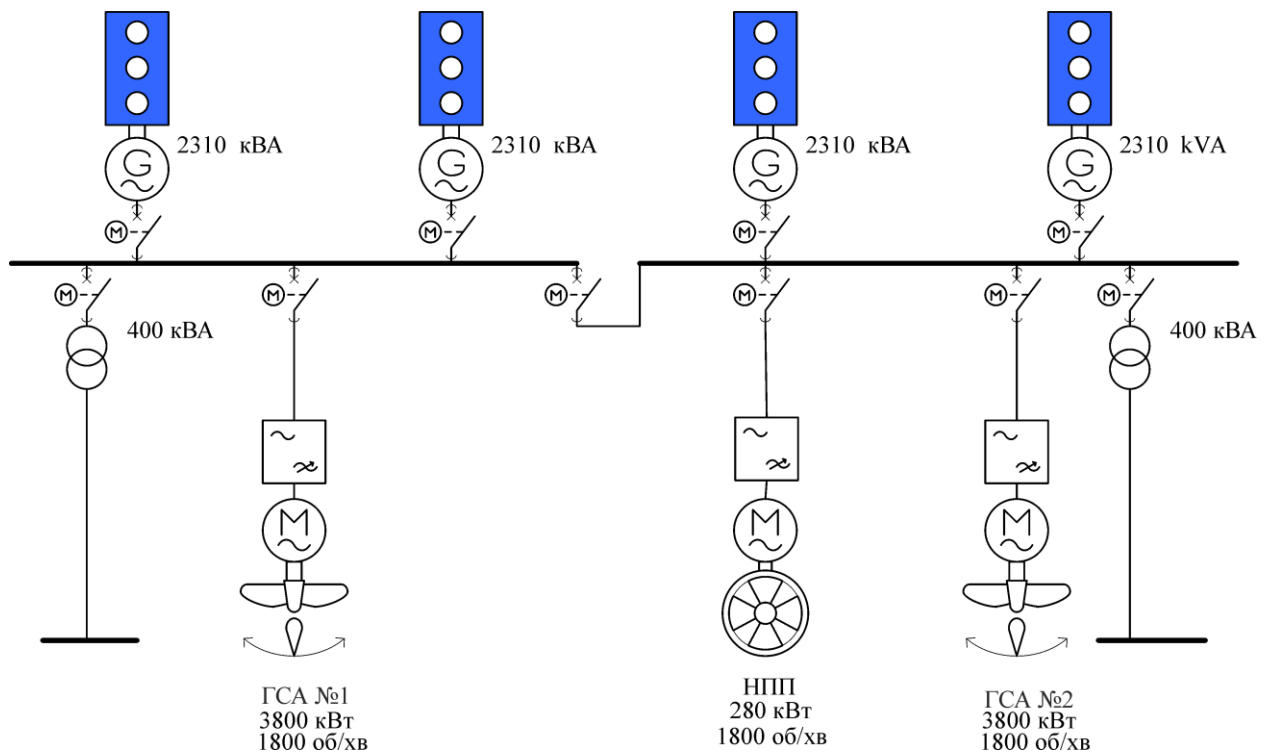


Рис. Б.17 Тактико-технічні характеристики СЕУ КПК патрульного судна побудованого за технологією *SWATH* (англ. *Small Waterplane Area Twin Hull* – *SWATH*): ГСА – головний силовий агрегат; НПП – носовий підрулюючий пристрій

Днопоглиблювальне судно *Suez Canal Authority – "Mashhour" IHC – Holland*

Гібридний ДЕПК з ПЧ "SIMOVERT P"

2 x 1500 кВт – ріжучі приводи

2 x 1500 кВт – днопоглиблюючі насоси

2 x 350 кВт – бортові лебідки

2 x 350 кВт – маятникова лебідка

2 x 350 кВт – лебідки для підйому лебідок

1 x 350 кВт – лебідка руху

Частотні перетворювачі кранів

660 В – ГРЩ НН

Головні генератори

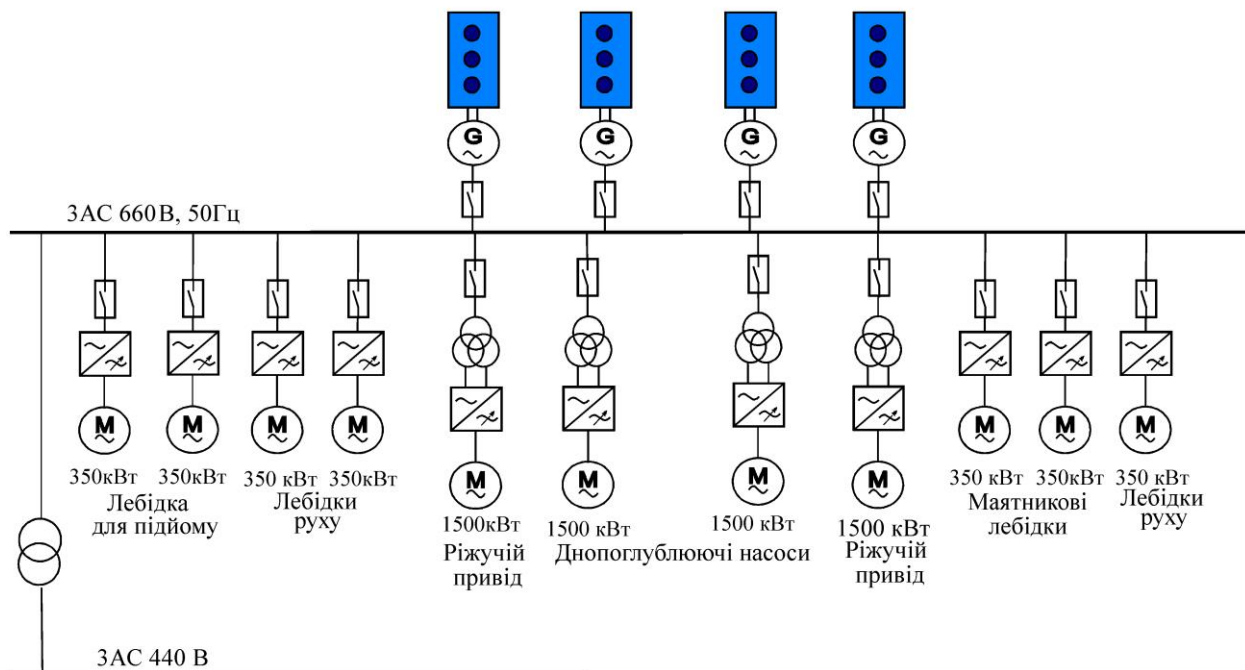


Рис. Б.18 Тактико-технічні характеристики СЕУ **КПК** днопоглиблювального судна (англ. *Cutter Suction Dredger – CSD*): ГСА – головний силовий агрегат

Судно для дослідження морського дна *BOA Offshore Fosen Mek BN 80*

Гібридний ДЕПК з ПЧ “*Bluedrive*”

4 x 2020 кВА – СОДГ

2 x 2200 кВт – Головний силовий агрегат (ГСА)

2 x 800 кВт – Азимутальний ПП (АПП)

1 x 1050 кВт – Тунельний ПП (ТПП)

690 В – ГРЩ НН

Інтегрована система автоматизації

Контроль ПП

Джойстикова система управління

Система управління живленням

Система адаптації живлення СОДГ

Захист електростанції

Трансформування напруги

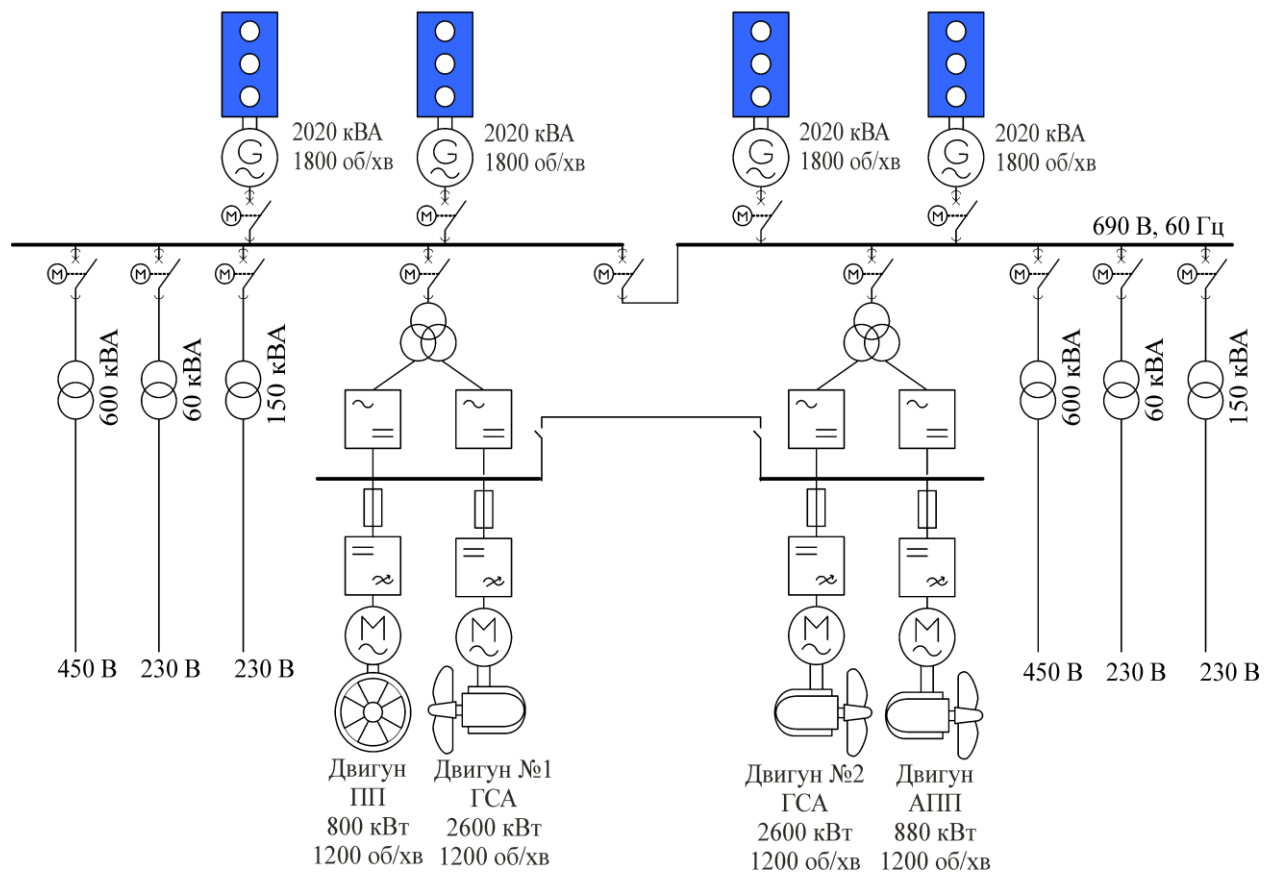


Рис. Б.19 Тактико-технічні характеристики СЕУ **КПК** Судно для дослідження морського дна (англ. *Seabed Logging Ship – SLS*): ГСА – головний силовий агрегат; **ПП** – Підрулюючий пристрій; АПП – Азимутальний підрулюючий пристрій

Багатофункціональне геотехнічне дослідницьке судно *MT 6016 L Fugro Synergy NV – “Fugro Synergy” Bergen Yards Halsnøy AS 123*

Гібридний **ДЕПК** з ЧП “*Bluedrive*”

2 x 2200 кВт – Головний силовий агрегат (ГСА)

1 x 800 кВт – Азимутальний **ПП** (АПП)

2 x 1050 кВт – Тунельний ПП

5 x 2333 кВА – СОДГ

690 В ГРЩ НН

Система управління живленням

Адаптація живлення СОДГ

Захист електростанції

Трансформування напруги

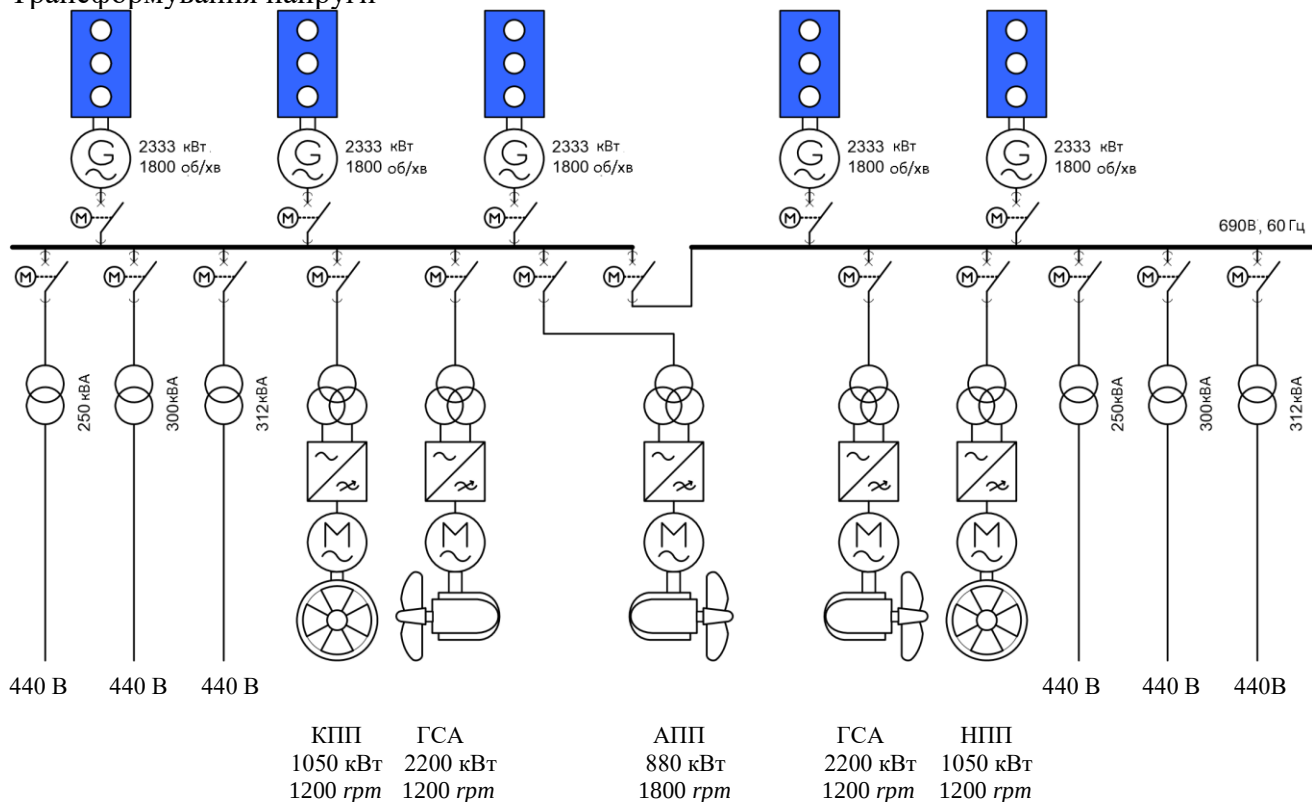


Рис. Б.20 Тактико-технічні характеристики СЕУ **КПК** багатофункціонального геотехнічного дослідницького судна (англ. *Multipurpose Geotechnical & Soil Investigation Vessel – MGTV*): ГСА – головний силовий агрегат; КПП – Кормовий підрулюючий пристрій; НПП – носовий підрулюючий пристрій; АПП – Азимутальний підрулюючий пристрій

Офшорне судно для дослідження морського дна *Aker OSCV-06L DSV*
DOFCON Søviknes Verft 702

Гібридний ДЕПК з ПЧ типу “Bluedrive”

- 1 x 4000 кВт – Головний силовий агрегат (ГСА)
- 2 x 1500 кВт – Боковий ПП (БПП)
- 2 x 3000 кВт – Азимутальний ПП (АПП)
- 2 x 1900 кВт – ПП, що висувається з корпусу (ВПП)
- 4 x 3066 кВа – СОДГ
- 2 x 6144 кВа – СОДГ
- 6600 В – ГРЩ ВН
- Система управління живленням
- Адаптація потужності СОДГ
- Захист електростанції
- Трансформування напруги, фільтри гармонік

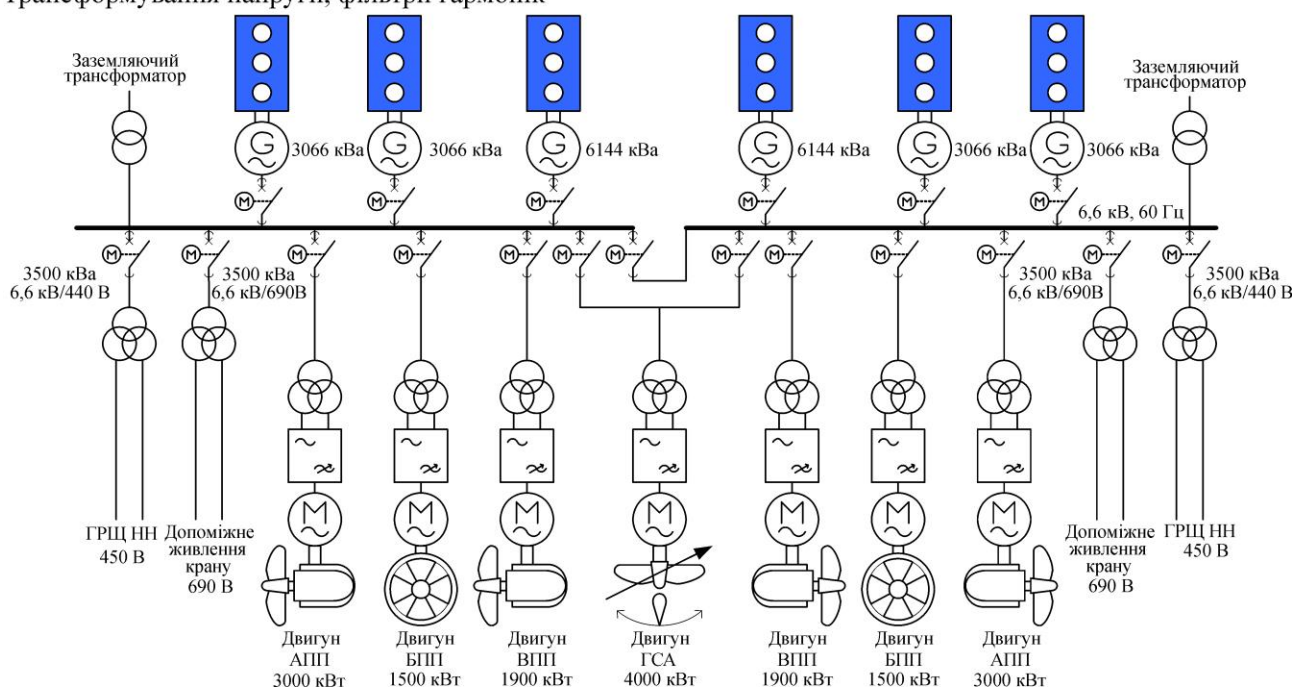


Рис. Б.21 Тактико-технічні характеристики СЕУ **КПК** оффшорного судна для дослідження морського дна (англ. *Offshore Subsea Construction Vessel* – OSCV): ГСА – головний силовий агрегат; БПП – Боковий підрулюючий пристрій; ВПП – висувний підрулюючий пристрій; АПП – Азимутальний підрулюючий пристрій

Багатоцільове судно із дистанційно-керованими підводними апаратами (ДКПА) (англ. *Remotely operated underwater vehicle – ROV*) P103 Solstad Shipping – ”Normand Mermaid” Ulstein Verft

Гібридний ДЕПК з ПЧ типу “Masterdrives”

2 x 3000 кВт – Головний силовий агрегат (ГСА)

2 x 1200 кВт – Носовий ПП (НПП)

1 x 1200 кВт – Азимутальний ПП (АПП)

4 x 2800 кВА – СОДГ

690, 450, 230 В – ГРЩ НН

Трансформування напруги

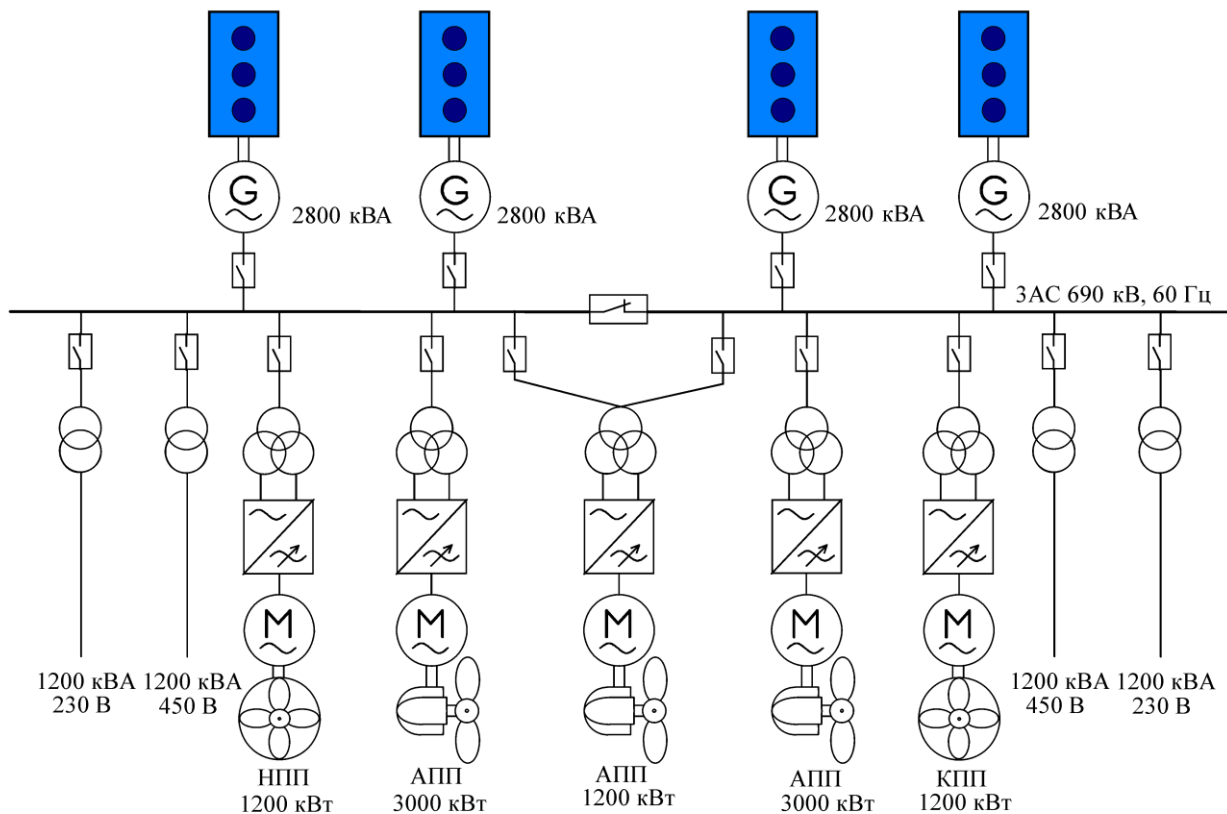


Рис. Б.22 Тактико-технічні характеристики СЕУ **КПК** багатоцільового судна із дистанційно-керованими підводними апаратами (англ. *Multipurpose field & ROV Support Vessel – MRSV*): ГСА – головний силовий агрегат; КПП – Кормовий підрулюючий пристрій; НПП – носовий підрулюючий пристрій; АПП – Азимутальний підрулюючий пристрій

Судно для прокладання кабелів *MT6016 DOF ASA – "Skandi Neptune"*
Brattvaag Verft 92

Гібридний **ДЕПК** з ПЧ типу "Masterdrives"

Головних силових агрегатів (ГСА) 2 х 3700 кВт

1 х 1000 кВт – Носовий **ПП** (НПП)

1 х 880 кВт – Азимутально **ПП** (АПП)

6 х 11–160 кВт – ЧП (баластові, вантажні насоси тощо)

2 х 3820 кВА – СОДГ

2 х 1620 кВА – СОДГ

1 х 460 кВт – СОДГ

690, 450, 230 В – РЩ НН, трансформування напруги

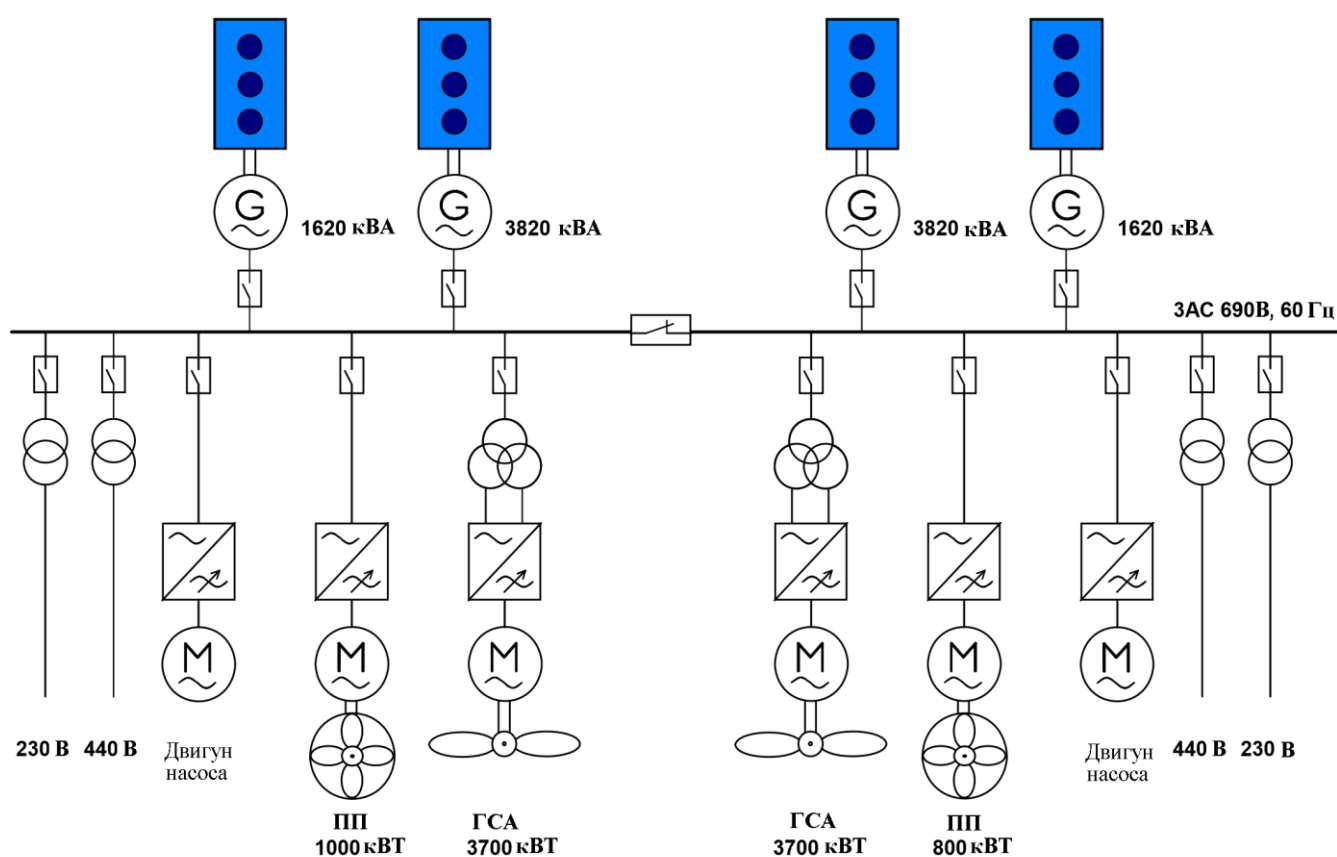


Рис. Б.23 Тактико-технічні характеристики СЕУ **КПК** судна для прокладання кабелів (англ. *Cable laying vessel – CLV*): ГСА – головний силовий агрегат; КПП – Кормовий підрулюючий пристрій; НПП – носовий підрулюючий пристрій

Сейсмічне дослідницьке судно *Geco Pracla* – ”*Geco Eagle*” Mjellemog KarlsenГібридний ДЕПК з ПЧ типу “*Masterdrives*”

2 x 4200 кВт – Головний силовий агрегат (ГСА)

1 x 1000 кВт – Носовий ПП (НПП)

1 x 1500 кВт – Азимутальний ПП (АПП)

4 x 4300 кВт – СОДГ

3 x 780 кВт – Електропривід (ЕП) компресорів

6,6 кВ – ГРЩ ВН

Трансформування напруги

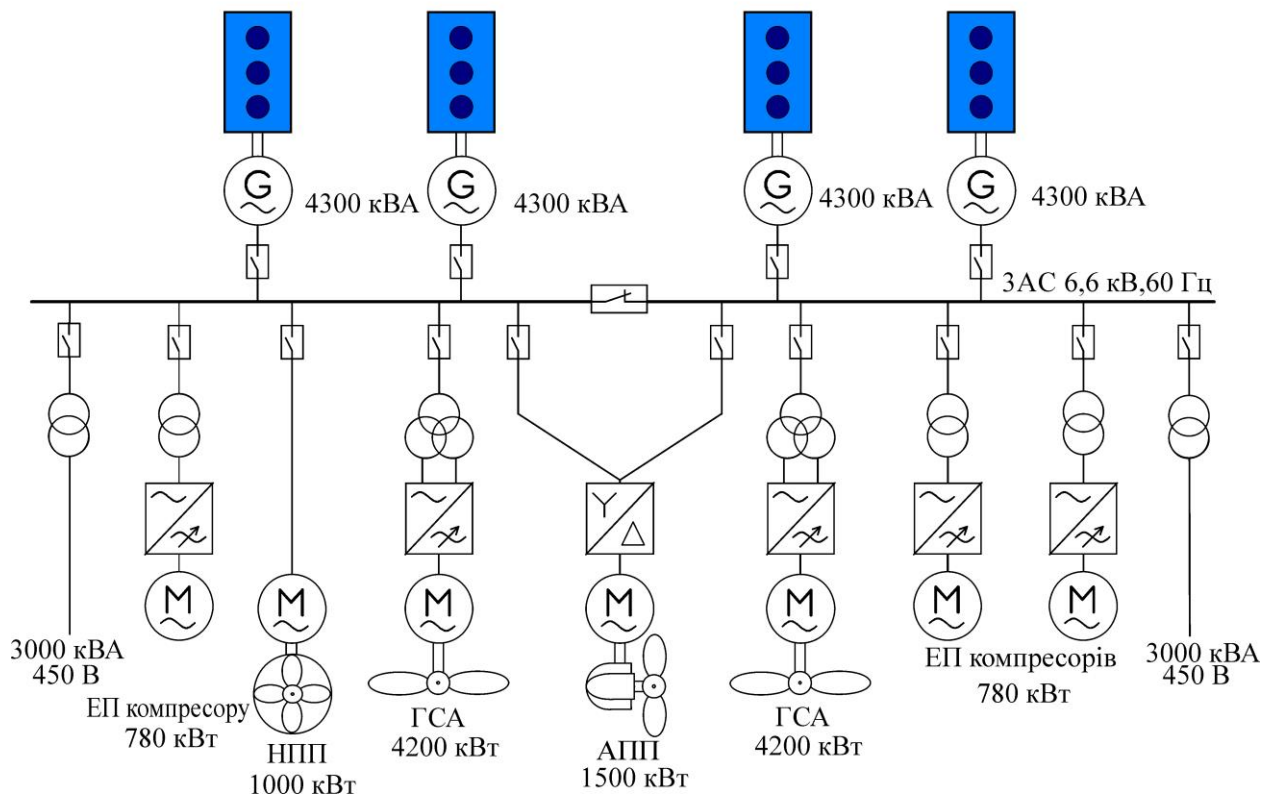


Рис. Б.24 Тактико-технічні характеристики СЕУ **КПК** сейсмічного дослідницького судна (англ. *Seismic Research Vessel* – SRV): ГСА – головний силовий агрегат; КПП – Кормовий підрулюючий пристрій; НПП – носовий підрулюючий пристрій

Газовий автомобільний паром *Fjord 1 Remontowa*Гібридний ГЕПК з ЧП типу “*Blue drive*”

2 x 1000 кВт – Головний силовий агрегат (ГСА)

3 x 1000 кВА – СОГГ

690 В – ГРЩ НН

Система управління живленням

Адаптація потужності СОГГ

Захист потужності електростанції

Трансформування напруги

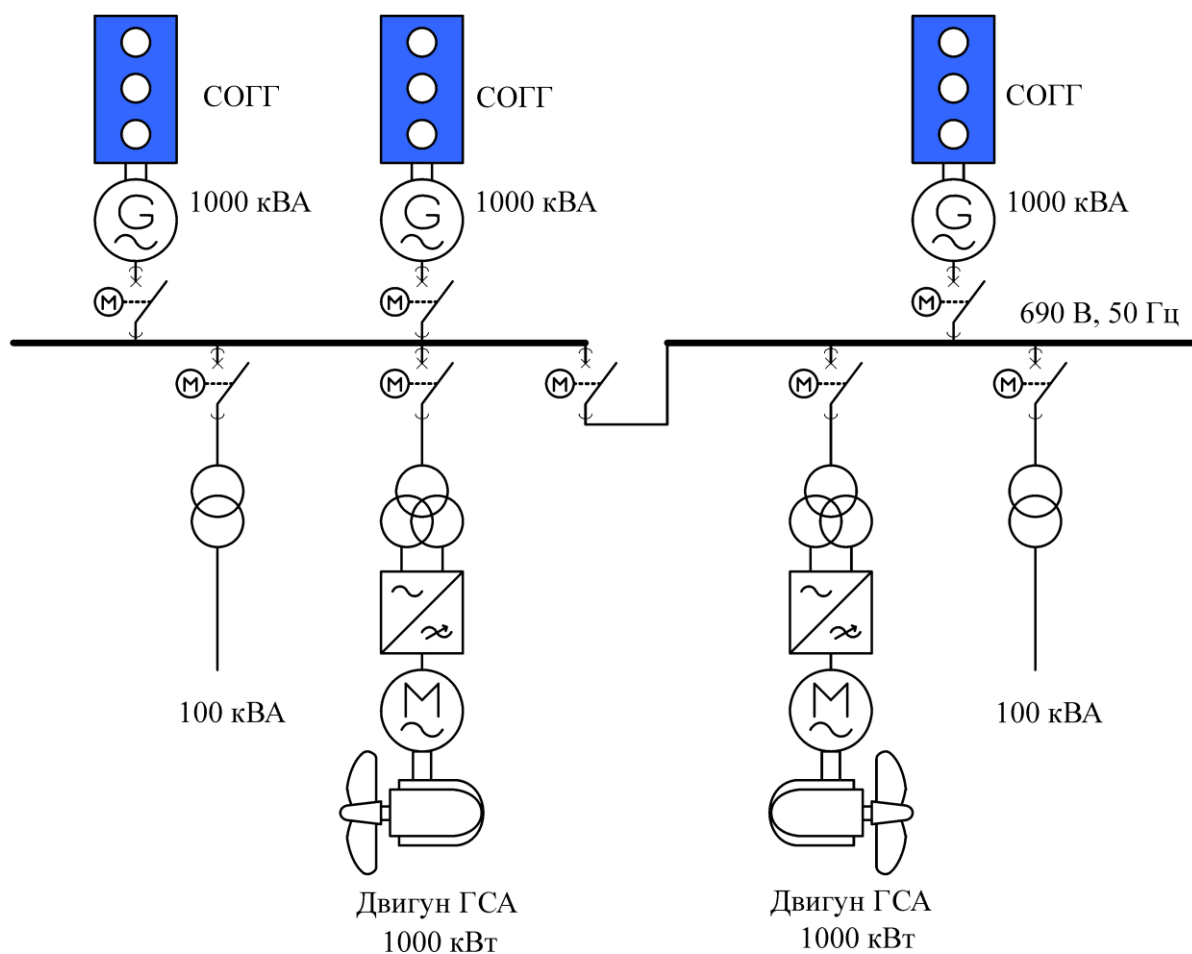


Рис. Б.25 Тактико-технічні характеристики СЕУ **КПК** газового автомобільного парому (англ. *LNG Car Ferry – LNGCF*): ГСА – головний силовий агрегат; КПП – Кормовий підрулюючий пристрій; НПП – носовий підрулюючий пристрій; СОГГ – середньо-обертовий газовий генератор, що працює на скрапленому природному газі (СПГ, англ. *liquefied natural gas – LNG*)

Пасажирський паром *Gozo Channel Company Ltd. – “Malita” Malta Shipbuilding Co. 178*

Гібридний ДЕПК зі стартерами зірка/трикутник

4 x 1575 кВА – СОДГ

4 x 850 кВт – Головний силовий агрегат (ГСА)

4 x 850 кВт – стартери зірка/трикутник

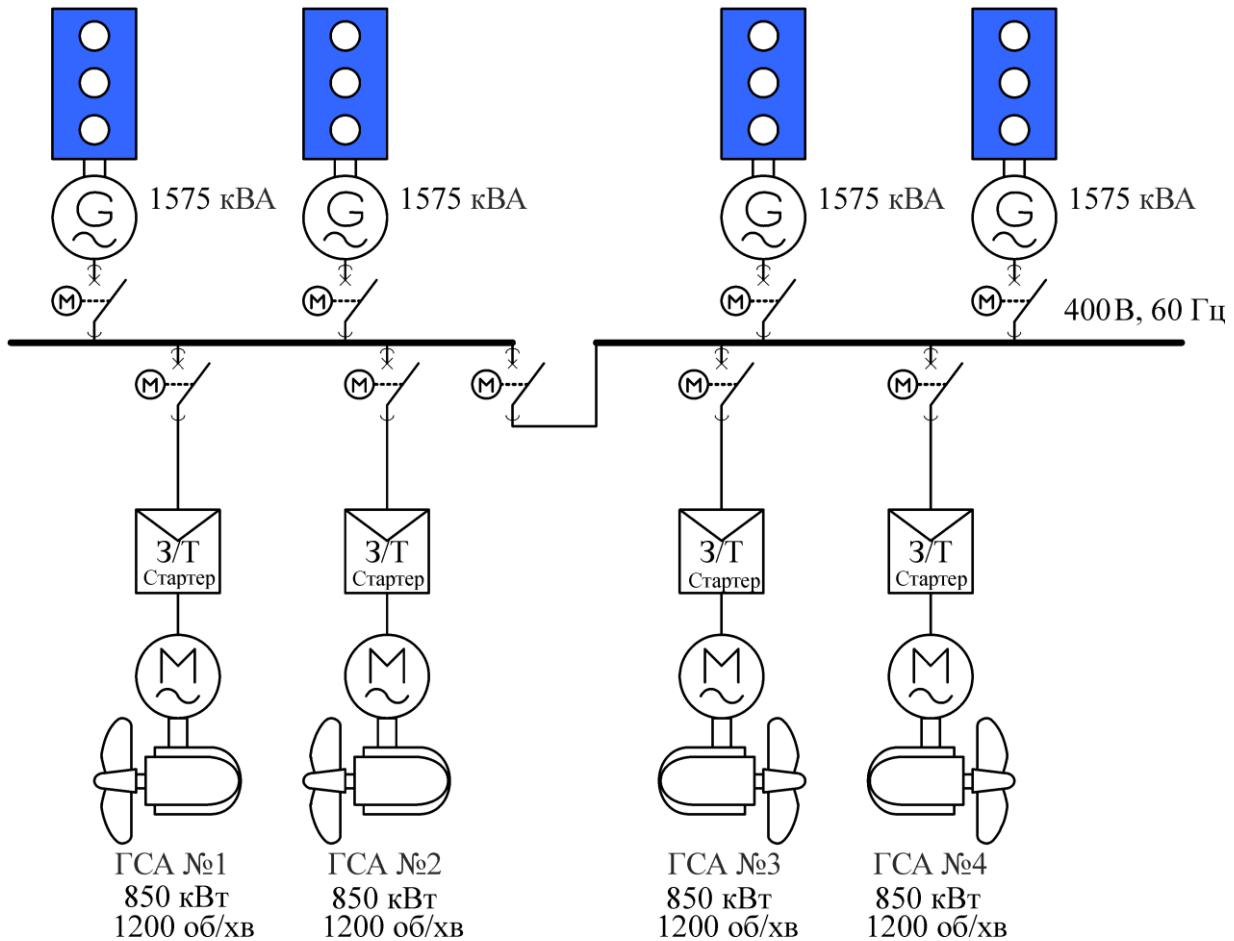


Рис. Б.26 Тактико-технічні характеристики СЕУ **КПК** пасажирського парому (англ. *Roll-on/Roll-off ships – RO-RO*): ГСА – головний силовий агрегат

Б.1. Тактико-технічні характеристики судна типу *Supply Vessel*

Converted by Total Image Converter - (no stamps are applied by registered version)

MS Stril Explorer



76.4 m Multi Purpose Support Vessel – MS Stril Explorer.
Delivery in 2010 by West Contractors AS, Шленсвег, Norway
as yard no. 33 to MR Subsea II AS, Norway. The design is by
Multi Maritime, Førde, Norway.

Principal particulars

Length o.a.:	76.40 m
Length p.p.:	69.80 m
Breadth mid:	16.20 m
Depth to main deck:	4.45 m
Gross tonnage:	3657 GRT
Speed:	13 knots
Class:	DNV +1A1, General cargo carrier, EO, HELDKS, DYNPOS&AUTR

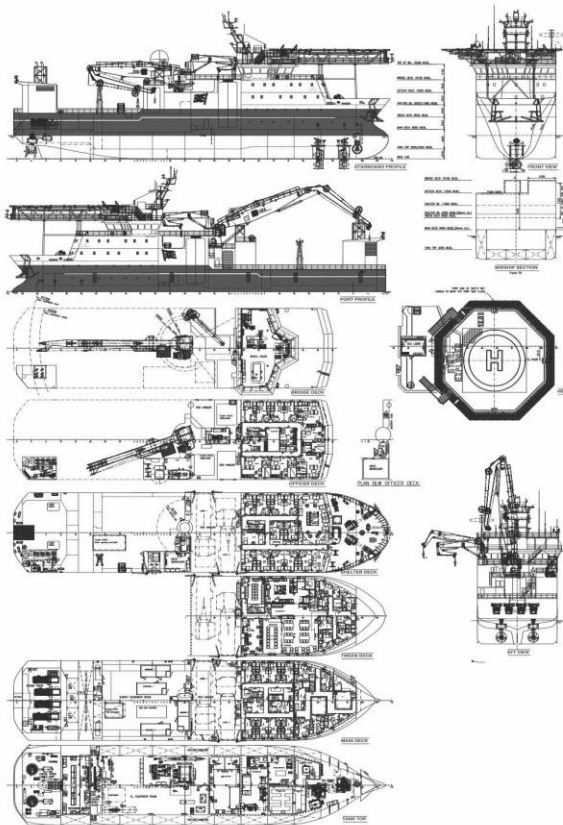
Contact:

West Contractors AS
NO-5582 Шленсвег, Norway
Tel: +47 53 77 50 00
Fax: +47 53 77 50 01
E-mail: westcon@westcon.no
www.westcon.no

This document is the sole property of West Contractors AS. All information is proprietary information and is not to be used for any purpose other than the purpose for which it is given to you, without the written consent of West Contractors AS

Vessel information

MV Stril Explorer

**Dieselelectric Propulsion system**

Main Engines: 4xCaterpillar 3516B 1600 kW
 Propeller system: 2 pcs Schottel STP 1010 1200 kW/347 RPM
 Shaft generators: Rolls Royce (SES) Marelli
 Main generators: 4x1600 kW
 Main Generators: 4 x Marelli MJR 450 LB4
 Electric motor: 5 x Marelli B5J 500 LA6
 Sidethrusters: 1 x Brunvoll
 Azimuth thruster: 2 x Schottel SRP 550
 Emergency diesel generator: Caterpillar C9

Azimuth propeller

Make: Schottel SRP 550 800 kW / 325 RPM
 Make: Brunvoll FU-63-LTC 800 kW /1750 RPM

Electronical equipment

Radar 10 cm: JMA-5332-12 SA S-Band
 Radar 3 cm: JMA-5312-6XA X-Band
 ECDIS: 2 x JRC-JAN-2000 ECDIS
 Autopilot: Simrad AP-50
 Gyrocompass: 3 x SGB Meridian Standard SR01-02
 Speed log: JRC JLN-205 Colour Echosounder
 Dyn Pos System: Kongsberg K-Pos 2
 Radar Transponder: Jotron, Tron SART
 Echo Sounder: Furuno FE 700
 Sat Phone/fax: Telenor V-Sat 4996
 PA System: Zenitel type ACM
 AIS: JRC JHS-182
 GPS: 2 x MX-500
 VDR: JRC JCY-1800 VDR
 Sound reception sys.: VSS Sound signal reception system
 VHF: JRC JHS-770S Simplex VHF
 JRC JHS-780D Duplex VHF

Radio plant:

Motorola GM360
 2 x McMurdo Sart S4 GMDSS
 MF/HF: FS-1570
 VHF/DSC: FM-8800S
 Inmarsatt C
 JRC JSX-9B/JRC NCR-333
 NX700B

Weather faximile:**Navtex receiver:****Ship systems**

Fuel oil separators: 2 x Alfa Laval
 Oily water separator: Ocean Clean EB 2,5
 Vent./AC-arrangement: Aeron AS
 Watermist plant: Marioff
 Main alarm system: Vassnes e-SEAMatic
 Mob boat: Noreq RRB 525
 Liferafts: 6 x Viking 35 persons
 Searchlights: Tranberg 2000 W
 Fire alarm: Tyco
 Switchboard: 690 V, 230 V Rolls-Royce (SES)
 ROV-Switch: 440 V

Capacities

Fuel oil: 620 m3
 Fresh water: 124 m3
 Water Ballast: 1400 m3
 Accommodation: 70 persons
 Deck area: 460 m2
 Deck load: 3450 tonnes

Deck equipment

Deck Crane: TTS 1 x GPCKO 2000-60-32
 TTS 1 x GPK 260-10-12
 Anchor windlass: Rapp Hydema

Converted by Total Image Converter - (no stamps are applied by registered version)

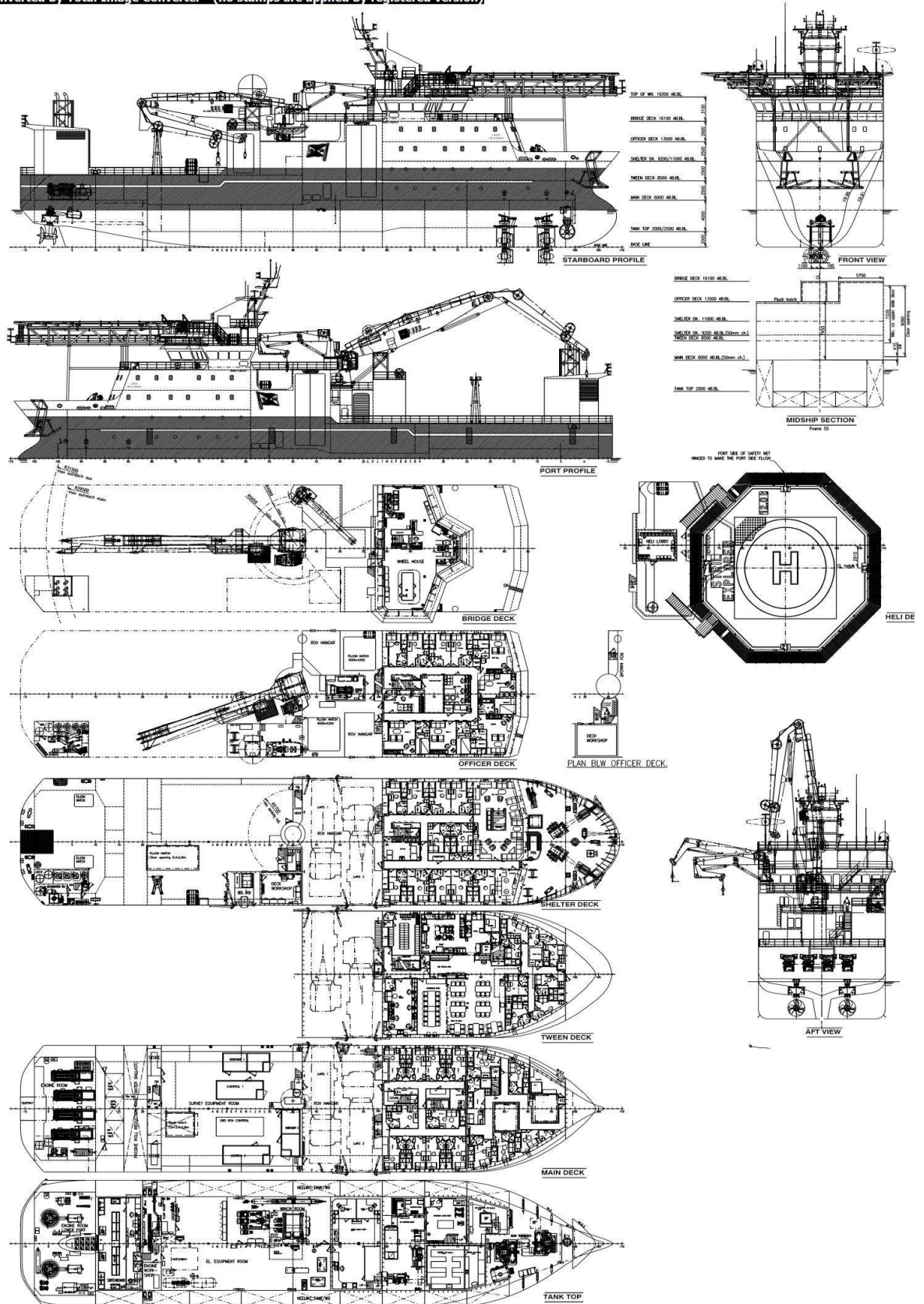


Рис. Б.27 Основні розміри судна типу *Supply Vessel*.

Б.2. Тактико-технічні характеристики бурового судна типу *Saipem 10000*

West Capella

For further information contact:

Marketing - Contract

Tel: +4751309000

E-mail: marketing@seadrill.com

Web: www.seadrill.com

(metric)

**GENERAL**

Built	Q4 - 2008
Hull ID	-
Major Upgrades	-
Design	Samsung Design
Previous names	-
Flag	Panama
Classification Agency	ABS
Dimensions	228 x 42 m
Operating Draft	12.05 m
Transit draft	12,05 m
VDL - Operating	18,000 mt
VDL - Survival	15,000 mt
VDL - Transit	17,000 mt
Transit speed	11.5 kn
Outfitted Max WD	3050 m
Min WD	
Usable Deck Space	
Max Drilling Depth	11430
Max Combined Load	
Quarters	180
Helideck Capacity	Chinook
Helideck Certification	

DRILLING PACKAGE

Derrick	Dobbel Derrick
Racking Capacity	13700 m
Drawworks	NOV, 4220 kW
Rotary Table	1.54 m (60.5")
Top Drive	NOV Hydralift, HPS 1000, 106350 Nm

MUD SYSTEM

Pressure Rating	517 bar
Pumps	4 ea 1620 kW
Solids Control	VSM 300 1 X Quadruple
-	1 Dual VSM 300

RISER SYSTEM

Riser tension	
Riser type/ maker	Schaffer 27.4 m (90 ft)
Riser min ID	0.476 m (18 3/4 ")
Kill / Choke lines min ID	0.114 m (4.5")
Kill / Choke lines rating	1034 bar

CAPACITIES

Diesel	5818 cu m
Drillwater	
Potable Water	2800 cu m
Bulk Product	295 cu m
Sack Storage	7000 sx
Base Oil	
Brine	500 cu m
Liquid Mud	960 cu m
Mudpits (excl slug/mix)	14

WELL CONTROL

Diverter	1.49 m (59"), 1M
BOP	1 ea Shaffer 0.48 m (18 s")
-	6 cavities, Vetco H 4 Connector
C&K Manifold	15M

POWER

Main Engines	6 Wartsila
Auxiliary Engine	N/A
Total Power	6 ea 7 MW
Main Generators	6 ea 11kv 7 MW, 6000KVA
Emergency Power	1 ea 1500kW

STATION KEEPING

DP class	DP3
DP control system	Simrad SDPM 32
Mooring lines	-
Mooring winches	-
Thrusters	Rolls Royce 60 mt

TUBULARS

Drillpipe	9144 m 5 7/8" XT57, NS-1
-	505 m 5 S" HWDP, 505 m 3 S"

CRANES

Pedestal Cranes	4 ea Knuckle Boom
API SWL	85T
BOP Crane	2X175
Riser Gantry Crane	NA



West Capella

For further information contact:

Marketing - Contract

Tel: +4751309000

E-mail: marketing@seadrill.com

Web: www.seadrill.com



(imperial)

GENERAL

Built	Q4 - 2008
Hull ID	-
Major Upgrades	-
Design	Saipem 10000
Previous names	-
Flag	Panama
Classification Agency	ABS
Dimensions	748 x 138 ft
Operating Draft	47.5 ft
Transit draft	47.5 ft
VDL - Operating	20000 st
VDL - Survival	16500 st
VDL - Transit	18700 mt
Transit speed	11.5 kn
Outfitted Max WD	10000 ft
Min WD	
Usable Deck Space	
Max Drilling Depth	37500 ft
Max Combined Load	
Quarters	180
Helideck Capacity	Chinook
Helideck Certification	

DRILLING PACKAGE

Derrick	Dobbel Derrick
Racking Capacity	44950 ft
Drawworks	NOV, 5750Hp
Rotary Table	60.5"
Top Drive	NOV Hydralift, HPS 1000 78450ftlb

MUD SYSTEM

Pressure Rating	7,500 psi
Pumps	4 ea 2200 hp
Solids Control	VSM 300 1 X Quadruple
-	1 Dual VSM 300

RISER SYSTEM

Riser tension	3200 kips
Riser type/ maker	90ft, Shaffer
Riser min ID	18 3/4 "
Kill / Choke lines min ID	4.5"
Kill / Choke lines rating	15000 psi

CAPACITIES

Diesel	36600 bbls
Drillwater	17600 bbls
Potable Water	4750 bbls
Bulk Product	32460 cu ft
Sack Storage	7000 sx
Base Oil	bbls
Brine	3145 bbls
Liquid Mud	6040 bbls
Mudpits (excl slug/mix)	14

WELL CONTROL

Diverter	59", 1M
BOP	1 ea Shaffer 18 3/4
-	6 cavities, Vetco H 4 Connector
C&K Manifold	15 Kpsi

POWER

Main Engines	6 Wartsila
Auxiliary Engine	N/A
Total Power	6 ea 9400 hp
Main Generators	6 ea 11kv, 6000KVA
Emergency Power	1 ea 2040 hp

STATION KEEPING

DP class	DP3
DP control system	Simrad SDPM 32
Mooring lines	-
Mooring winches	-
Thrusters	Rolls Royce 66 st

TUBULARS

Drillpipe	30000ft 5 7/8" XT57, NS-1
-	1659ft 5 S" HWDP, 1659ft 3 S"

CRANES

Pedestal Cranes	4 ea Knuckle Boom
API SWL	93 st
BOP Crane	2X 193 st
Riser Gantry Crane	NA

Б.3. Схемні та конструктивні рішення комбінованих (гібридних) пропульсивних комплексів

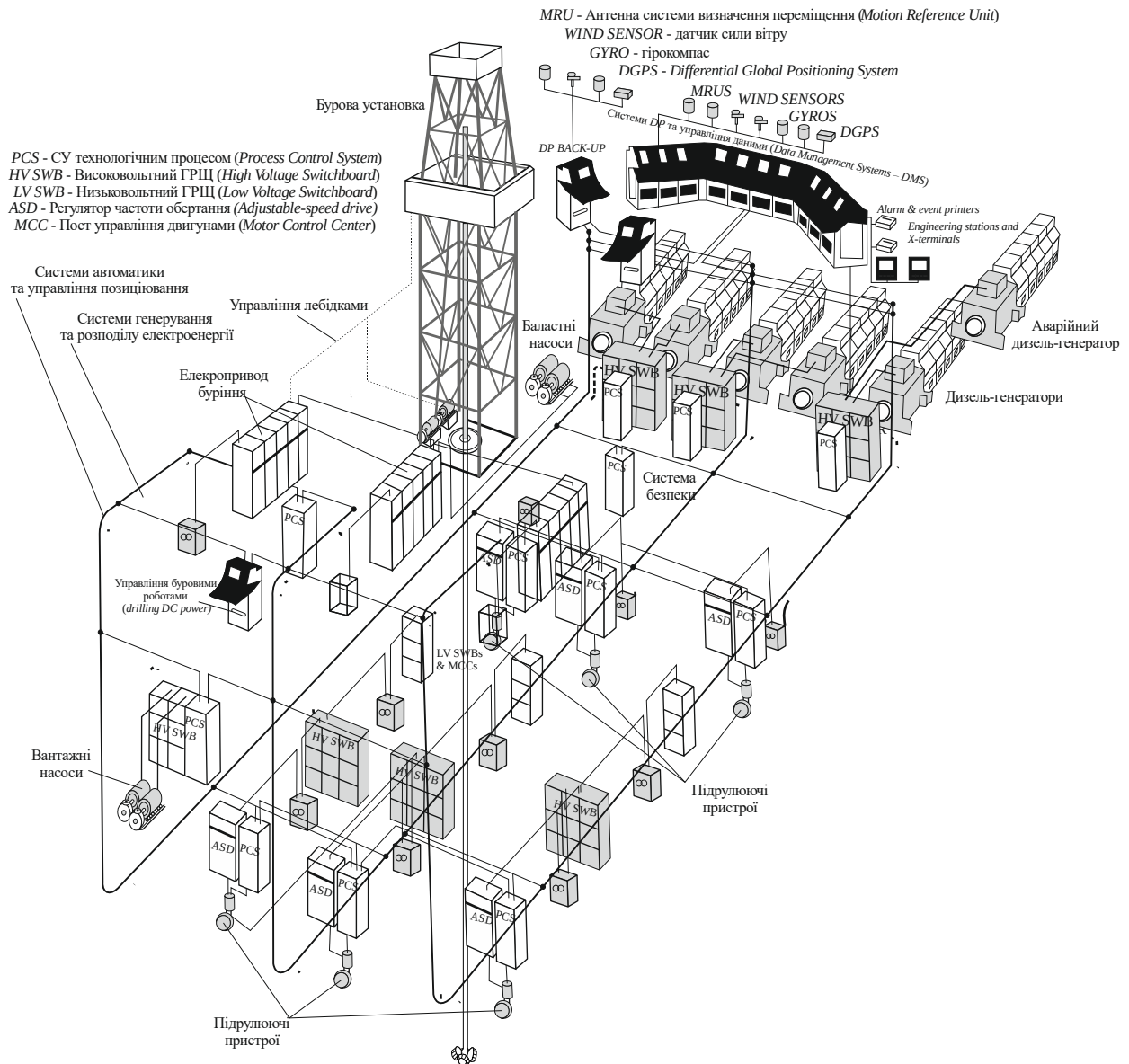


Рис. Б.28 Структурна схема суднової енергетичної установки комбінованого пропульсивного комплексу бурового судна

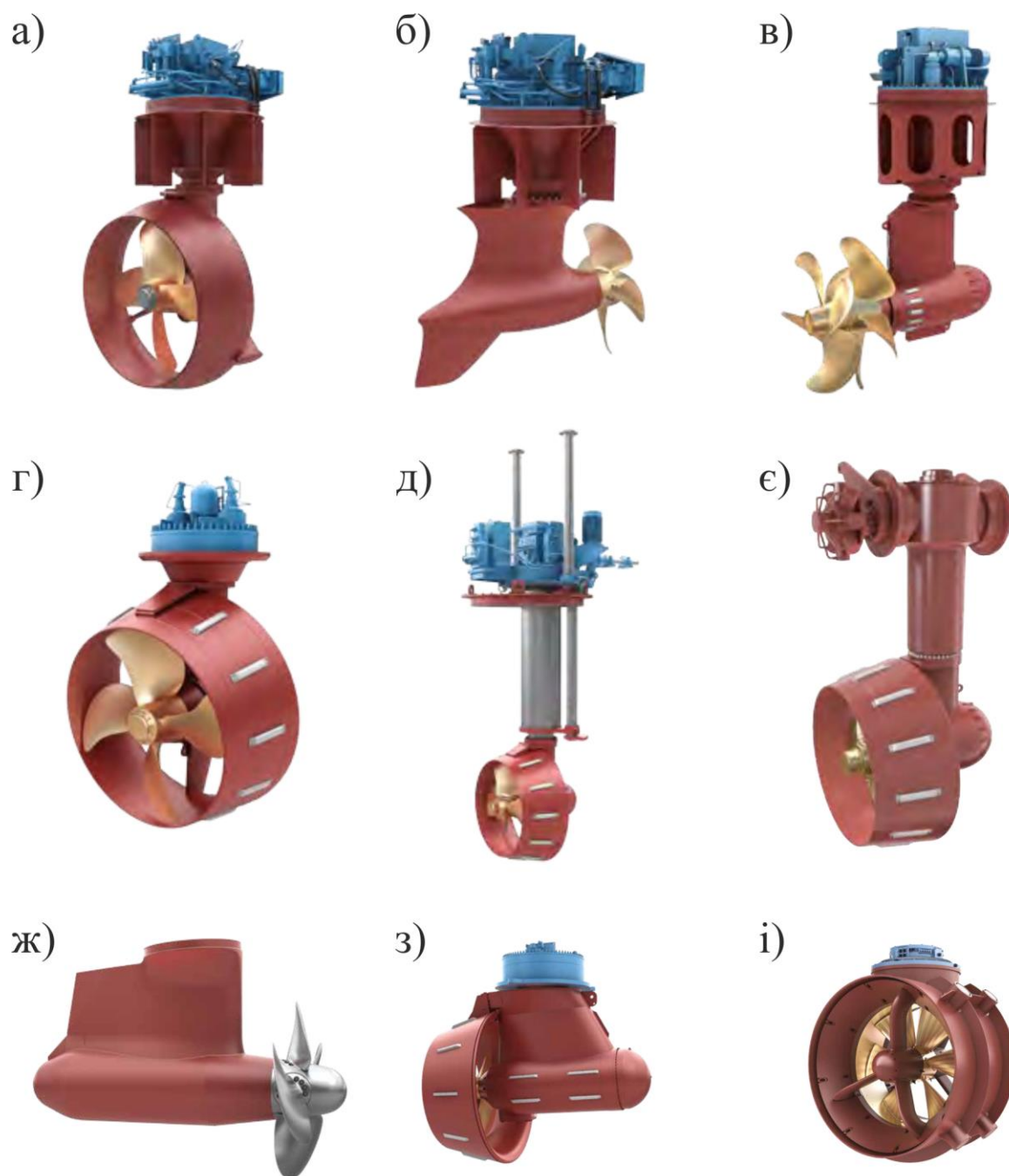


Рис. Б.29 Основні типи АГРК : а) стандартні модулі *Z-Drive* потужністю 250 ÷ 3700 кВт; б) модулі *Azipul* потужністю 900 ÷ 5000 кВт; в) модулі *Contaz®* потужністю 2200 ÷ 3700 кВт; г) стандартні модулі *L-Drive* потужністю 3000 ÷ 6500 кВт; д) моделі *UL/ULE* потужністю 580 ÷ 3800 кВт; е) модель типу *Swing-UP* потужністю 736 ÷ 2000 кВт; ж) модель типу *ICE/HICE* льодового класу потужністю 4000 ÷ 18000 кВт; з) модель типу *PUSH* потужністю 4000 ÷ 12000 кВт для суден, працюючих на малих швидкостях; і) модель типу *TT-PM* потужністю 1000 і 1600 кВт.

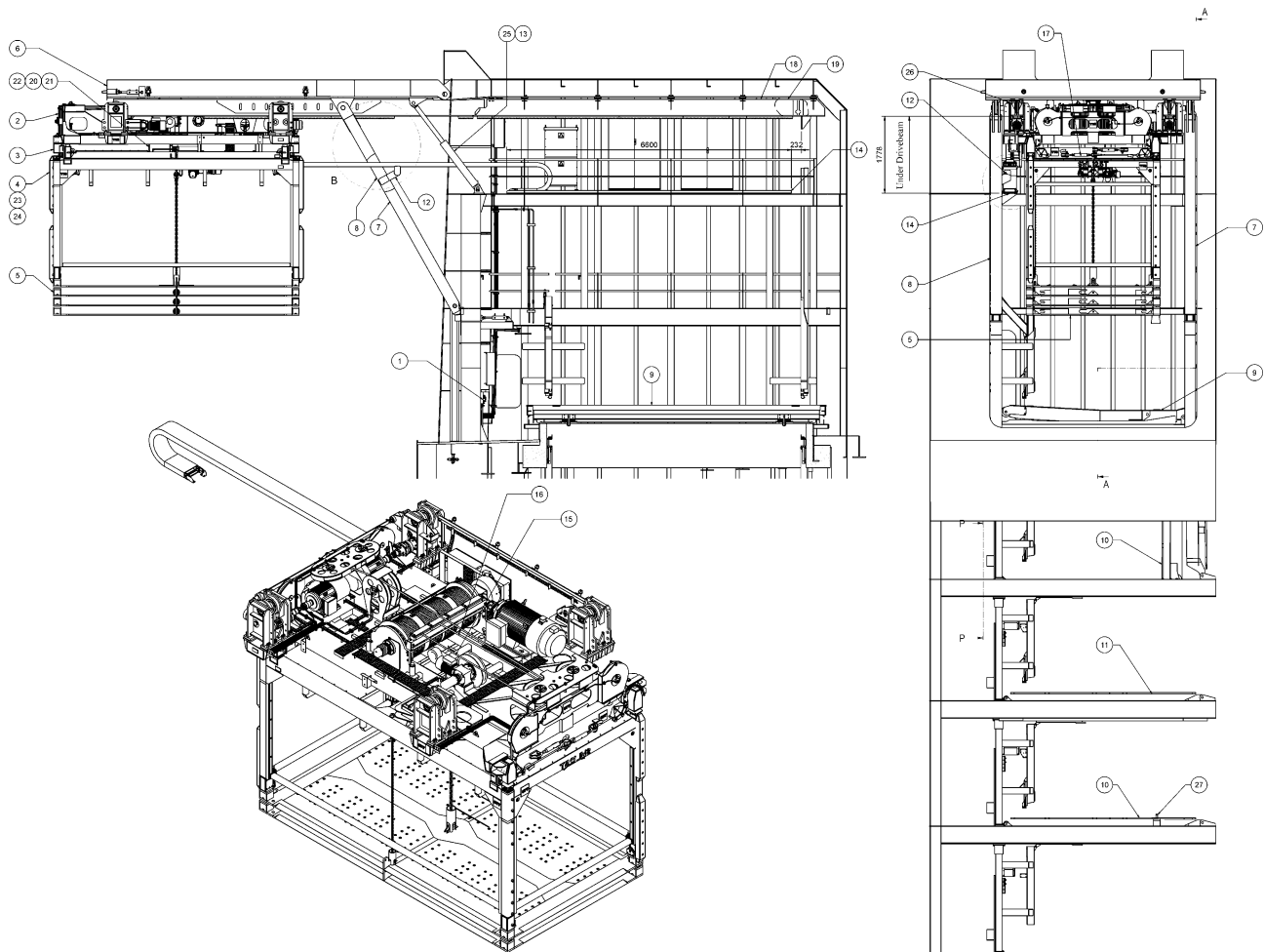


Рис. Б.30 Вантажно-розвантажувальна система судна із КПК: 1 – установка гідравлічна; 2 – металева змонтована конструкція візка; 3 – металева змонтована конструкція розподільника; 4 – клітка; 5 – додаткова нижня пластина; 6 – 8 – бокові двері; 9 – кришка люка верхньої палуби; 10 – кришка люка другої/четвертої палуби; 11 – кришка люка третьої палуби; 12 – кабель мережі підтримки лівосторонньої збірки; 13 – кронштейн циліндра на палубі; 14 – лоток для кабельного ланцюга; 15, 16 – трос; 17 – фаркоп; 18, 19 – лівий та правий привід візка, відповідно; 20 – живлячий кабель; 21 – кронштейн кріплення кабелю; 22 – кабельні хомути; 23 – надпотужний роз'єм; 24 – кабельний ввід; 25 – гідравлічний циліндр; 26 – упор для датчика; 27 – вісь; 28 – пластина блокування внутрішньої позиції візка; 29 – 31 – шайба кріплення приводу *Drivebeam*; 32 – шайба; 33 – шестигранна самоконтр. гайка; 34 – гвинт головки блоку циліндрів.

Додаток В. Приклади файлів комп'ютерних моделей елементів суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів

В.1. *m*-файл ідентифікації параметрів судна типу *Supply Vessel*, що знаходиться у режимі динамічного позиціонування.

function xDP = supply_vessel(x,Ttau)
 % функція xDP = supply_vessel(x,Ttau) повертає похідну швидкості за часом $xDP = E \cdot Ttau + F \cdot x$ вектору стану: $x = [us \ vs \ rs \ xs \ ys \ psi]'$ для Supply Vessel довжиною $ls = 76$ м.

% Модель для нульової швидкості (DP).

% us = швидкість повздовжнього переміщення, м/с

% vs = швидкість бокового переміщення, м/с

% rs = швидкість нишпорення, рад/с

% xs = позиція у x-напрямку, м

% ys = позиція у y-напрямку, м

% psi = кут нишпорення, рад

% Ttau = [X, Y, N]' вектор упору/моменту

% Параметри судна

ls = 76.4; % довжина судна, м

gs = 9.8; % прискорення сили тяжіння, м/с²

ms = 3657e3; % маса, кг

Ts = diag([1 1 1 1 ls]);

Tsinv = diag([1 1 1 1 1/ls]);

% Матриці моделі

Kmod = [1.1323 0 0 0 0

0 0 0 1.9101 -0.0751

0 0 0 -0.0567 0.1312];

Cmod = [0.0401 0 0 0 0

```

0 0 0 0.1211 -0.0131
0 0 0 -0.0038 0.0312];
% Перевірка вхідних і початкових розмірів
if (length(x) ~= 6),error('x-вектор повинен мати розмірність 6 !');end
if (length(Ttau) ~= 3),error('u-вектор повинен мати розмірність 3 !');end
Ks = (ms*Tsinv^2)*(Ts*Kmod*Tsinv);
Cs = (ms*Tsinv^2)*(sqrt(gs/l_s)*Ts*Cmod*Tsinv);
F = [ zeros(3,3) eye(3)
      zeros(3,3) -inv(Ks)*Cs ];
E = [zeros(3,3); inv(Ks) ];
% Визначення похідної стану
xDP = E*Ttau + F*x;

```

В.2. *m*-файл ідентифікації параметрів бурового судна, що знаходиться у режимі динамічного позиціонування

```

function xDP = drilling_vessel(x,Ttau)
% функція xDP = drilling_vessel(x,Ttau) повертає похідну швидкості за
часом xDP = E*Ttau + F*x вектору стану: x = [us vs rs xs ys psi]' для Drilling
Vessel довжиною l_s = 126 м.

```

```

% Модель для нульової швидкості (DP).
% us = швидкість повздовжнього переміщення, м/с
% vs = швидкість бокового переміщення, м/с
% rs = швидкість нишпорення, рад/с
% xs = позиція у x-напрямку, м
% ys = позиція у y-напрямку, м
% psi = кут нишпорення, рад
% Ttau = [X, Y, N]' вектор упору/моменту

```

[До змісту](#)

```

% Параметри судна
ls = 126; % довжина судна, м
gs = 9.8; % прискорення сили тяжіння, м/с2
ms = 8456e3; % маса, кг
Ts = diag([1 1 1 1 ls]);
Tsinv = diag([1 1 1 1 1/ls]);
% Матриці моделі
Kmod = [1.1567 0 0 0 0
0 0 0 1.9203 -0.0345
0 0 0 -0.0678 0.1423];
Cmod = [0.0602 0 0 0 0
0 0 0 0.1345 -0.0145
0 0 0 -0.0067 0.0425];
% Перевірка вхідних і початкових розмірів
if (length(x) ~= 6),error('x-вектор повинен мати розмірність 6 !');end
if (length(Ttau) ~= 3),error('u-вектор повинен мати розмірність 3 !');end
Ks = (ms*Tsinv^2)*(Ts*Kmod*Tsinv);
Cs = (ms*Tsinv^2)*(sqrt(gs/ls)*Ts*Cmod*Tsinv);
F = [ zeros(4,2) eye(3)
zeros(4,2) -inv(Ks)*Cs ];
E = [zeros(4,2); inv(Ks) ];
% Визначення похідної стану
xDP = E*Ttau + F*x;

```

В.3. *m*-файл ідентифікації параметрів багатоцільового судна, що знаходиться у режимі динамічного позиціонування

```
function [xdot,U] = DSRV(in)
```

% $[\dot{x}, U] = \text{DSRV}(\text{in})$, with $\text{in}=[x, u_i]$ повертає похідну швидкості за часом U у m/s у часі вектору стану $x = [w \ q \ x \ z \ \theta]'$ для % офшорного судна (DSRV) $L = 5,0$ м, де

% w = швидкість руху, m/s

% q = кут переміщення, рад/с

% x = x -позиція, м

% z = z -позиція, позитивне поглиблення, м

% θ = кут (рад)

% Вхідні дані:

% u_i = δ (rad), де дельта – зміна руху корми

% U_0 = номінальна швидкість переміщення (якщо потрібно). За замовченням $U_0 = 4.11 \text{ м/с} = 0$ вузлів.

% Перевірка вхідних і початкових розмірів

$x = \text{in}(1:5);$

$u_i = \text{in}(6);$

if (length(x) ~= 5),error('x- вектор повинен мати розмірність 5 !'); end

if (length(u_i) ~= 1),error('u- вектор повинен мати розмірність 1 !'); end

% Швидкість (m/s)

$U_0 = 4.11;$ % $U_0 = 4.11 \text{ m/s} = 8 \text{ knots} = 13.5 \text{ ft/s}$

$W_0 = 0;$

% Нормалізація змінних

$L = 5.0;$

$U = \text{sqrt}(U_0^2 + (W_0 + x(1))^2);$

% стани та входи (з розміром)

$\delta = u_i;$

$w = x(1);$

$q = x(2);$

$\theta = x(5);$

```

% Параметри, похідні гідродинаміки та основні розміри
delta_max = 30;
% максимальний кут плоского кута (deg)
Iy = 0.001925;
m = 0.036391;
Mqdot = -0.001573; Zqdot = -0.000130;
Mwdot = -0.000146; Zwdot = -0.031545;
Mq = -0.01131; Zq = -0.017455;
Mw = 0.011175; Zw = -0.043938;
Mtheta = -0.156276/U^2;
Mdelta = -0.012797; Zdelta = 0.027695;
% Маса і моменти інерції
m11 = m - Zwdot;
m12 = -Zqdot;
m22 = Iy - Mqdot;
m21 = -Mwdot;
detM = (m11*m22 - m12*m21);
% Обмеження керма
if abs(delta) >= delta_max*pi/180,
    delta = sign(delta)*delta_max*pi/180;
end
% Сили та моменти
Z = Zq*q + Zw*w + Zdelta*delta;
M = Mq*q + Mw*w + Mtheta*theta + Mdelta*delta;
% Головні похідні (з розміром)
xdot = [ (m22*Z - m12*M)/detM
        (-m21*Z + m11*M)/detM
        cos(theta)*U0 + sin(theta)*w
        -sin(theta)*U0 + cos(theta)*w
        q
        ];

```

В.4. *m*-файл ідентифікації параметрів нафтової платформи

```

function [xdot,U] = npsauv(x,ui)
% [xdot,U] = NPSAUV(x,ui) повертає швидкість U в м/с та
% у часі часі вектору стану: x = [ u v w p q r x y z phi theta psi ]' для
% автономної нафтової платформи (AUV).
% Довжина L = 150.3 м:
% u    = швидкість крену, м/с
% v    = швидкість деференту, м/с
% w    = швидкість руху, м/с
% p    = швидкість розгойдування, рад/с
% q    = швидкість зміни кроку, рад/с
% r    = швидкість нишпорення, рад/с
% xpos = позиція у x-напрямку, м
% ypos = позиція у y-напрямку, м
% zpos = position in z-direction (m)
% phi  = кут хитавиці, рад
% theta = кут кроку, рад
% psi  = кут нишпорення, рад
% Вхідний вектор:
%% ui    = [ delta_r delta_s delta_b delta_bp delta_bs n ]' where
%% delta_r = кут керма, рад
% delta_s = розворот керма праворуч ліворуч, рад
% delta_b = переміщення гвинта вниз догори, рад
% delta_bp = поворот ПП ліворуч, рад
% delta_bs = поворот ПП праворуч, рад
% n      = частота обертання гвинта, об/хвил
% Перевірка початкових значень та перерахунок величин
if (length(x) ~= 12),error('x-вектор має дорівнювати 12 !');end
До змісту

```



```

if (length(ui) ~= 6),error('u-вектор має дорівнювати 6 !');end

% Головні вхідні дані
u = x(1); v = x(2); w = x(3);
p = x(4); q = x(5); r = x(6);
phi = x(10); theta = x(11); psi = x(12);
U = sqrt(u^2+v^2+w^2); % швидкість

% Кермо та гвинти
max_ui(1) = 20*pi/180; % максимальне значення delta_r (рад)
max_ui(2) = 20*pi/180; % максимальне значення delta_s (рад)
max_ui(3) = 20*pi/180; % максимальне значення delta_b (рад)
max_ui(4) = 20*pi/180; % максимальне значення delta_bp (рад)
max_ui(5) = 20*pi/180; % максимальне значення delta_bs (рад)
max_ui(6) = 1500; % максимальне значення n (об/хвил)

% Параметри, похідні гідродинаміки та основні розміри
c1 = cos(phi);
c2 = cos(theta);
c3 = cos(psi);
s1 = sin(phi);
s2 = sin(theta);
s3 = sin(psi);
t2 = tan(theta);
L = 5.3; g = 9.8;
xG = 0; yG = 0; zG = 0.061;
xB = 0; yB = 0; zB = 0;
rho = 1000; m = 5454.54/(rho/2*L^3);
W = 53400; B = 53400;
Ix = 2038; Iy = 13587; Iz = 13587;
Ixy = -13.58; Iyz = -13.58; Ixz = -13.58;
Cdy = 0.5; Cdz = 0.6;

```

$$C_y = 0; \quad C_z = 0;$$

$$C_m = 0; \quad C_n = 0;$$

$$r_2 = \rho \cdot L^2/2;$$

$$r_3 = \rho \cdot L^3/2;$$

$$r_4 = \rho \cdot L^4/2;$$

$$r_5 = \rho \cdot L^5/2;$$

$$X_{pp} = 7.0e-3; X_{qq} = -1.5e-2; X_{rr} = 4.0e-3; X_{pr} = 7.5e-4;$$

$$X_{\dot{u}} = -7.6e-3; X_{wq} = -2.0e-1; X_{vp} = -3.0e-3; X_{vr} = 2.0e-2;$$

$$X_{qds} = 2.5e-2; X_{qdb2} = -1.3e-3; X_{rdr} = -1.0e-3; X_{vv} = 5.3e-2;$$

$$X_{ww} = 1.7e-1; X_{vdr} = 1.7e-3; X_{wds} = 4.6e-2; X_{wdb2} = 0.5e-2;$$

$$X_{dsds} = -1.0e-2; X_{dbdb2} = -4.0e-3; X_{drdr} = -1.0e-2; X_{qdsn} = 2.0e-3;$$

$$X_{wdsn} = 3.5e-3; X_{dsdsn} = -1.6e-3;$$

$$Y_{\dot{p}} = 1.2e-4; Y_{\dot{r}} = 1.2e-3; Y_{pq} = 4.0e-3; Y_{qr} = -6.5e-3;$$

$$Y_{\dot{v}} = -5.5e-2; Y_p = 3.0e-3; Y_r = 3.0e-2; Y_{vq} = 2.4e-2;$$

$$Y_{wp} = 2.3e-1; Y_{wr} = -1.9e-2; Y_v = -1.0e-1; Y_{vw} = 6.8e-2;$$

$$Y_{dr} = 2.7e-2;$$

$$Z_{\dot{q}} = -6.8e-3; Z_{pp} = 1.3e-4; Z_{pr} = 6.7e-3; Z_{rr} = -7.4e-3;$$

$$Z_{\dot{w}} = -2.4e-1; Z_q = -1.4e-1; Z_{vp} = -4.8e-2; Z_{vr} = 4.5e-2;$$

$$Z_w = -3.0e-1; Z_{vv} = -6.8e-2; Z_{ds} = -7.3e-2; Z_{db2} = -1.3e-2;$$

$$Z_{qn} = -2.9e-3; Z_{wn} = -5.1e-3; Z_{dsn} = -1.0e-2;$$

$$K_{\dot{p}} = -1.0e-3; K_{\dot{r}} = -3.4e-5; K_{pq} = -6.9e-5; K_{qr} = 1.7e-2;$$

$$K_{\dot{v}} = 1.2e-4; K_p = -1.1e-2; K_r = -8.4e-4; K_{vq} = -5.1e-3;$$

$$K_{wp} = -1.3e-4; K_{wr} = 1.4e-2; K_v = 3.1e-3; K_{vw} = -1.9e-1;$$

$$K_{db2} = 0; \quad K_{pn} = -5.7e-4; K_{prop} = 0;$$

$$M_{\dot{q}} = -1.7e-2; M_{pp} = 5.3e-5; M_{pr} = 5.0e-3; M_{rr} = 2.9e-3;$$

$$M_{\dot{w}} = -6.8e-3; M_{uq} = -6.8e-2; M_{vp} = 1.2e-3; M_{vr} = 1.7e-2;$$

$$M_{uw} = 1.0e-1; M_{vv} = -2.6e-2; M_{ds} = -4.1e-2; M_{db2} = 3.5e-3;$$

$$M_{qn} = -1.6e-3; M_{wn} = -2.9e-3; M_{dsn} = -5.2e-3;$$

$$N_{\dot{p}} = -3.4e-5; N_{\dot{r}} = -3.4e-3; N_{pq} = -2.1e-2; N_{qr} = 2.7e-3;$$

[До змісту](#)

```

Nvdot = 1.2e-3; Np   = -8.4e-4; Nr   = -1.6e-2; Nvq  = -1.0e-2;
Nwp  = -1.7e-2; Nwr  = 7.4e-3; Nv   = -7.4e-3; Nvw  = -2.7e-2;
Ndr  = -1.3e-2; Nprop = 0;
% Руль і обмеження частоти обертання для
for i=1:1:6,
    if abs(ui(i))>max_ui(i),ui(i)=sign(ui(i))*max_ui(i);end
end
% Контрольний ввід (руль і гвинт)
delta_r = ui(1);
delta_s = ui(2);
delta_b = ui(3);
delta_bp = ui(4);
delta_bs = ui(5);
n       = ui(6)/60*2*pi;
Cd0     = 0.00385;
prop    = 0.012*n/u;
Xprop   = Cd0*(abs(prop)*prop - 1);
Ct      = 0.008*L^2*abs(prop)*prop/2;
Ct1     = 0.008*L^2/2;
epsi    = -1 + sign(n)/sign(u)*(sqrt(Ct+1)-1)/(sqrt(Ct1+1)-1);
tau1    = r3*(Xrdr*u*r*delta_r + (Xqds*delta_s + Xqdb2*delta_bp + ...
    Xqdb2*delta_bs)*u*q) + ...
    r2*(Xvdr*u*v*delta_r + (Xwds*delta_s + Xwdb2*delta_bs + ...
    Xwdb2*delta_bp)*u*w + (Xdsds*delta_s^2 + ...
    Xdbdb2*delta_b^2 + Xdrdr*delta_r^2)*u^2) + ...
    r3*Xqdsn*u*q*delta_s*epsi + r2*(Xwdsn*u*w*delta_s + ...
    Xdsdsn*u^2*delta_s^2)*epsi + r2*u^2*Xprop;
tau2    = r2*Ydr*u^2*delta_r;
tau3    = r2*u^2*(Zds*delta_s+Zdb2*delta_bs+Zdb2*delta_bp) + ...
    r3*Zqn*u*q*epsi+r2*(Zwn*u*w+Zdsn*u^2*delta_s)*epsi;

```

```

tau4 = r4*Kpn*u*p*epsi+r3*u^3*Kprop + ...
      r3*u^2*(Kdb2*delta_bp+Kdb2*delta_bs);
tau5 = r4*Mqn*u*q*epsi+r3*(Mwn*w*n+Mdsn*u^2*delta_s)*epsi+...
      r3*u^2*(Mds*delta_s+Mdb2*delta_bp+Mdb2*delta_bs);
tau6 = r3*u^2*Nprop + r3*u^2*Ndr*delta_r;
% Перерахунок сил та моменти, що діють на корпус
dxL = L/10;
xL = 0;
Ucf = sqrt((v+xL*r)^2+(w-xL*q)^2);
if ~(Ucf == 0),
    for xL = 0:dxL:L
        Ucf = sqrt((v+xL*r)^2+(w-xL*q)^2);
        temp = (0.5*0.6*(v+xL*r)^2+0.6*(w-xL*q)^2)*(v+xL*r)/Ucf;
        Cy = Cy + dxL*temp;
    end
    for xL = 0:dxL:L
        Ucf = sqrt((v+xL*r)^2+(w-xL*q)^2);
        temp = (0.5*0.6*(v+xL*r)^2+0.6*(w-xL*q)^2)*(w-xL*q)/Ucf;
        Cz = Cz + dxL*temp;
    end
    for xL = 0:dxL:L
        Ucf = sqrt((v+xL*r)^2+(w-xL*q)^2);
        temp = (0.5*0.6*(v+xL*r)^2+0.6*(w-xL*q)^2)*(w+xL*q)/Ucf*xL;
        Cm = Cm + dxL*temp;
    end
    for xL = 0:dxL:L
        Ucf = sqrt((v+xL*r)^2+(w-xL*q)^2);
        temp = (0.5*0.6*(v+xL*r)^2+0.6*(w-xL*q)^2)*(v+xL*r)/Ucf*xL;
        Cn = Cn + dxL*temp;
    end

```

end

end

% Гідродинамічні сили та моменти

$$X = r3*((m+Xvr)*v*r + (Xwq-m)*w*q + Xvp*v*p) + ...$$

$$r4*((m*xG/L+Xqq)*q^2 + (m*xG/L+Xrr)*r^2 - m*yG/L*p*q + ... \\ (Xpr-m*zG/L)*p*r + Xpp*p^2) + ...$$

$$r2*(Xvv*v^2 + Xww*w^2) - (W - B)*\sin(\theta) + \tau1;$$

$$Y = r2*(Yv*u*v + Yvw*v*w) + ...$$

$$r3*(Yp*u*p + Yr*u*r + Yvq*v*q + Ywp*w*p + Ywr*w*r) + ...$$

$$r4*(Ypq*p*q + Yqr*q*r) + (W-B)*\cos(\theta)*\sin(\phi) - ...$$

$$m*(\rho/2*L^3)*(u*r - w*p + xG*p*q - yG*(p^2+r^2) + zG*q*r) + \tau2 - \\ \rho/2*Cy;$$

$$Z = r2*(Zw*w*u + Zvv*v^2) + ...$$

$$r3*(Zq*u*q + Zvp*v*p + Zvr*v*r) + ...$$

$$r4*(Zpp*p^2 + Zpr*p*r + Zrr*r^2) + ...$$

$$(W-B)*\cos(\theta)*\cos(\phi) - ...$$

$$m*(\rho/2*L^3)*(v*p - u*q + xG*p*r + yG*q*r - zG*(p^2+q^2)) + \tau3 + \\ \rho/2*Cz;$$

$$K = r3*(Kv*u*v + Kvw*v*w) + ...$$

$$r4*(Kp*u*p + Kr*u*r + Kvq*v*q + Kwp*w*p + Kwr*w*r) + ...$$

$$r5*(Kpq*p*q + Kqr*q*r) + ...$$

$$(Iy-Iz)*q*r - Ixy*p*r - (r^2-q^2)*Iyz + Ixz*p*q - ...$$

$$m*(\rho/2*L^3)*(yG*(v*p-u*q) - zG*(u*r - w*p)) + ...$$

$$(yG*W-yB*B)*c1*c2 - (zG*W-zB*B)*c2*s1 + \tau4;$$

$$M = r3*(Muw*u*w + Mvv*v^2) + ...$$

$$r4*(Muq*u*q + Mvp*v*p + Mvr*v*r) + ...$$

$$r5*(Mpp*p^2 + Mpr*p*r + Mrr*r^2) - ...$$

$$(xG*W-xB*B)*c1*c2 - (zG*W-zB*B)*s2 + ...$$

$$(Iz-Ix)*p*r + Ixy*q*r - Iyz*p*q - (p^2-r^2)*Ixz + ...$$

$$m*(\rho/2*L^3)*(xG*(v*p-u*q) - zG*(w*q-v*r)) + \tau5 - \rho/2*Cm;$$

$$N = r^3(N_v*u*v + N_{vw}*v*w)+...$$

$$r^4(N_p*u*p + N_r*u*r + N_{vq}*v*q + N_{wp}*w*p + N_{wr}*w*r)+...$$

$$r^5(N_{pq}*p*q + N_{qr}*q*r) +...$$

$$(xG*W-xB*B)*s_1*c_2 + (yG*W-yB*B)*s_2 + ...$$

$$(I_x-I_y)*p*q + (p^2-q^2)*I_{xy} + I_{yz}*p*r - I_{xz}*q*r -...$$

$$m*(\rho/2*L^3)*(xG*(u*r-w*p) - yG*(w*q-v*r)) + \tau_6 - \rho/2*C_n ;$$

% Розширення вимірюваних головні похідних (xdot = in(M)*f(x), щоб уникнути inv(M) on-line)

$$\begin{aligned} \text{xdot} &= [1.662e-4*X+1.846e-10*Y+1.303e-7*Z+3.726e-9*K-1.132e- \\ &6*M+7.320e-10*N \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &1.846e-10*X+1.052e-4*Y+3.843e-10*Z+9.638e-6*K-3.340e- \\ &9*M+2.368e-6*N \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &1.303e-7*X+3.843e-10*Y+4.315e-5*Z+7.757e-9*K-2.357e- \\ &6*M+1.524e-9*N \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &3.726e-9*X+9.638e-6*Y+7.757e-9*Z+2.431e-4*K-6.742e-8*M- \\ &7.740e-7*N \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &-1.132e-6*X-3.340e-9*Y-2.357e-6*Z-6.742e-8*K+2.049e-5*M- \\ &1.324e-8*N \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &7.320e-10*X+2.368e-6*Y+1.524e-9*Z-7.740e-7*K-1.324e- \\ &8*M+4.838e-5*N \end{aligned}$$

$$c^3*c^2*u + (c^3*s^2*s_1-s^3*c_1)*v + (s^3*s_1+c^3*c_1*s_2)*w$$

$$s^3*c^2*u + (c_1*c^3+s_1*s^2*s_3)*v + (c_1*s^2*s_3-c^3*s_1)*w$$

$$-s^2*u + c^2*s_1*v + c_1*c^2*w$$

$$p + s_1*t^2*q + c_1*t^2*r$$

$$(c_1*q - s_1*r)$$

$$s_1/c^2*q + c_1/c^2*r \quad];$$

Додаток Г. Результати моделювання енергетичних процесів у СЕУ **КПК** на лініях гребних гвинтів методами обчислювальної гідродинаміки

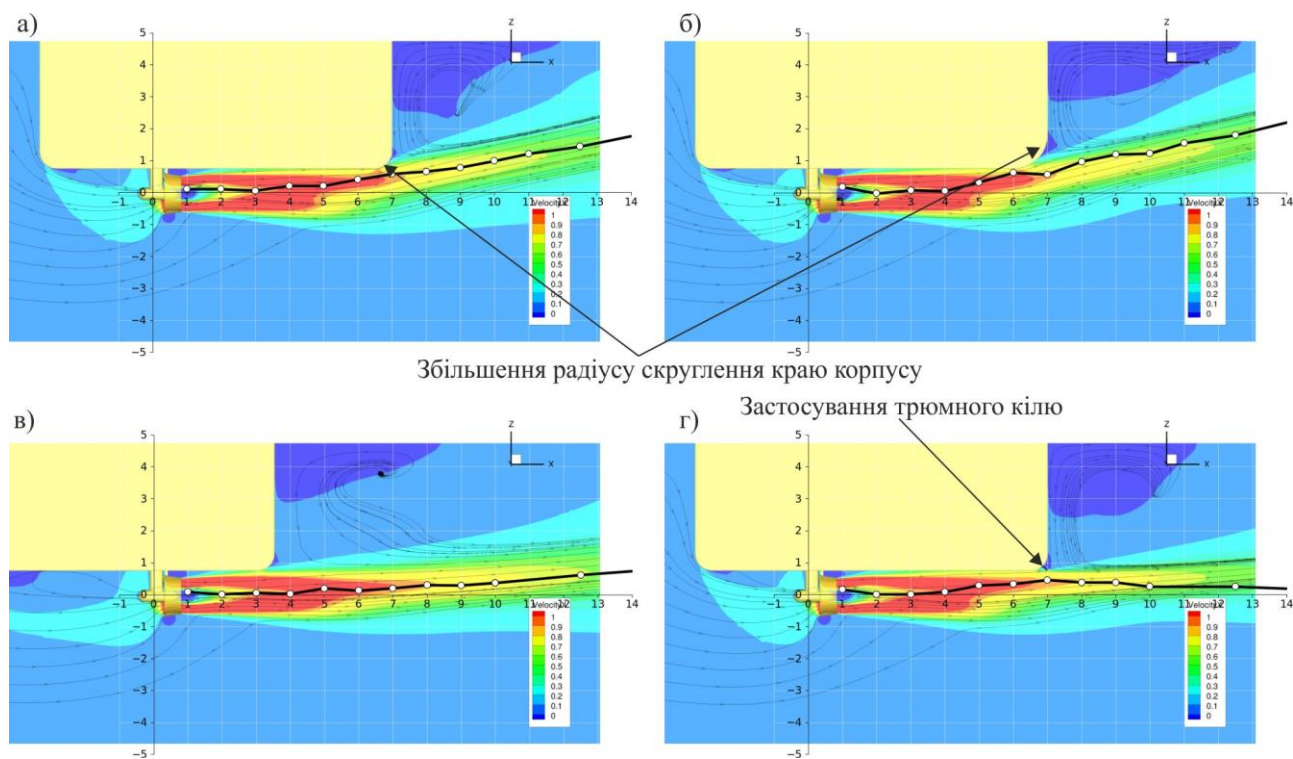


Рис. Г.1 Порівняльний аналіз траєкторій складових x -швидкостей потоку гвинта **ПП** за результатами вимірювань: виникнення ефекту Коанда із стандартним (а) і збільшеним (б) радіусом скруглення корпусу трюму; в) зменшення прилипання потоку за рахунок переміщення точки закріплення баллеру **ПП** ближче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

Додаток Д. Протокол моніторингу ідентифікаційних параметрів і ситуаційних чинники СЕУ КПК

Таблиця Д.1

Ідентифікаційні параметри і ситуаційні чинники СЕУ КПК

Параметр (чинник)	Характеристика параметру (чинника) відповідно до експлуатаційного режиму	Значення відповідно до типу КПК	Одиниця виміру	Правила визначення
1	2	3	4	5
D_p	Діаметр гвинта		[м]	—
$\lambda (H_p)$	Відносний крок гвинта		[в.о.]	(4.15)
K_T	Коефіцієнт упору гвинта		[в.о.]	(4.15)
t_s	Коефіцієнт горизонтального утримання		[в.о.]	(4.16)
n	Частота обертання		[с ⁻¹]	—
n_N	Швидкість обертання		[об/хв]	$60 \times n$
P_v	Тиск потоку		[Па]	(2.4)
H_p/D_p	Конструктивний крок гвинта		[в.о.]	(4.15)
T_p, T_{THR}, T_d	Упор гвинта, упор підрулюючого пристрою, діюче значення упору гвинта		[Н]	(4.14) (4.18)
R_p	Радіус гвинта		[м]	
R_n	Число Рейнольдса		[в.о.]	(4.15)
M_p	Момент гвинта		[Н×м]	(4.14)
v_a	Швидкість притоку води на площину гвинта		[м/с]	(4.15)
v_s	Абсолютна швидкість судна		[м/с]	(4.15) (4.16)
v_i	Поточна швидкість судна		[м/с]	(3.4)
F_l, F_x	Сила, що діє на судно по довжині l_s		[Н]	(6.1)
F_h, F_y	Сила, що діє на судно по ширині h_s і зумовлює відповідний кут крену		[Н]	(6.2)
F_z	Сила, що діє на судно у напрямку руху і зумовлює відповідний кут нишпорення		[Н]	(6.3)
l_s, l_M	Довжина, відповідно (s) – судна (задається) і (M) – моделі судна (розраховується)		[м]	(6.8)

Продовження Таблиця Д.1

1	2	3	4	5
b_s, b_m	Ширина, відповідно (s) – судна (задається) і (m) – моделі судна (розраховується)		[м]	(6.8)
h_s, h_m	Осідання, відповідно (s) – судна і (m) – моделі судна		[м]	(6.8)
$v_{sx} (us)$	Швидкість повздовжнього переміщення судна у декартовій системі координат		[м/с]	(B.1)
$v_{sy} (vs)$	Швидкість бокового переміщення судна у декартовій системі координат		[м/с]	(B.1)
$v_{sr} (rs)$	Швидкість нищпорення судна у декартовій системі координат, [рад/с]		[рад/с]	(B.1)
v_{saxi}	Аксіальна (осева) складова швидкості переміщення судна у циліндровій системі координат,		[м/с]	(B.1)
v_{stg}	Тангенціальна складова швидкості переміщення судна у циліндровій системі координат, [м/с]		[м/с]	(B.1)
μ_w	Коефіцієнт динамічної в'язкості		$\times 10^{-3}$ [Па $\times$ с]	(2.4)
ν_w	Коефіцієнт кінематичної в'язкості турбулентного потоку		$\times 10^{-6}$ [м ² /с]	(2.4)
ρ	Щільність води		[кг/м ³]	(4.14) (2.4)
τ_T	Вектор упору і моменту		[в.о.]	(6.36)
ω	Частота обертання		[рад/с]	$2\pi \times n$

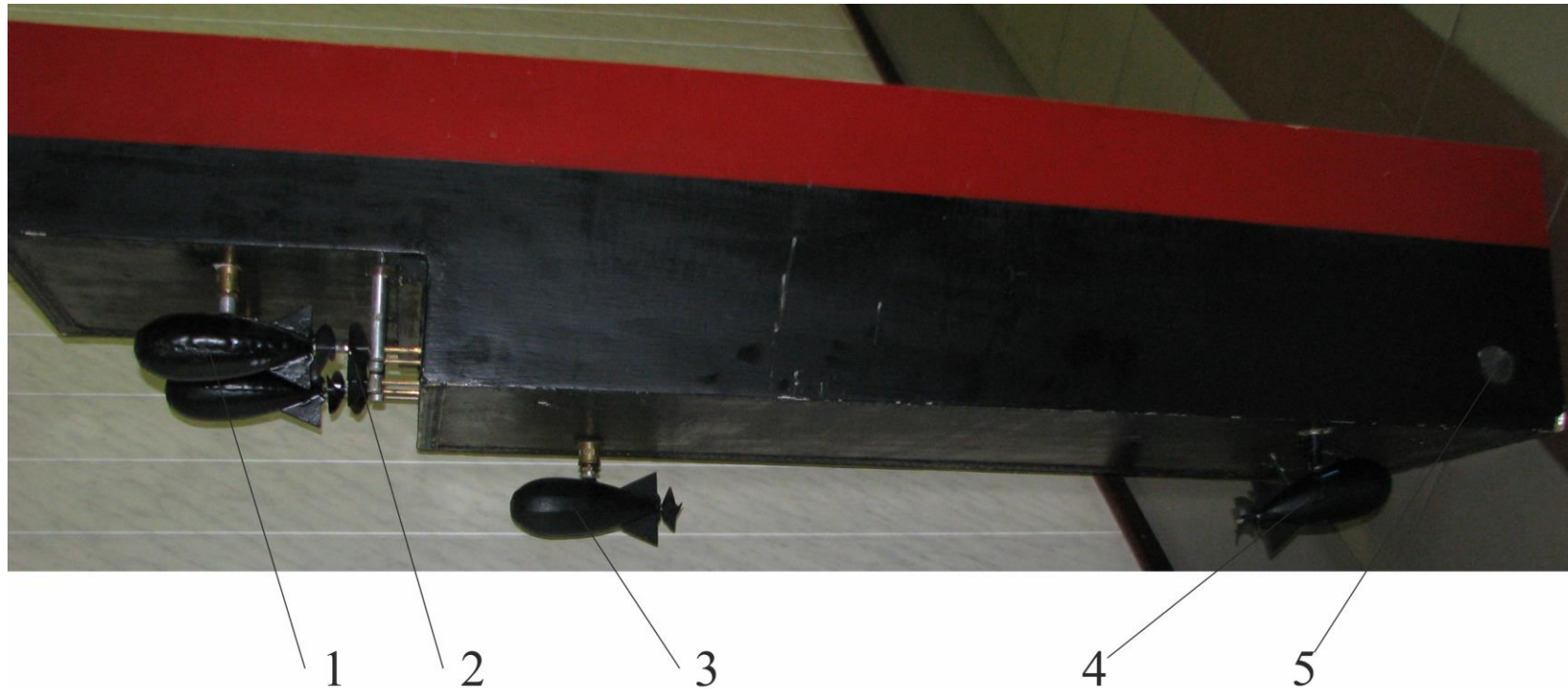


Рис. Е.1 Загальний вигляд фізичної моделі багатфункціонального пропульсивного комплексу зі змінною структурою: 1 – ПП системи *CRP*; головний електродвигун системи *CRP*; кормовий ПП; носовий ПП з двома ступенями свободи; носовий тунельний ПП.

Додаток Ж. Схемні рішення комбінованих (гібридними) пропульсивних комплексів

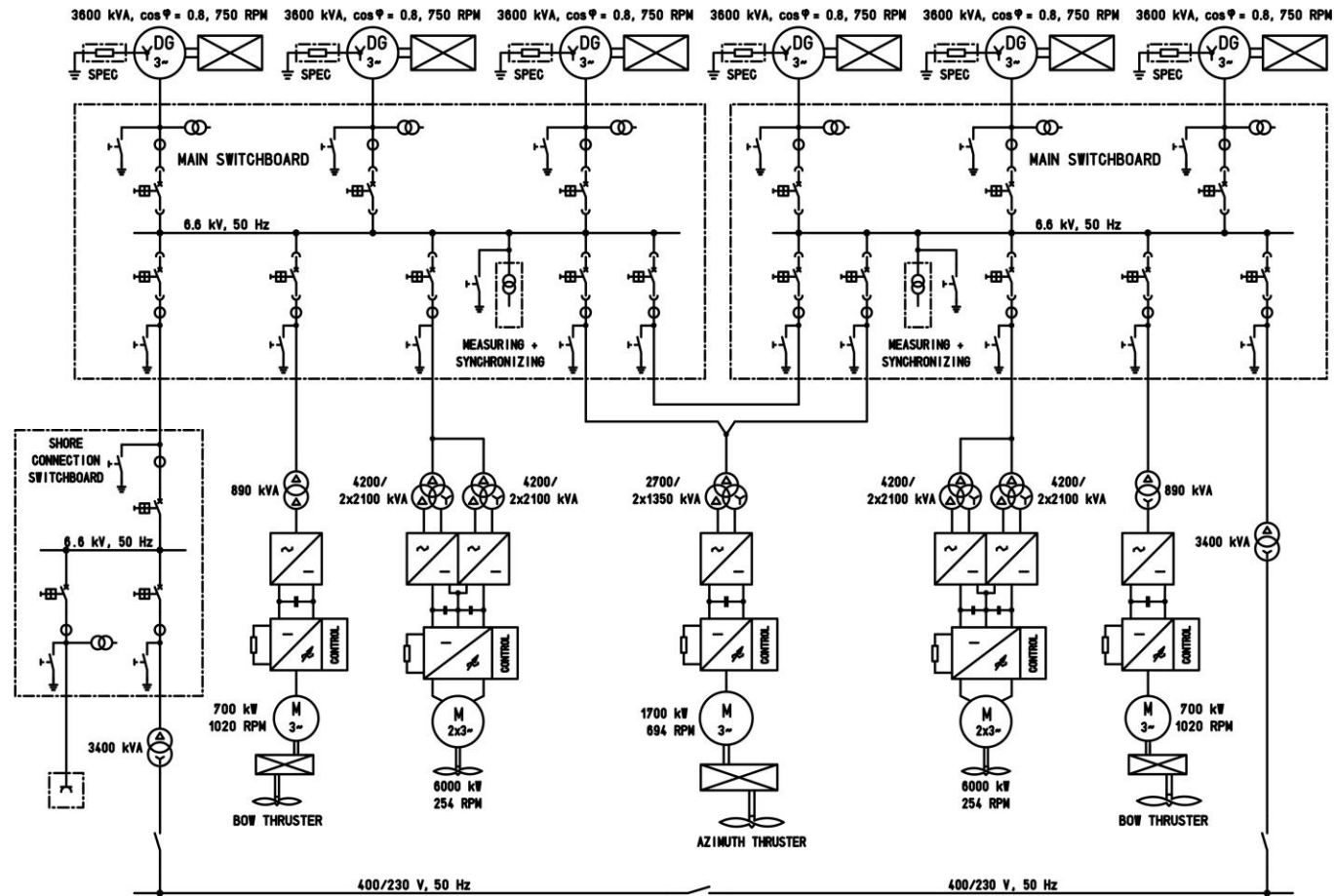


Рис. Ж.1 Однолінійна схема СЕУ КПК судна типу *Supply Vessel* (додаток Б.1)



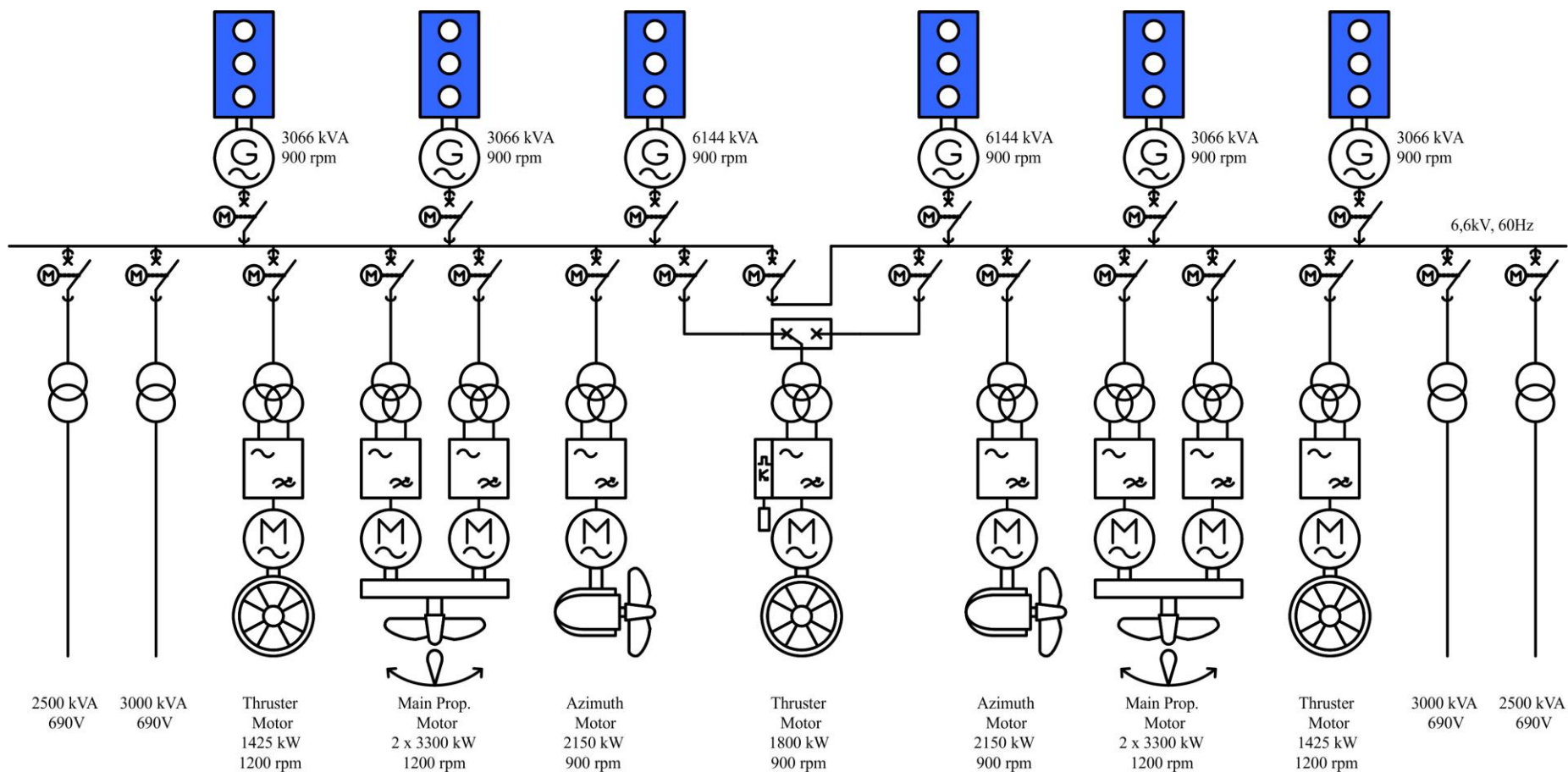


Рис. Ж.3 Однолінійна схема СЕУ **КПК** допоміжного судна з головними допоміжними **ПП** типу *Contaz®*

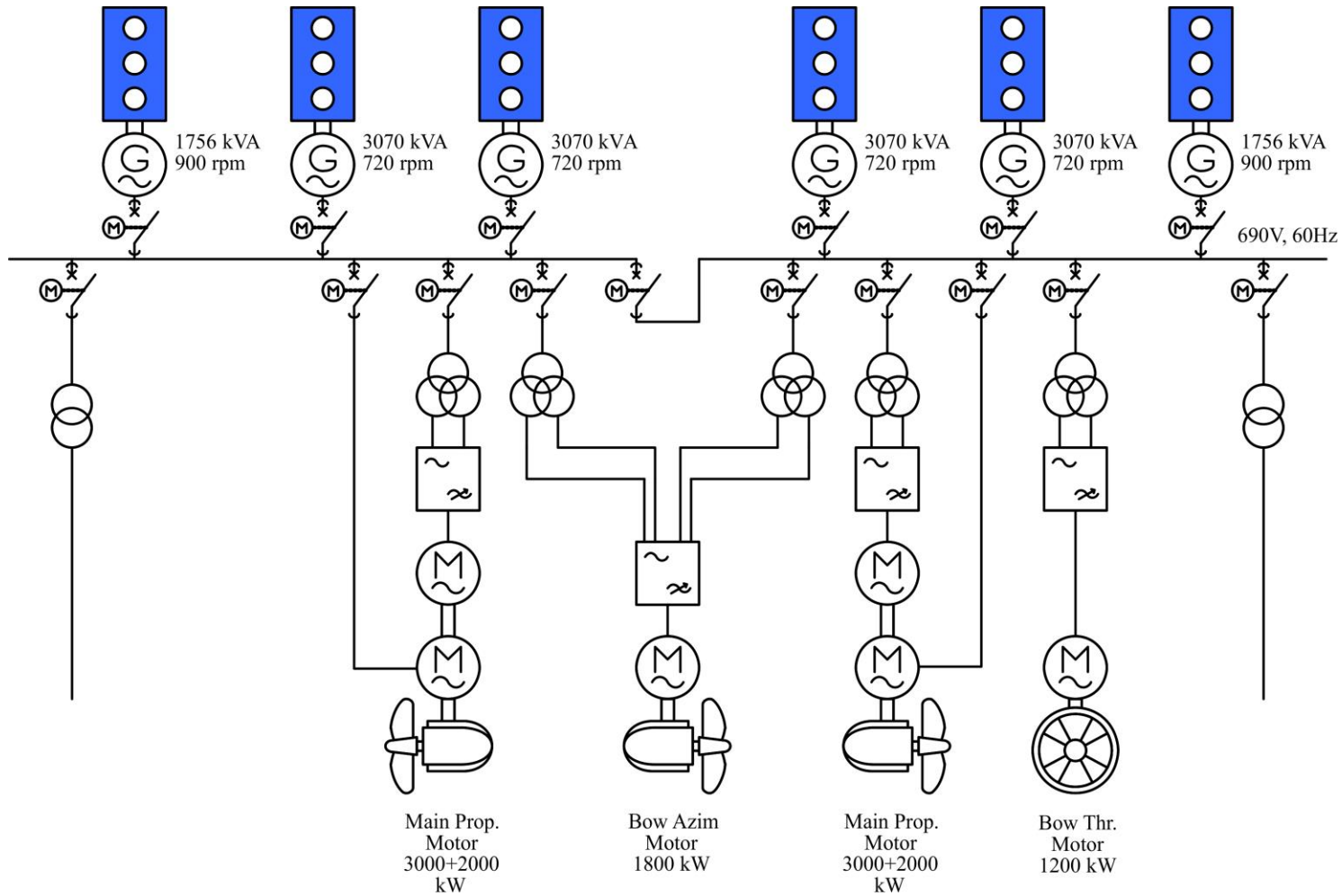


Рис. Ж.4 Однолінійна схема СЕУ КПП буксиру-допомогача з допоміжними ПП типу *Azip*

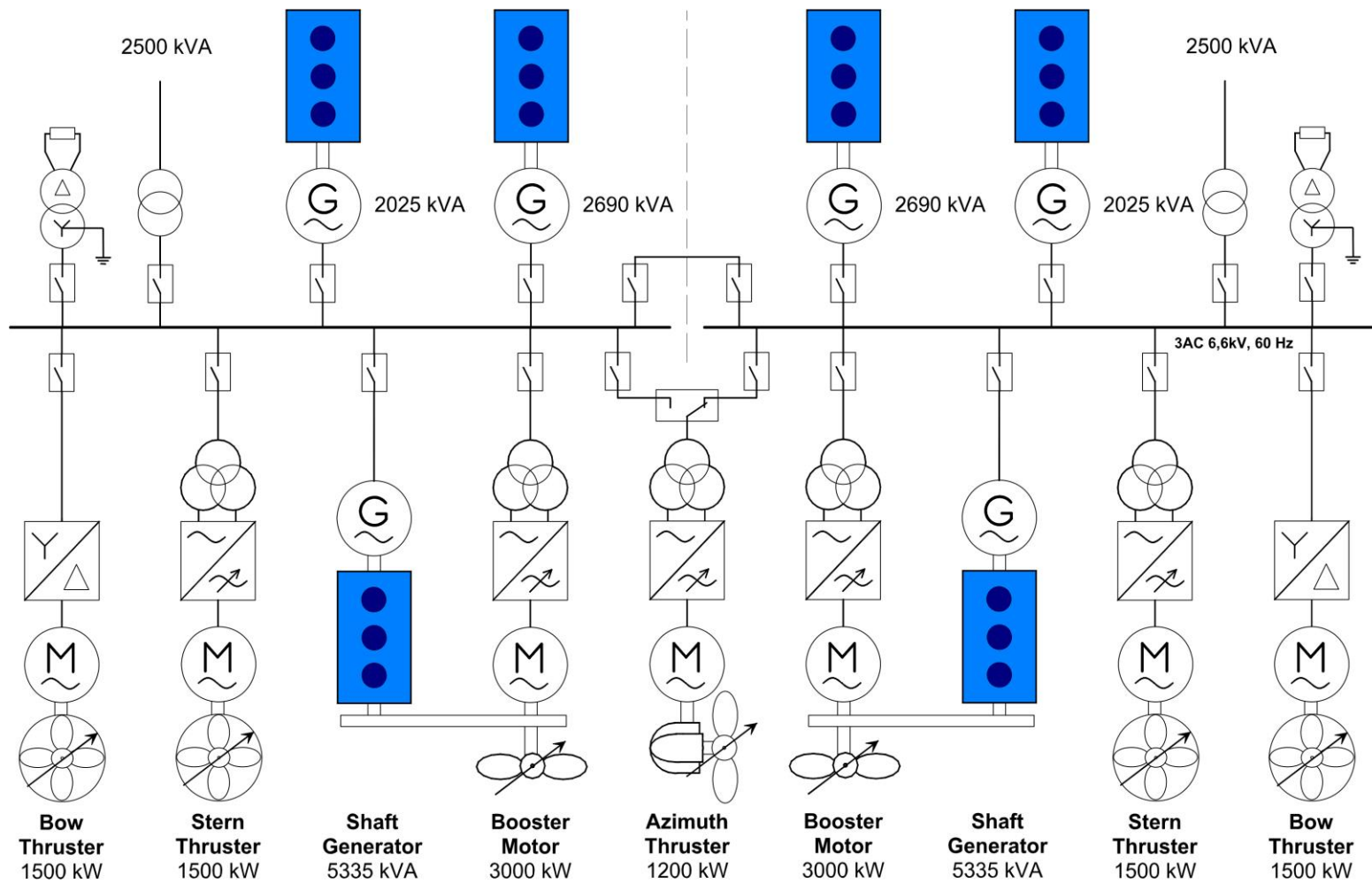


Рис. Ж.5 Однолінійна схема СЕУ КПК багатоцільового судна з допоміжними ПП типу L-Drive

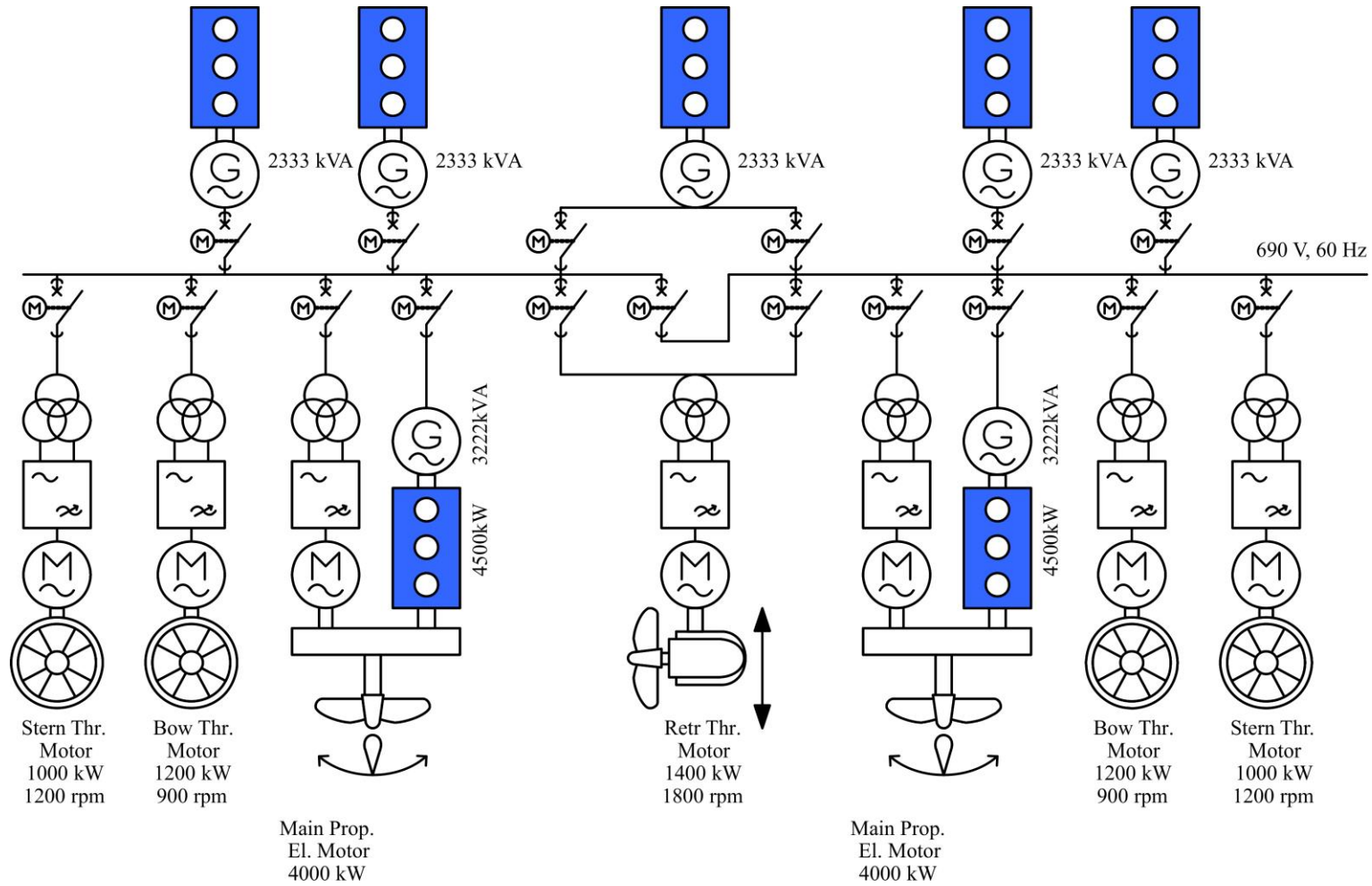


Рис. Ж.6 Однолінійна схема СЕУ КПК судна якорязавідника з допоміжними ПП типу *UL/ULE*

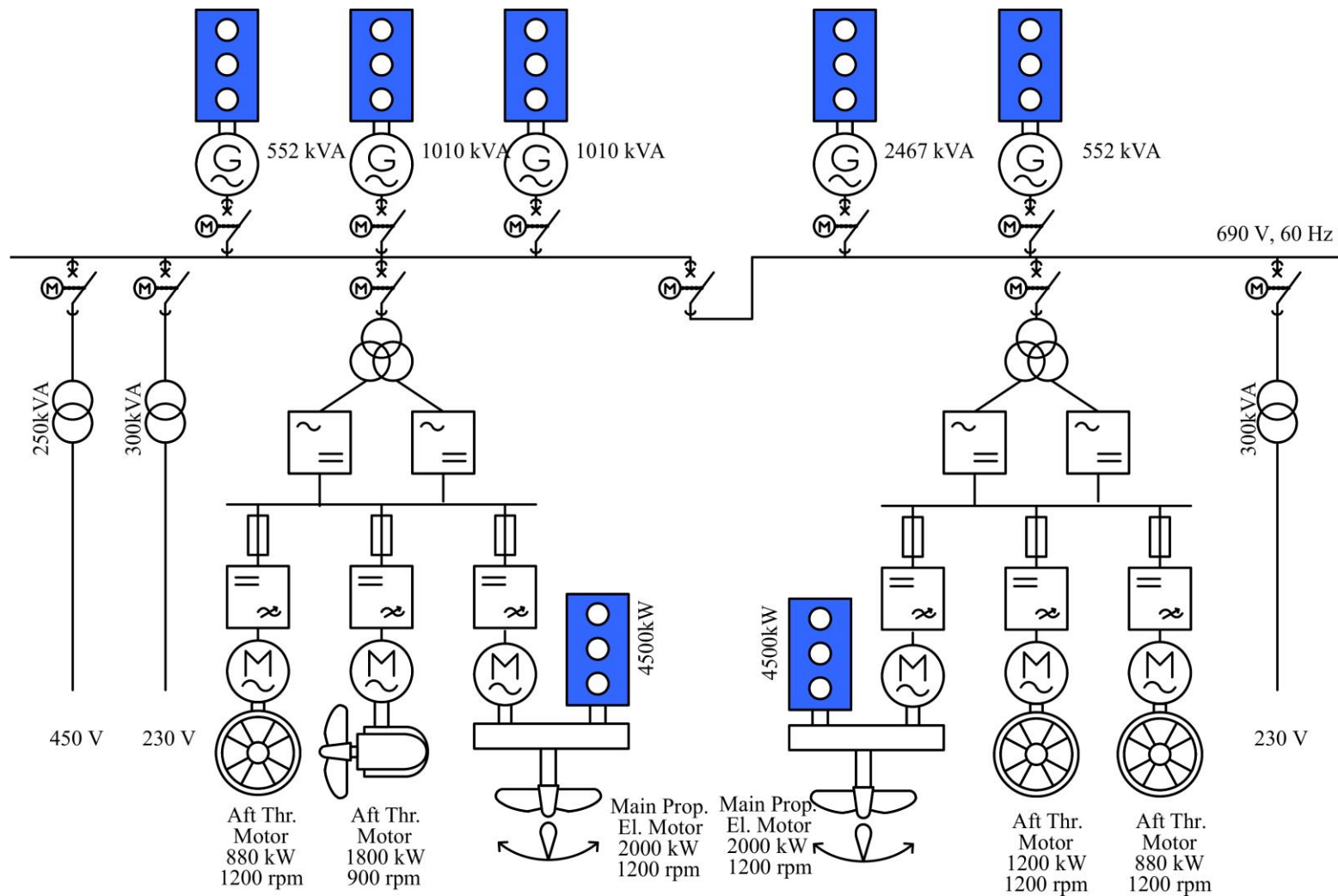


Рис. Ж.7 Однолінійна схема СЕУ **КПК** судна-рятувника з допоміжними **ПП** типу *Swing-UP*

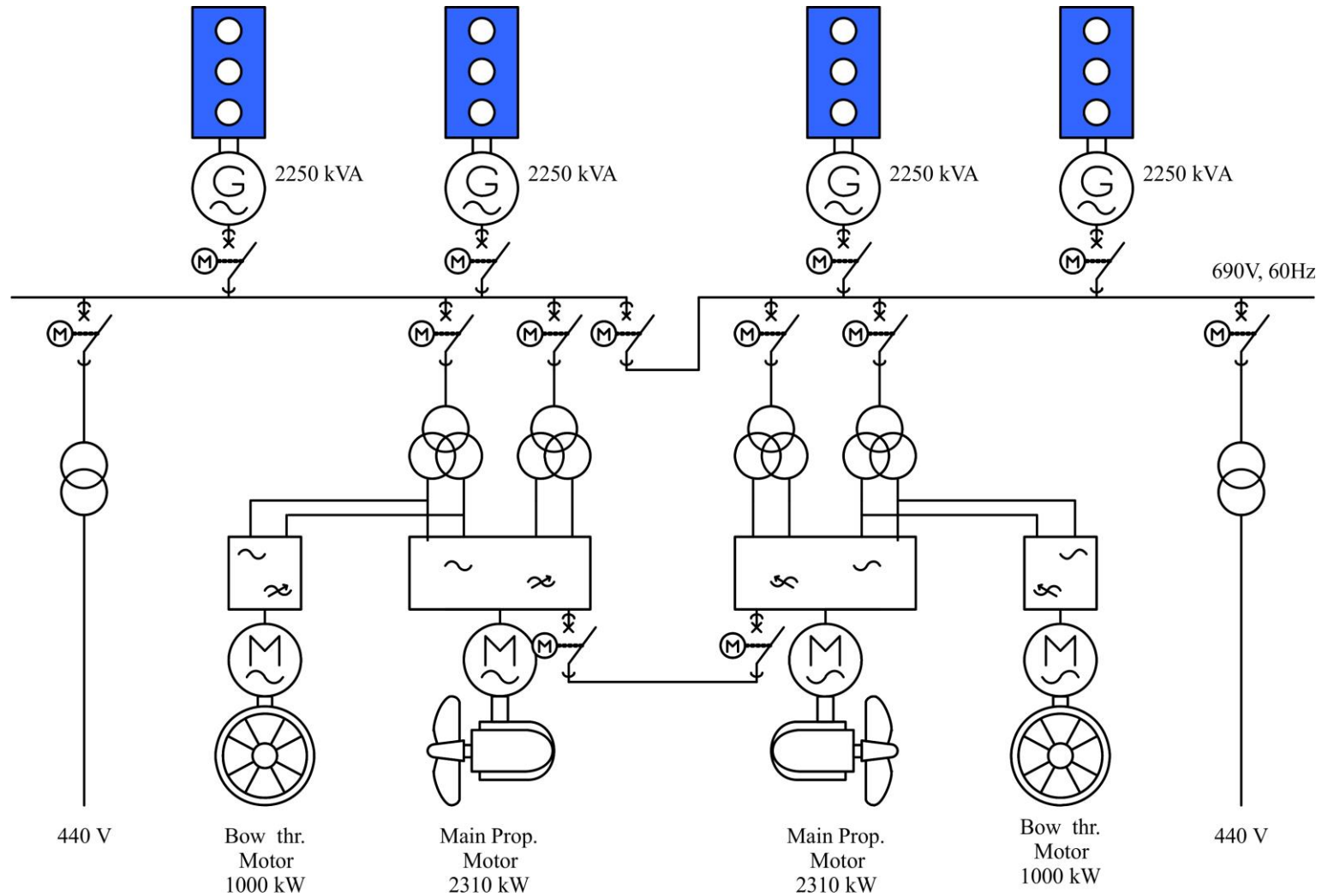


Рис. Ж.8 Однолінійна схема СЕУ **КПК** пасажирського судна льодового класу з **ПП** типу *Mermaid*TM

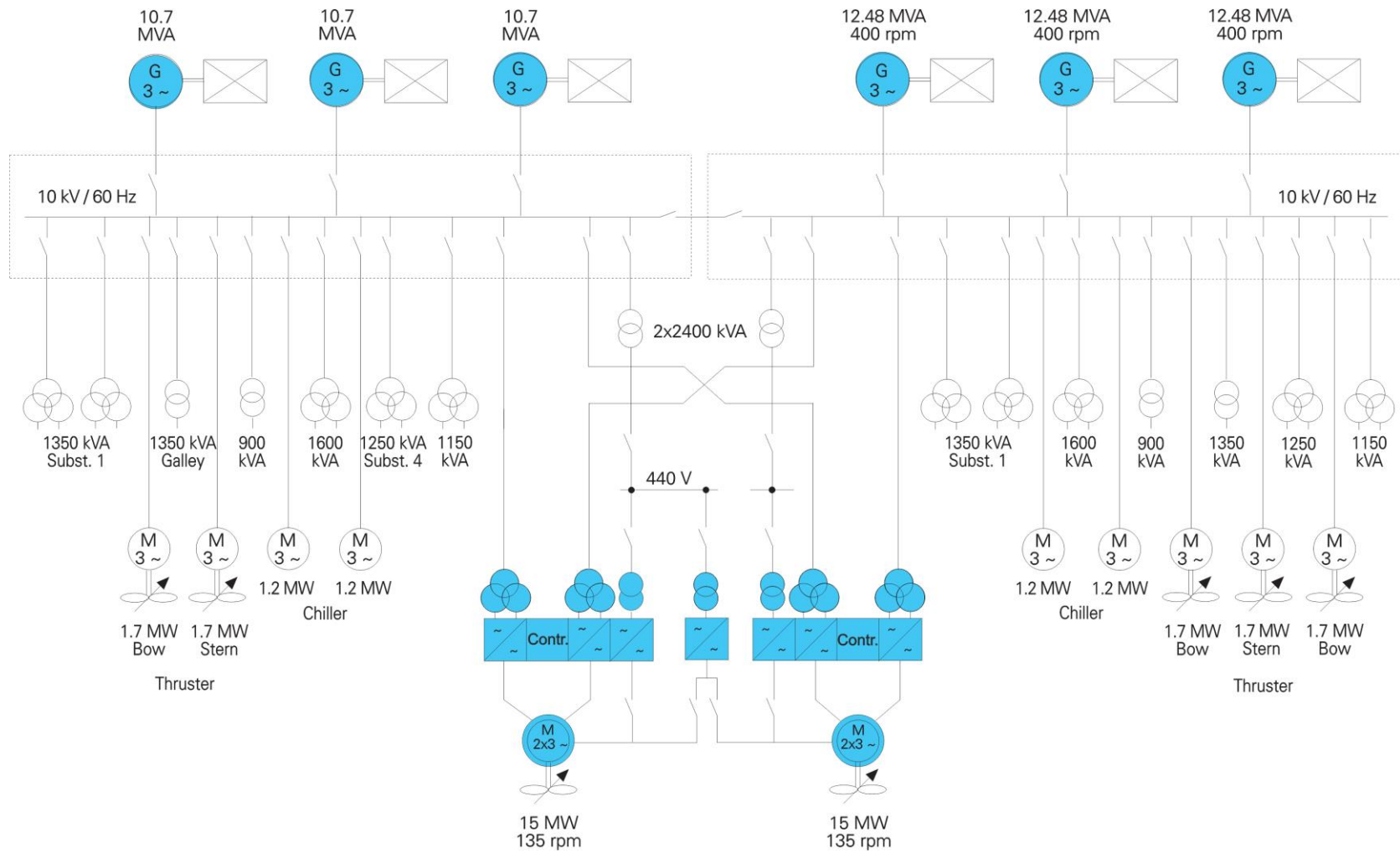


Рис. Ж.9 Однолінійна схема СЕУ КПК великого пасажирського судна льодового класу з ПП типу *Mermaid*TM

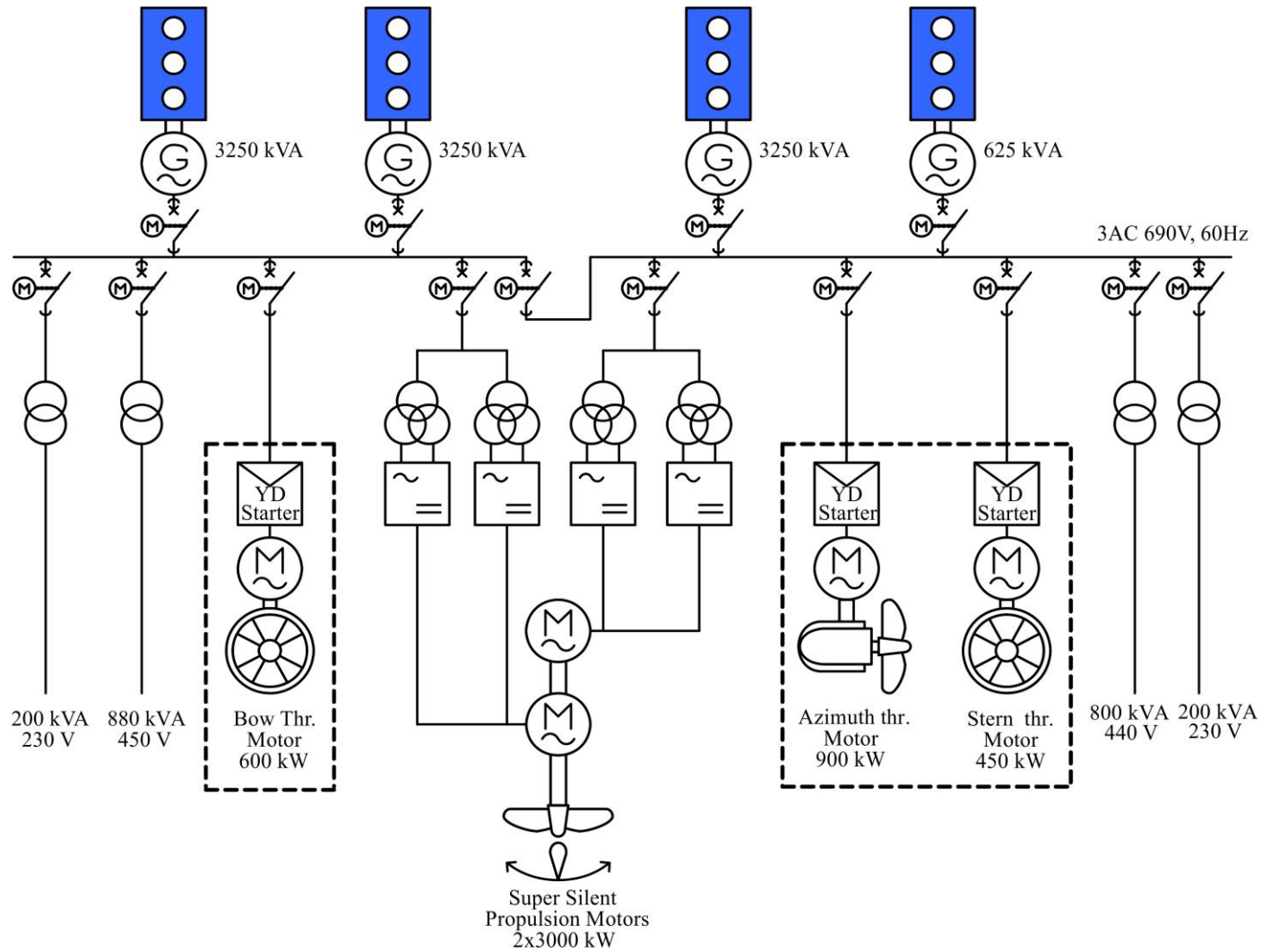


Рис. Ж.10 Однолінійна схема СЕУ **КПК** наукового судна з **ПП** типу *ТТ-РМ*



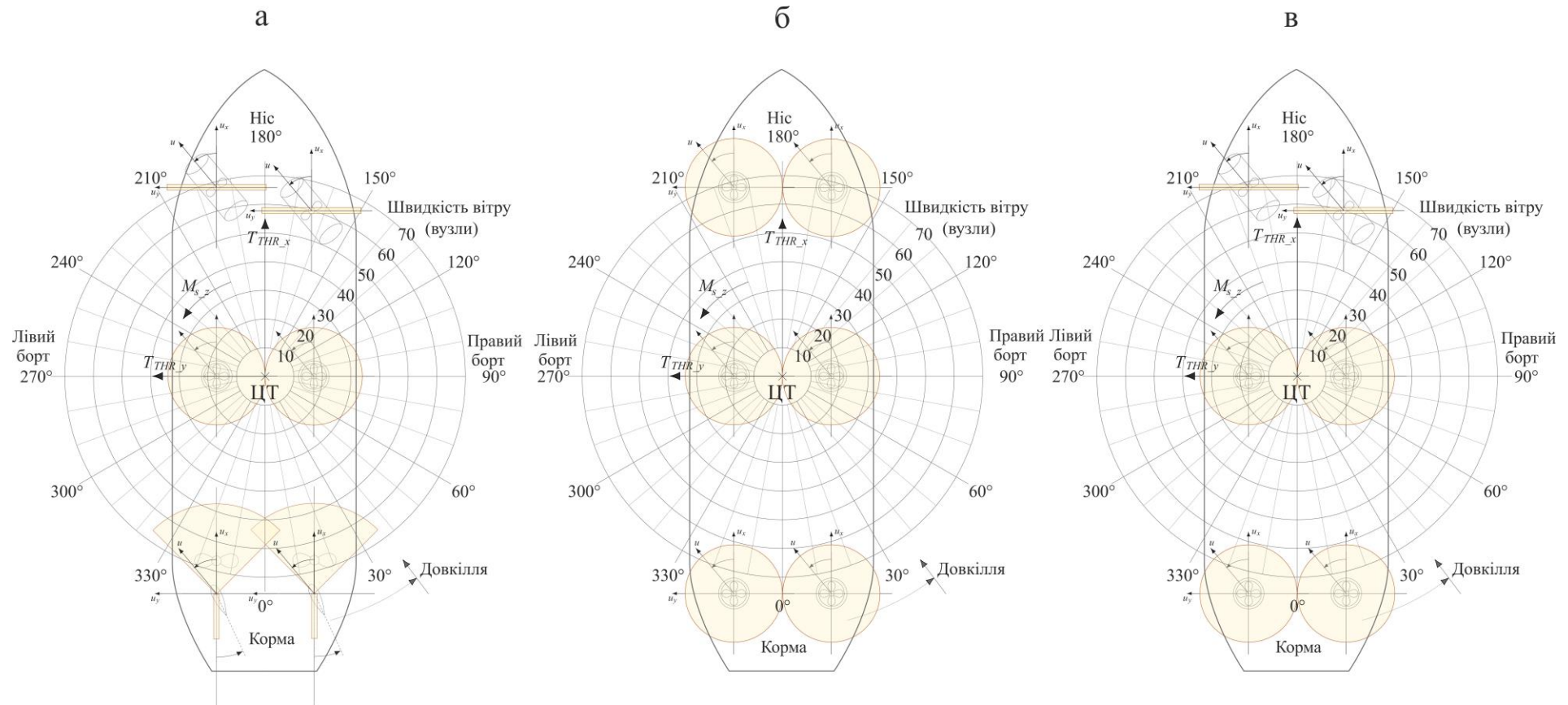


Рис. Ж.12 Зони дії упорів **ПП** різних типів комплектації СЕУ **КПК**: а – з класичною СЕУ у кормі судна і тунельними ПП у носовій часті; б – повна комплектація ПП азимутального типу; в – часткова комплектація ПП азимутального типу; ЦТ – центр ваги; T_{THR_y} , T_{THR_x} – упори ПП по відповідних осях; M_{s_z} – поворотний момент судна.

[До змісту](#)

Додаток 3. Порівняльні результати моделювання енергетичних процесів при передачі потужності у СЕУ [КПК](#)

Таблиця 3.1

Результати моделювання енергетичних процесів при передачі потужності у гібридному [ДЕПК](#) судна типу *Supply Vessel* (Рис. Б.27)

Найменування елемента	Вихідні дані						<i>DP</i>					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
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Гібридний комбінований пропульсивний комплекс (Рис. Б.27)																
<i>PVGS</i>	16	11,5	0,94	1,00	12,2	122,3	1,0	1,0	1,00	122,34	0,00	1,0	0,8	1,00	97,87	0,00
<i>ESS</i>	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
<i>DC/DC converters</i>	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
<i>VSI</i>	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

Продовження Таблиця 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
<i>DC-link</i>	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
<i>HVSB</i>	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
<i>LVSB</i>	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
<i>Load</i>	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

Таблиця 3.2

Результати моделювання енергетичних процесів при передачі потужності у гібридному **ДЕПК** буксиру з головними азимутальними **ПП** та **ПП** типу Z-Drive (**Рис. Ж.2**)

Найменування елементу	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
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Гібридний комбінований пропульсивний комплекс (Рис. Ж.2)																
PVGS	14	12,7	0,94	1,00	13,5	135,1	1,0	1,0	1,00	135,11	0,00	1,0	0,8	1,00	108,09	0,00
ESS	3	110,0	0,93	1,00	118,3	236,6	1,0	1,0	1,00	236,56	0,00	1,0	0,9	1,00	212,90	0,00
DC/DC converters	5	220,0	0,88	1,00	250,0	750,0	1,0	1,0	1,00	750,00	0,00	0,5	0,8	1,00	300,00	0,00
VSI	5	410,0	0,80	0,69	512,5	1537,5	1,0	1,0	0,69	1537,50	1112,86	0,5	0,9	0,69	691,88	500,79

Продовження Таблиця 3.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
<i>DC-link</i>	5	330,0	0,80	0,69	412,5	825,0	1,0	1,0	0,69	825,00	597,14	1,0	0,8	0,69	618,75	447,86
<i>HVSB</i>	2	672,7	0,88	0,43	764,4	1528,9	1,0	1,0	0,43	1528,86	1380,30	0,5	0,8	0,43	642,12	579,73
<i>LVSB</i>	2	1412,7	0,89	0,44	1587,3	3174,6	1,0	1,0	0,44	3174,61	2850,79	0,5	1,0	0,44	1523,81	1368,38
<i>Load</i>	3	2085,4	0,95	0,80	2195,2	6585,5	1,0	1,0	0,80	6585,47	3951,28	0,5	1,0	0,80	3292,74	1975,64
Контроль за станом СОДГ							0,70			14773,1	9892,4	0,70			5458,7	3923,7
PI управління (класичне) із регулюванням ступеню заряду батарей CHE (SOC)							0,75			29546,2	19784,8	0,75			6663,4	4424,5
Контроль частоти і стану СОДГ та регулювання ступеню заряду батарей CHE (SOC)							0,80			23637,0	15827,8	0,85			5663,9	3760,9
Управління за критерієм мінімуму споживання електроенергії							0,85			24818,8	16619,2	0,90			5947,1	3948,9
Управління за критерієм отримання максимуму альтернативної енергії та регулюванням ступеню заряду батарей CHE (SOC)							0,90			26059,8	17450,2	0,95			6244,5	4146,3
							Регулювання SOC			Так	Ні	Регулювання SOC			Так	Ні

Додаток И. Система підтримки прийняття рішень при дослідженні і розробці суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів [70]

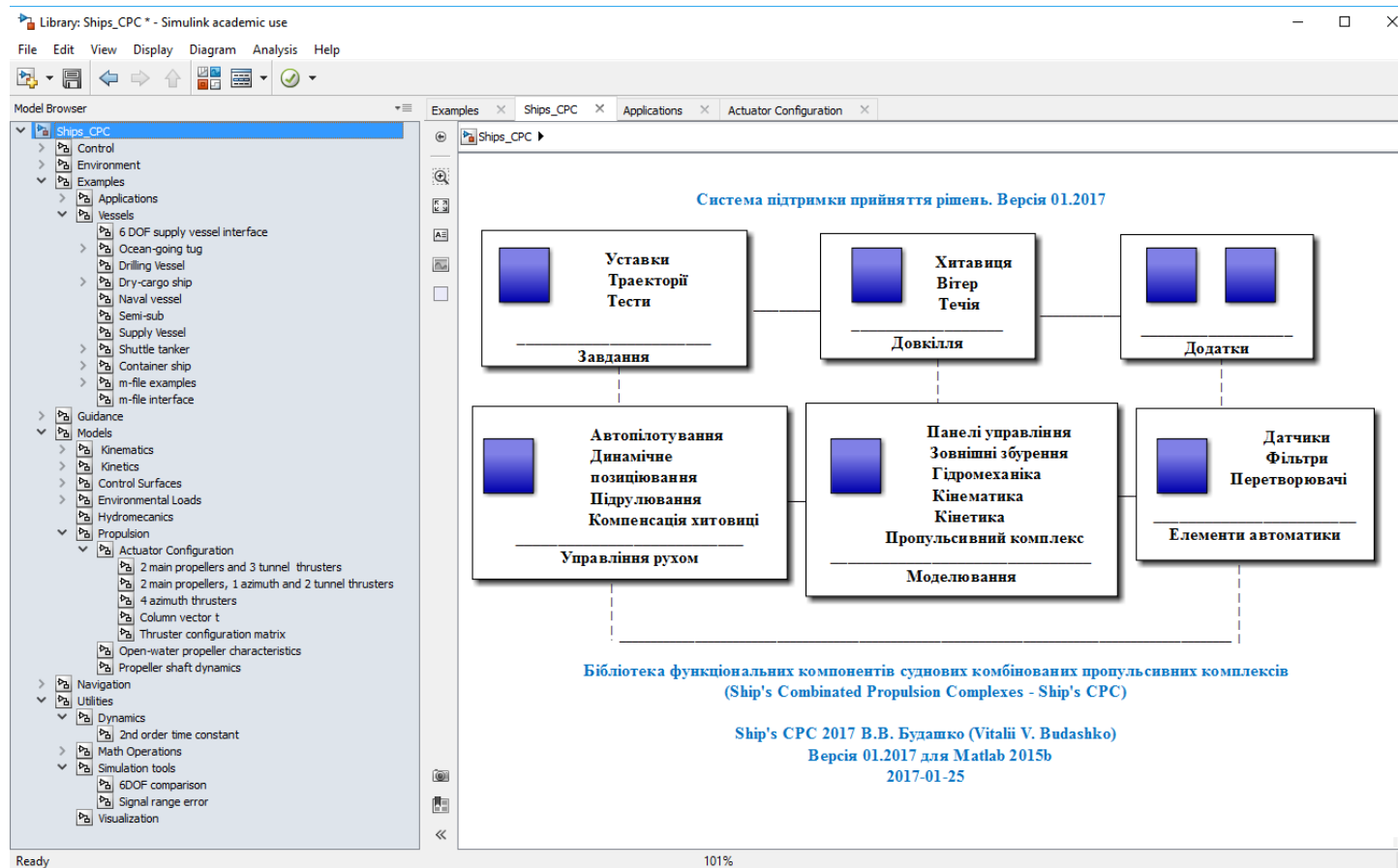


Рис. И.1 Головна сторінка програмного комплексу у *MatLab/Simulink* системи підтримки прийняття рішень

Додаток К. Технологічна карта дослідження

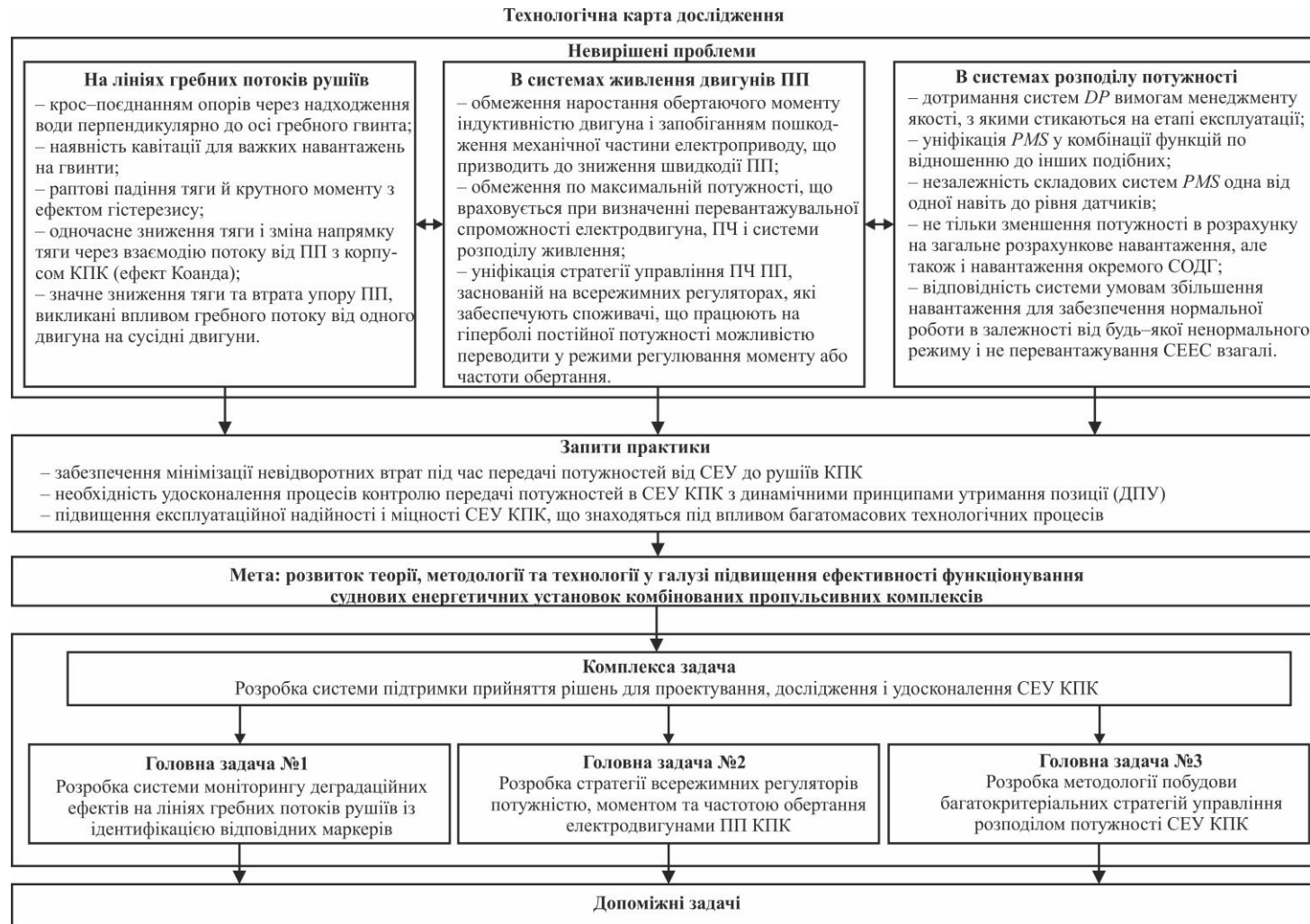


Рис. К.1 Технологічна карта дослідження (проблеми, мета і головні задачі)

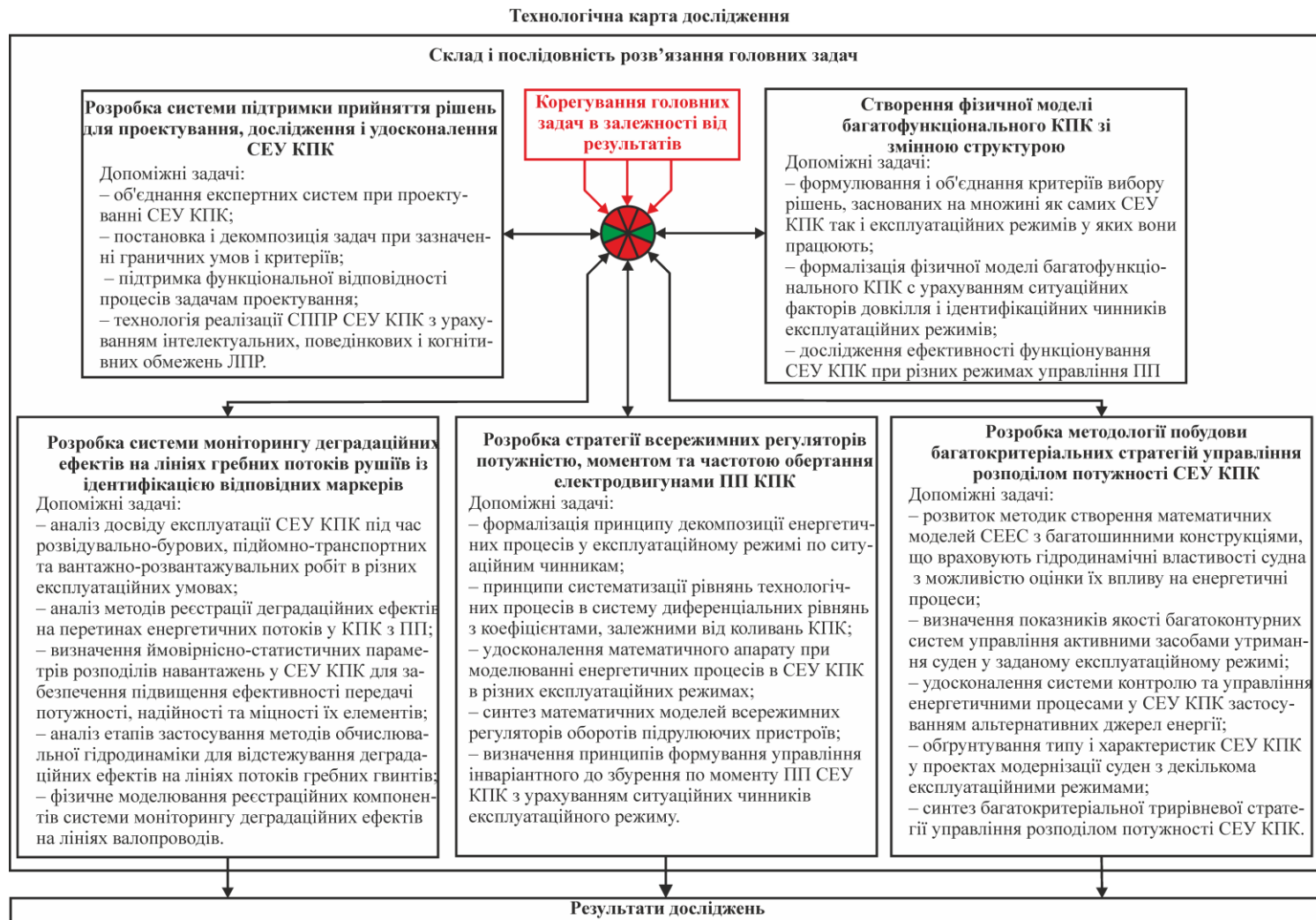


Рис. К.2 Технологічна карта дослідження (допоміжні задачі)

Таблиця Л.1

Корегування конструктивного коефіцієнту енергоефективності в залежності від типу судна і матриці конфігурації ПП

Тип судна	f_{j0}	f_{imin} в залежності від конфігурації розташування ПП				
		$T_{matrix (0)}$ (6.39)	$T_{matrix (1)}$ (6.40)	$T_{matrix (2)}$ (6.41)	$T_{matrix (3)}$ (6.42)	$T_{matrix (4)}$ (6.43)
1	2	3	4	5	6	7
Судна для установки якорів (Anchor Handling Vessel)	$f_j = \frac{0,316L_{PP}^{(1+0,824)}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}$	$0,118L_{PP}^{(1+0,667)}$	$0,275L_{PP}^{(1+0,515)}$	$0,344L_{PP}^{(1+0,418)}$	$0,479L_{PP}^{(1+0,263)}$	—
Багатоцільові офшорні судна (Multi Purpose Offshore Vessel)	$f_j = \frac{0,321L_{PP}^{(1+0,847)}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}$	$0,254L_{PP}^{(1+0,764)}$	$0,493L_{PP}^{(1+0,566)}$	$0,532L_{PP}^{(1+0,454)}$	$0,316L_{PP}^{(1+0,132)}$	—
Судна для заведення якорів та офшорного будівництва (Construction anchor handling vessel)	$f_j = \frac{0,408L_{PP}^{(1+1,012)}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}$	$0,387L_{PP}^{(1+0,982)}$	$0,564L_{PP}^{(1+0,812)}$	$0,786L_{PP}^{(1+0,854)}$	$0,892L_{PP}^{(1+0,687)}$	$0,912L_{PP}^{(1+0,482)}$
Резервні, рятівні та охоронні судна (Stand-by and Guard Vessels)	$f_j = \frac{0,298L_{PP}^{(1+1,134)}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}$	$0,314L_{PP}^{(1+1,128)}$	$0,468L_{PP}^{(1+1,018)}$	$0,528L_{PP}^{(1+0,954)}$	$0,636L_{PP}^{(1+0,885)}$	$0,786L_{PP}^{(1+0,789)}$

Продовження Таблиця Л.1

1	2	3	4	5	6	7
Судна для офшорного будівництва (Offshore Construction Vessel)	$f_j = \frac{0,356L_{PP}^{(1+0,901)}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}$	$0,118L_{PP}^{(1+0,667)}$	$0,275L_{PP}^{(1+0,515)}$	$0,344L_{PP}^{(1+0,418)}$	$0,479L_{PP}^{(1+0,263)}$	—
Океанографічні дослідницькі судна (Oceanographic Research Vessels)	$f_j = \frac{0,502L_{PP}^{(1+0,834)}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}$	$0,468L_{PP}^{(1+0,864)}$	—	—	$0,548L_{PP}^{(1+0,768)}$	$0,766L_{PP}^{(1+0,546)}$
Риболовецькі дослідницькі судна (Fisheries research vessel)	$f_j = \frac{0,713L_{PP}^{(1+1,012)}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}$	$0,664L_{PP}^{(1+0,918)}$	—	—	$0,762L_{PP}^{(1+0,822)}$	$0,808L_{PP}^{(1+0,890)}$
Дизель-електричні пасажирські судна (Diesel-electric Passenger Vessels)	$f_j = \frac{0,112L_{PP}^{(1+2,123)}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}$	—	$0,224L_{PP}^{(1+1,964)}$	$0,338L_{PP}^{(1+1,656)}$	—	—
Риболовецькі траулери (Live Fish Carrier)	$f_j = \frac{0,721L_{PP}^{(1+1,121)}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}$	$0,824L_{PP}^{(1+0,824)}$	—	—	$0,906L_{PP}^{(1+0,724)}$	$0,988L_{PP}^{(1+0,774)}$
Пелагічні сейнер-траулери (Purse Seiner/Pelagic Trawler)	$f_j = \frac{0,714L_{PP}^{(1+1,133)}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}$	$0,824L_{PP}^{(1+1,012)}$	—	—	$0,866L_{PP}^{(1+0,968)}$	$0,912L_{PP}^{(1+0,864)}$
Продуктові судна/танкери хімовози (Product/Chemical Tankers)	$f_j = \frac{0,636L_{PP}^{(1+1,822)}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}$	—	$0,742L_{PP}^{(1+1,412)}$	$0,948L_{PP}^{(1+1,312)}$	—	—

1	2	3	4	5	6	7
Подвійні морські підйомники (Twin Marine Lifter)	$f_j = \frac{0,428L_{PP}^{(1+0,671)}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}$	$0,528L_{PP}^{(1+0,412)}$	—	—	$0,622L_{PP}^{(1+0,774)}$	$0,702L_{PP}^{(1+0,632)}$
Патрульні судна, побудованих за технологією SWATH (Small Waterplane Area Twin Hull)	$f_j = \frac{0,934L_{PP}^{(1+1,112)}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}$	—	$0,994L_{PP}^{(1+1,266)}$	$0,882L_{PP}^{(1+1,346)}$	—	—
Днопоглиблювальні судна (Cutter Suction Dredger)	$f_j = \frac{0,335L_{PP}^{(1+0,816)}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}$	$0,422L_{PP}^{(1+0,814)}$	—	—	$0,622L_{PP}^{(1+0,642)}$	$0,738L_{PP}^{(1+0,524)}$
Судна для дослідження морського дна (Seabed Logging Ship)	$f_j = \frac{0,345L_{PP}^{(1+0,834)}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}$	$0,322L_{PP}^{(1+0,656)}$	$0,422L_{PP}^{(1+0,548)}$	$0,548L_{PP}^{(1+0,416)}$	$0,682L_{PP}^{(1+0,218)}$	—
Багатофункціональні геотехнічні дослідницькі судна (Multipurpose Geotechnical & Soil Investigation Vessel)	$f_j = \frac{0,378L_{PP}^{(1+0,876)}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}$	$0,464L_{PP}^{(1+0,922)}$	—	—	$0,618L_{PP}^{(1+0,744)}$	$0,738L_{PP}^{(1+0,636)}$
Офшорні судна для дослідження морського дна (Offshore Subsea Construction Vessel)	$f_j = \frac{0,356L_{PP}^{(1+0,901)}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}$	$0,324L_{PP}^{(1+0,764)}$	$0,446L_{PP}^{(1+0,645)}$	$0,568L_{PP}^{(1+0,532)}$	$0,688L_{PP}^{(1+0,342)}$	—
Багатоцільові судна із дистанційно-керованими підводними апаратами (Multipurpose field & ROV Support Vessel)	$f_j = \frac{0,467L_{PP}^{(1+0,789)}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}$	$0,406L_{PP}^{(1+0,924)}$	—	—	$0,624L_{PP}^{(1+0,734)}$	$0,736L_{PP}^{(1+0,632)}$

Продовження Таблиця Л.1

1	2	3	4	5	6	7
Судна для прокладання кабелів (Cable laying vessel)	$f_j = \frac{0,676L_{PP}^{(1+0,234)}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}$	$0,632L_{PP}^{(1+0,636)}$	—	—	$0,734L_{PP}^{(1+0,514)}$	$0,862L_{PP}^{(1+0,432)}$
Сейсмічні дослідницькі судна (Seismic Research Vessel)	$f_j = \frac{0,695L_{PP}^{(1+0,234)}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}$	$0,618L_{PP}^{(1+0,522)}$	—	—	$0,864L_{PP}^{(1+0,312)}$	$0,922L_{PP}^{(1+0,212)}$
Газові автомобільні поромі (LNG Car Ferry)	$f_j = \frac{0,812L_{PP}^{(1+1,234)}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}$	—	$0,796L_{PP}^{(1+1,566)}$	$0,738L_{PP}^{(1+1,454)}$	—	—
Різноманітні типи поромів (Roll-on/Roll-off ships)	$f_j = \frac{0,656L_{PP}^{(1+1,238)}}{\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)}}$	—	$0,446L_{PP}^{(1+1,512)}$	$0,586L_{PP}^{(1+1,446)}$	—	—

Додаток М. Системна структуризація процесу дослідження

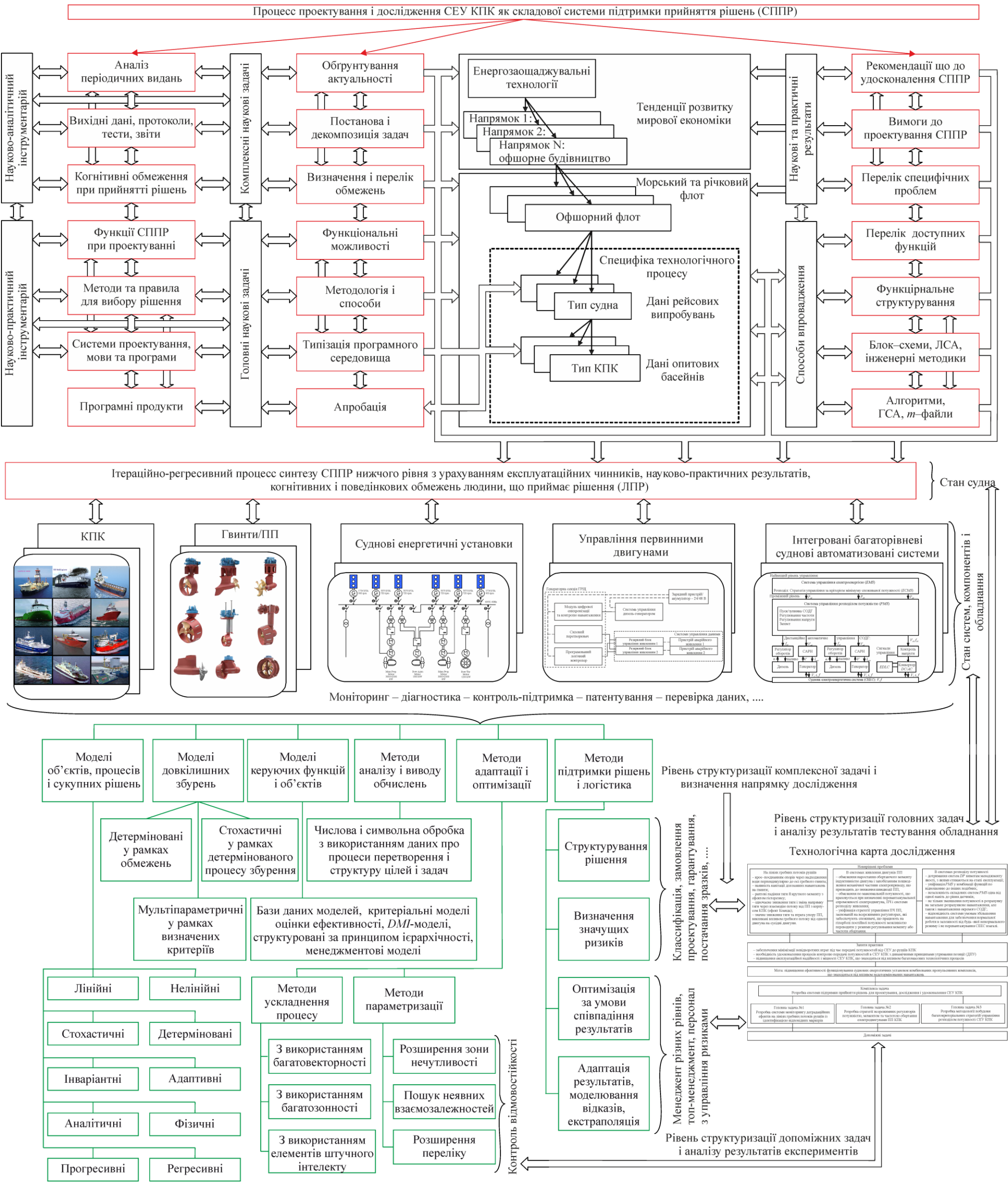


Рис. М.1 Структурна схема процесу визначення тематики дослідження

Таблиця М.1

Результати експертної оцінки аспектів тематики дисертаційних досліджень

Аспекти	Установа або експерт, що здійснював оцінку	Визначальні фактори доцільності дослідження																										
		Актуальність			Наукова новизна			Фундаментальність			Відповідність спеціальності			Перспективи реалізації			Наукова значимість очікуваних результатів			Прикладне значення			Економічна ефективність			Міжгалузевість		
		Актуальна	Пріоритетний напрямок досліджень	Не актуальна	Істотна наукова новизна	Має прикладний характер	Несуттєва чи сумнівна	Має фундаментальний характер	Має ознаки фундаментальності	Не має фундаментального характеру	Відповідає одному пункту (номер)	Відповідає декілька пунктам (номери)	Не відповідає	Реальне виконання у зазначені терміни	Терміни виконання занижені	Терміни виконання нереальні	Сприятиме прогресу даної галузі	Наукова значимість несуттєва	Наукова значимість неясна або відсутня	Має прикладне значення	Прикладне значення несуттєве	Прикладне значення відсутнє	Є у пріоритетних напрямках	Потребує додаткових досліджень	Не можливо розрахувати	Застосування у суміжних галузях	Висока кількість корисного матеріалу	Є відокремленим дослідженням
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Мінімізація невідворотних втрат під час передачі потужностей від СЕУ до рушіїв КПК	Наукова рада НАН України з комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики», Військова академія, м. Одеса	+				+				+	4			+			+			+			+				+	
	Комісія ПрАТ «Українське Дунайське пароплавство»		+		+					+	4				+		+			+				+			+	
	Технічна рада Національного університету «Одеська морська академія»		+		+					+		4, 12			+		+			+			+				+	
	«Інституту післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр»	+			+					+		4, 12		+			+			+			+				+	
	ТОВ Одеського торговельного порту «МОР-АВТО»		+			+				+	2				+		+				+			+			+	
	Комісії суден іноземних компаній «Vancouver express» та «Allegro»	+				+					+	4			+			+			+			+			+	
Удосконалення процесів контролю передачі потужностей в СЕУ КПК з динамічними принципами утримання	Наукова рада НАН України з комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики», Військова академія, м. Одеса	+				+				+	2			+			+			+			+				+	
	Комісія ПрАТ «Українське Дунайське пароплавство»		+		+					+	7				+		+			+				+			+	
	Технічна рада Національного університету «Одеська морська академія»		+		+					+		8, 12			+		+			+			+				+	
	«Інституту післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр»	+			+					+		8, 10		+			+			+			+				+	
	ТОВ Одеського торговельного порту «МОР-АВТО»		+			+				+	8				+		+				+			+			+	
	Комісії суден іноземних компаній «Vancouver express» та «Allegro»	+				+				+	10			+			+			+			+				+	

Підвищення ефективності функціонування СЕУ КІПК	Наукова рада НАН України з комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики», Військова академія, м. Одеса	+			+				+			4, 11		+			+			+			+			
	Комісія ПрАТ «Українське Дунайське пароплавство»	+			+			+				8, 12		+			+					+		+		
	Технічна рада Національного університету «Одеська морська академія»	+			+			+				4, 10		+			+				+			+		
	«Інституту післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр»	+			+				+			7, 11		+			+				+			+		
	ТОВ Одеського торговельного порту «МОР-АВТО»	+				+			+			8, 10			+		+			+			+		+	
	Комісії суден іноземних компаній «Vancouver express» та «Allegro»	+			+				+			4, 12		+			+				+					+
Удосконалення систем керування взаємо-впливаючими технологічними процесами в СЕУ КІПК з динамічними принципами утримання	Наукова рада НАН України з комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики», Військова академія, м. Одеса	+				+			+	2				+			+				+					+
	Комісія ПрАТ «Українське Дунайське пароплавство»		+		+				+	7					+		+					+				+
	Технічна рада Національного університету «Одеська морська академія»		+		+				+			4, 11			+		+				+					+
	«Інституту післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр»	+			+				+			8, 11		+			+				+					+
	ТОВ Одеського торговельного порту «МОР-АВТО»		+			+			+	4					+		+			+			+			+
	Комісії суден іноземних компаній «Vancouver express» та «Allegro»	+				+			+	10				+			+				+					+
Підвищення експлуатаційної надійності і міцності СЕУ КІПК	Наукова рада НАН України з комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики», Військова академія, м. Одеса	+				+			+	2				+			+				+					+
	Комісія ПрАТ «Українське Дунайське пароплавство»		+		+				+	8					+		+					+				+
	Технічна рада Національного університету «Одеська морська академія»		+		+				+			4, 12			+		+				+					+
	«Інституту післядипломної освіти» «Одеський морський тренажерний центр»	+			+				+			8, 11		+			+				+					+
	ТОВ Одеського торговельного порту «МОР-АВТО»		+			+			+	8					+		+			+			+			+
	Комісії суден іноземних компаній «Vancouver express» та «Allegro»	+				+			+	10				+			+				+					+