

Наводяться результати досліджень у рамках удосконалення системи підтримки прийняття рішень при проектуванні суднових енергетичних установок (СЕУ) комбінованих пропульсивних комплексів (КПК). СППР побудована з використанням системного аналізу, оптимізації та технологій моделювання, реалізованих на базі DMI-моделей суден. При удосконаленні СППР було застосовано метод взаємної імплементації характеристичних просторових векторів енергетичних процесів в СЕУ і гідродинамічних в КПК

Ключові слова: суднова енергетична установка, пропульсивний комплекс, моделювання, процес передачі потужності, прийняття рішення

Приводятся результаты исследования в рамках совершенствования системы поддержки принятия решений при проектировании судовых энергетических установок (СЭУ) комбинированных пропульсивных комплексов (КПК). СППР построена с использованием системного анализа, оптимизации и технологий моделирования, реализованных на базе DMI-моделей судов. При совершенствовании СППР был применен метод взаимной имплементации характеристических пространственных векторов энергетических процессов в СЭУ и гидродинамических в КПК

Ключевые слова: судовая энергетическая установка, пропульсивный комплекс, моделирование, процесс передачи мощности, принятия решения

УДК 629.5.065.23:62–523.8

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.72543

КОНЦЕПЦІЯ СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ

В. В. Будашко

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: bvv@te.net.ua

В. В. Нікольський

Доктор технічних наук, професор**

E-mail: vit_nik@ukr.net

О. А. Онищенко

Доктор технічних наук, професор*

E-mail: olegoni@mail.ru

С. Г. Хнюнін

Старший викладач**

E-mail: serg@fa.onma.edu.ua

*Кафедра технічної експлуатації флоту***

Кафедра теорії автоматичного керування та обчислювальної техніки*

***Національний університет «Одеська морська академія» вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, Україна, 65029

1. Вступ

В останні десятиліття 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 оптимальних комбінованих пропульсивних комплексів (КПК) і суднових енергетичних установок (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-валопровод-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 заснований на його результатах експлуатаційні і техніко-економічні розрахунки. Результати таких досліджень, як правило, публікують

ються 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 [1].

Наприклад, визначення буксировочної і встановленої потужності і буксирувального опору спроектованого судна з достатньою для практики точністю 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 буксирного опору суден з обводами, встановленої потужності СЕУ, динамічних характеристик КПК тощо, побудованими за правилами даної серії або мало від них відмінними [2]. 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.

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 [3].

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, описаної 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 [4, 5].

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 введеної 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 програмістові можливість проводити не тільки визначення буксировочної і встановленої потужностей, оптимального рушія, а й підбирати необхідні компоненти СЕУ. Використання сучасних методів

підвищує культуру проектування, 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, динамічного позиціонування (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 %). За способом управління поступальним рухом 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 проти-лежного 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.

Управління поступальним рухом судна або утримання судна у заданій позиції здійснюється комбінованим способом із застосування систем розподілу потужності (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). За-

стосування СППР повинно забезпечити ґрунтовний та об'єктивний аналіз предметної області при прийнятті рішень в умовах постійного розвитку та ускладнення СЕУ КПК [6–8]. За підтримки обчислювальних засобів СППР у різноманітні підходи повинна надати можливість безпосередньо проектувати, обирати та порівнювати альтернативні варіанти рішень.

Технології, критеріїв і, як наслідок, методів, застосовуваних в СППР при проектуванні СЕУ КПК, велика кількість. І вибір того чи іншого шляху з кінцевою метою отримання ранжування альтернативних рішень повинен спиратися на вихідні дані, знання і результати, отримані в процесі прийняття рішень.

З іншого боку, нестача висококваліфікованих кадрів у зв'язку з відтоком їх з науково-дослідних установ, підвищення вимог до інтенсивності і якості виробництва, конкуренція у секторі проектування і будівництва СЕУ КПК – це ті додаткові чинники, що обумовлюють актуальність СППР. Застосовувані в даній області методи і засоби моделювання не відповідають в повній мірі сучасним проблемам. У той же час дослідження в області штучного інтелекту та експертних систем зокрема показали ефективність застосування для таких випадків інтелектуальних СППР, заснованих на експертних знаннях. Однак в області забезпечення енергетичної ефективності спроектованих СЕУ КПК, особливо у режимах динамічного позиціонування, завдання розробки і промислового застосування СППР залишається невирішеною.

Таким чином можна констатувати, що розробка СППР у галузі проектування і дослідження СЕУ КПК, з впровадженням її складових у енергетичні процеси з метою підвищення ефективності прийнятих рішень, є актуальною проблемою, особливо при виборі тієї чи іншої конструкції КПК, налагодження різноманітних регуляторів, що сприяють удосконаленню експлуатаційних режимів судна.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

При вирішенні проблем системного підходу при прийнятті рішень у дослідницьких роботах при проектуванні СЕУ КПК виникає ряд невизначеностей [9], 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 і предметів, а також відсутність або

недоступність авторитетних підтверджень про достовірність існуючої інформації.

Окрім перелічених, можна зауважити на:

- невизначеності структур і параметрів моделей досліджуваних СЕУ КПК;

- складнощам 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 невизначеними методами 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.

У [10] розробка і реалізація СЕУ КПК в режимі DP за допомогою моделювання апаратної петлі у контролері регулювання оборотів гребного двигуна реалізована, але залишилися проблеми динамічного навантаження математичної моделі та практичної реалізації роботи.

Проблема топології та проектування силових перетворювачів розглядається авторами у [11], але оцінка ефективності, дизайн і потенційні експлуатаційні характеристики при застосуванні у СЕУ КПК залишилися невирішеними. Також без відповіді 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, посилюючи 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, ДМІ-моделей, оптимізаційних, імітаційних); в залежності від типів даних, з якими СППР буде працювати – стратегічною, орієнтованою на аналіз значних обсягів різноманітної інформації з альтернативних джерел [12].

У [13] питання розробки сучасної СППР СЕУ КПК були 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 [14] 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 [15] авторами було 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 було 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 обґрунтувати прийняті рішення, використовуючи удосконалюючи фактори при модернізації СЕУ КПК і підвищувати їх ефективність. СППР повинна будуватися на багатовимірних принципах представлення та аналізу даних [16].

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 – 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 [17].

Для функціонального структурування СППР при проектуванні СЕУ КПК здебільш застосовують когнітивний процес (табл. 1) [18].

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 проектуванні і дослідженні СЕУ КПК, яка дасть можливість: керувати даними; мати достатню кількість необхідної інформації про прийняті рішення, що приходять вихідні припущення, кількісні та якісні оцінки; керувати обчисленнями і моделюванням, включаючи в собі гнучкість

та можливість генерування ДМІ-моделей СЕУ і КПК; 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 даними.

Таблиця 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

3. Мета і задачі дослідження

Мета проведених досліджень – синтез системи підтримки прийняття рішень при проектуванні суднових енергетичних установок (СЕУ) комбінованих пропульсивних комплексів (КПК), необхідної для удосконалення спливаючих у СЕУ КПК енергетичних процесів.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні задачі:

- постановка і декомпозиція задач стосовно СППР при проектуванні і дослідженні енергетичних процесів у СЕУ КПК із визначенням експлуатаційних і комбінаторних обмежень та обґрунтування функціональних можливостей СППР при проектуванні і дослідженні СЕУ КПК;

- забезпечення функціональної відповідності етапів моделювання процесів передачі потужностей, композиції експлуатаційних режимів і критеріїв оцінки ефективності СЕУ КПК, інформаційного корегування, автоматизації аналізу з можливістю логічних висновків, підтримки представлення результатів та вдосконалення якості прийнятого рішення;

- розробка методів і способів удосконалення прийнятого рішення з точки зору підвищення ефективності СЕУ КПК, розробки елементів програмного середовища та їх апробації при імітаційному моделюванні, у

реальних умовах під час ходових випробувань і лабораторних дослідженнях.

4. Постановка і декомпозиція задач при зазначенні граничних умов і критеріїв

Виконуючи декомпозицію головної мети було 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 сформувався динаміка вирішення задач у спосіб послідовного інтерактивного аналізу ситуаційних даних, коли сформована проблема, або її відсутність, розглядається як наслідок вирішення або ускладнення (уточнення) попередньої.

Досягаючи ситуаційних цілей були сформовані і об'єднані критерії вибору рішень, заснованих на множині як самих СЕУ КПК так і експлуатаційних режимів у яких вони працюють. У деяких випадках при цьому виникали проблеми знань, при вирішенні яких втрачалась чіткість стратегії і правил вибору альтернативного критерію. Виходячи з того що більшість критеріїв мають числовий характер, виникла 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*) [19, 20]:

$$C_{F_{lh}} = \frac{F_L(V,n) - T_{ux}(V,n) - F_L(V,0)}{T_u(V,n)}, \tag{1}$$

$$C_{F_{rh}} = \frac{F_T(V,n) - T_{uy}(V,n) - F_T(V,0)}{T_u(V,n)}, \tag{2}$$

$$C_{N_h} = \frac{N(V,n) - T_{uy}(V,n)X_p - T_{ux}(V,n)Y_p - N(V,0)}{T_{uy}(V,n)X_p - T_{ux}(V,n)Y_p}, \tag{3}$$

де $F_L(V,n)$, $F_T(V,n)$ і $N(V,n)$ – загальні сили (Н), що діють на судно за умови відсутності інших зовнішніх збурень при швидкості потоку v (м/с) і відповідного числа обо-

ротів ГФК n (об/хв); $F_L(V,0)$, $F_T(V,0)$ і $N(V,0)$ – відповідні сили (Н) у випадку нерухомого гвинта (наприклад, течія); $T_{uy}(V,n)$ і $T_{ux}(V,n)$ – тяги (Н) 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 [21]:

$$P_{AD} = \eta_{TRM} \cdot 2\pi \cdot Q_{AD} \cdot n, \tag{4}$$

де η_{TRM} – КПД трансмісії, Q_{AD} – момент на валу АД, Нм, і враховуючи вирази (1)–(4), для площини *surge*, отримаємо:

$$H_{pr_surge} = \frac{\int_0^L (|(Q_{AD_{F_L}}(l) - Q_{AD_{ux}}(l)|n) - Q_{AD_{F_L}}) dl}{\int_0^L (|(Q_{AD_{F_L}}(l) - Q_{AD_{ux}}(l)|n) - Q_{AD_{F_L}}) dl + \sum_{j=1}^n \int_0^L \Delta Q_j(l) dl} \cdot \eta_{TRM} \tag{5}$$

Аналогічно получимо вирази для розрахунку ефективності АД для двох інших площин:

$$H_{pr_sway} = \frac{\int_0^T (|(Q_{AD_{F_T}}(t) - Q_{AD_{uy}}(t)|n) - Q_{AD_{F_T}}) dt}{\int_0^T (|(Q_{AD_{F_T}}(t) - Q_{AD_{uy}}(t)|n) - Q_{AD_{F_T}}) dt + \sum_{j=1}^n \int_0^T \Delta Q_j(t) dt} \cdot \eta_{TRM} \tag{6}$$

$$H_{pr_yaw} = \frac{\iint_{XY} (|(Q_{AD_N}(t) - Q_{AD_{uy}}(t)) - Q_{AD_{ux}}(t)|n) dt}{\iint_{XY} (|(Q_{AD_N}(t) - Q_{AD_{uy}}(t)) - Q_{AD_{ux}}(t)|n) dt + \sum_{X=Y}^X \iint_{XY} \Delta Q_{XY}(t) dt} \cdot \frac{Q_{AD_T} dt}{\iint_{XY} (|(Q_{AD_N}(t) - Q_{AD_{uy}}(t)) - Q_{AD_{ux}}(t)|n) dt + \sum_{X=Y}^X \iint_{XY} \Delta Q_{XY}(t) dt} \cdot \frac{Q_{AD_N} dt}{\iint_{XY} (|(Q_{AD_N}(t) - Q_{AD_{uy}}(t)) - Q_{AD_{ux}}(t)|n) dt + \sum_{X=Y}^X \iint_{XY} \Delta Q_{XY}(t) dt} \tag{7}$$

З іншого боку, для перспективних концепцій СЕУ КПК з гібридними судновими установками з гвинтами протилежного обертання (англ. *Contra-Rotating Pod – CRP*), 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 критерію гідродинамічної подібності Ньютона, підставивши в це рівняння силу тяжіння, $G=mg$:

$$\frac{v_S^2}{g_S \cdot l_S} = \frac{v_M^2}{g_M \cdot l_M}, \quad (8)$$

де v – швидкість потоку, що набігає, м/с; g – сила тяжіння, м/с²; l – довжина, м, відповідно (_S) – судна і (_M) – моделі.

З рівняння (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_c для моделі і судна.

Справді, опір корабля складається як з опору тертя, так і з хвильового опору, зобов'язаного своїм походженням хвилям, що утворюються 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 випробування необхідно буде проводити у тому ж середовищі застосувати туж воду, а опір тертя визначати за особливими дослідницькими формулами, а залишковий ж опір – хвильовий – 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 [22], 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 :

$$F_{r\Delta} = \frac{v}{\sqrt{g^3 \Delta}} = F_r \sqrt{\lambda}, \quad (9)$$

де λ – коефіцієнт повздовжньої гостроти корпусу (рис. 1) [23].

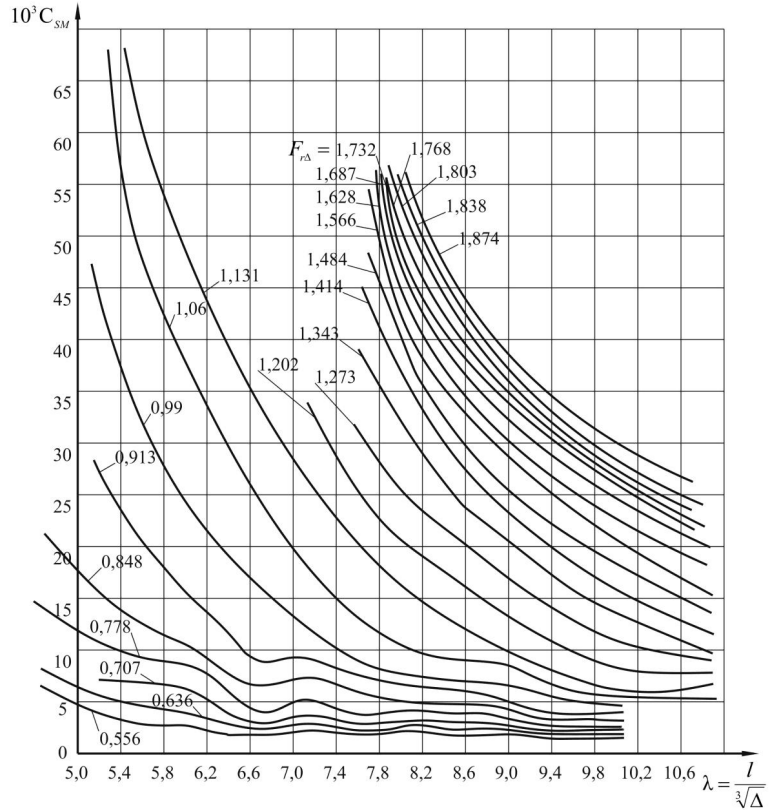


Рис. 1. Експериментальні залежності відношень опору на тонну водотоннажності в функції коефіцієнту повздовжньої гостроти корпусу судна і числа Фруда

Якщо для натурних умов і умов випробування моделі прискорення сили тяжіння $g_S \neq g_M$, то з (8) виходить:

$$\frac{v_S}{v_M} = \sqrt{\frac{l_S \cdot \rho_1}{l_M \cdot \rho_2}} = \sqrt{\lambda_{SM}}, \quad (10)$$

де ρ_1, ρ_2 – щільності середовищ, кг/м³, тобто швидкість модельного потоку води повинна бути зменшена в $\sqrt{\lambda_{SM}}$ за умови дотримання критерію Архімеда для натурного середовища і середовища моделювання.

Так, упори гвинтів моделі і судна повинні знаходитися в залежності:

$$\frac{T_S}{T_M} = \frac{n_S \cdot v_S}{n_M \cdot v_M} = \lambda_{SM}^2 \sqrt{\lambda_{SM}} = \lambda_{SM}^{2.5}, \quad (11)$$

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.

Відношення моментів на валах гвинтів, а отже і споживаних приводними двигунами потужностей, з огляду на співвідношення (8)–(11), так само:

$$\frac{Q_S}{Q_M} = \frac{D_S \cdot v_S}{D_M \cdot v_M} = \lambda_{SM}^{2.5} \sqrt{\lambda_{SM}} = \lambda_{SM}^3, \quad (12)$$

де D_S, D_M – діаметри гвинтів, м.

Аналогічно через лінійний масштаб можна вивести значення масштабних коефіцієнтів для інших параметрів.

4.1. 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 [24, 25].

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, що впливають на прийняття рішень.

Наприклад, показник резервування судових 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, судовласником, тому доцільно виключити головні двигуни з числа факторів показника резервування.

Кількість основних джерел електричної енергії вибираються за результатами розрахунку потужності судової 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 забезпечувати 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 уточнюється. 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 [26] 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 судах довжиною понад 100 м повинен бути передбачений принаймні один аварійний пожежний насос.

І у цьому випадку виконані аналізи [27] 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 баластову систему та працюючий у режимі DP. Другий насос може бути баластовим, санітарним, загальносуднового призначення, з водоструминним або пароструйним ежектором і не включатися у процес підрахунку потужності СЕУ. Іншими словами, можна констатувати, що згідно аналізу [28], 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 було б 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 та цілому ринку.

Наступним етапом постає висвітлення первинних (вихідних) процесів при проектуванні і дослідженні СЕУ КПК, тобто опису фізичних процесів, з якими необхідно буде взаємодіяти ЛПР.

4. 2. Технологія реалізації СППР СЕУ КПК 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 повинні 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. 2 [29, 30].

У відповідності до наведеної класифікації (рис. 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, що класифікація, представлена на рис. 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. Безумовно, що, представлена на рис. 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 визначених правил, що ґрунтуються на перевірених даних з ухвалення рішення у цьому напрямку і були зібрані шляхом декомпозиції конкретної експлуатаційної проблеми, які б дозволили реалізувати розроблену СЕУ КПК з найменшими ризиками щодо експлуатаційної неефективності.



Рис. 2. Класифікація математичного апарату СППР при проектуванні та дослідженні СЕУ КПК

5. Комп'ютерне моделювання процесів у СЕУ КПК як складова частина СППР

На рис. 3 представлено комп'ютерну модель для налаштування конфігурації ПП на прикладі КПК судна типу *Supply Vessel*.

Згідно методики, що описана у [31, 32] було створено комп'ютерну модель ідентифікації параметрів (рис. 3) судна типу *Supply Vessel* текст *m*-файлу якої наведено у пункті 5 результатів досліджень.

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

$$\tau_T = T_{matrix} K_{Tmatrix} u_T, \tag{13}$$

де T_{matrix} – матриця конфігурації ПП (16–19); $K_{Tmatrix}$ – матриця коефіцієнтів упору гвинтів (15); u_T – вектор змінних упорів ПП, що прикладені до судна (14).

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

$$u_T = [|p_{D1} - p_{D10}| (p_{D1} - p_{D10}), |p_{D2} - p_{D20}| (p_{D2} - p_{D20}), \dots, |p_{Dk_{TR}} - p_{Dk_{TR}0}| (p_{Dk_{TR}} - p_{Dk_{TR}0})]^T, \tag{14}$$

де p_{D10} ($i0=1...k_{TR}$) – крокове відношення гвинта окремого ПП, максимальна кількість яких визначається числом k_{TR} .

Коефіцієнти упорів гвинтів визначаються діагональною матрицею:

$$K_{Tmatrix} = \begin{pmatrix} K_{T1}(n_1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & K_{T2}(n_2) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & K_{Tr}(n_r) \end{pmatrix}, \tag{15}$$

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

Сили упорів ПП, що визначаються вектором (13), розподіляються на продовжні, поперечні та кутові (нишпорення) складові матрицею конфігурації ПП. Наприклад, на судні типу *Supply Vessel* встановлено чотири азимутальних ПП (два головних та два допоміжних, що розташовано між діаметральною площиною та носовою частиною і висуваються 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:

$$T_{matrix(0)} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_{A1} & \cos \alpha_{A2} & \cos \alpha_{A3} & \cos \alpha_{A4} & 0 \\ \sin \alpha_{A1} & \sin \alpha_{A2} & \sin \alpha_{A3} & \sin \alpha_{A4} & 1 \\ l_{T1} \sin \alpha_{A1} & l_{T2} \sin \alpha_{A2} & l_{T3} \sin \alpha_{A3} & l_{T4} \sin \alpha_{A4} & l_{T5} \end{pmatrix}, \tag{16}$$

де l_{Ti} ($i=1...5$) – 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, було протестовані ще три можливих конфігурації ПП, які визначаються відповідними матрицями $T_{matrix(1)}$ (17); $T_{matrix(2)}$ (18); $T_{matrix(3)}$ (19).

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:

$$T_{matrix(1)} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \cos \alpha_{A3} & 0 \\ 0 & 0 & \sin \alpha_{A3} & 1 \\ l_{T1} & -l_{T2} & l_{T3} \sin \alpha_{A3} & l_{T4} \end{pmatrix}. \tag{17}$$

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):

$$T_{matrix(2)} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_{A6} \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & \sin \alpha_{A6} \\ l_{T1} & -l_{T2} & -l_{T3} & -l_{T4} & l_{T5} & l_{T6} \sin \alpha_{A6} \end{pmatrix}. \tag{18}$$

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):

$$T_{matrix(3)} = \begin{pmatrix} \cos \alpha_{A1} & \cos \alpha_{A2} & 0 & \cos \alpha_{A4} & 0 \\ \sin \alpha_{A1} & \sin \alpha_{A2} & 1 & \sin \alpha_{A4} & 1 \\ l_{T1} \sin \alpha_{A1} & l_{T2} \sin \alpha_{A2} & -l_{T3} & l_{T4} \sin \alpha_{A4} & l_{T5} \end{pmatrix}. \tag{19}$$

Моделювання проводилися у комп'ютерній лабораторії MatLab Simulink. Змінюючи параметри матриць конфігурації ПП, взаємного розташування азимутальних пристроїв та їхнього положення відносно діаметральної площини судна, а також крокового відношення гвинтів отримали графіки XY-координат та кута нишпорення судна.

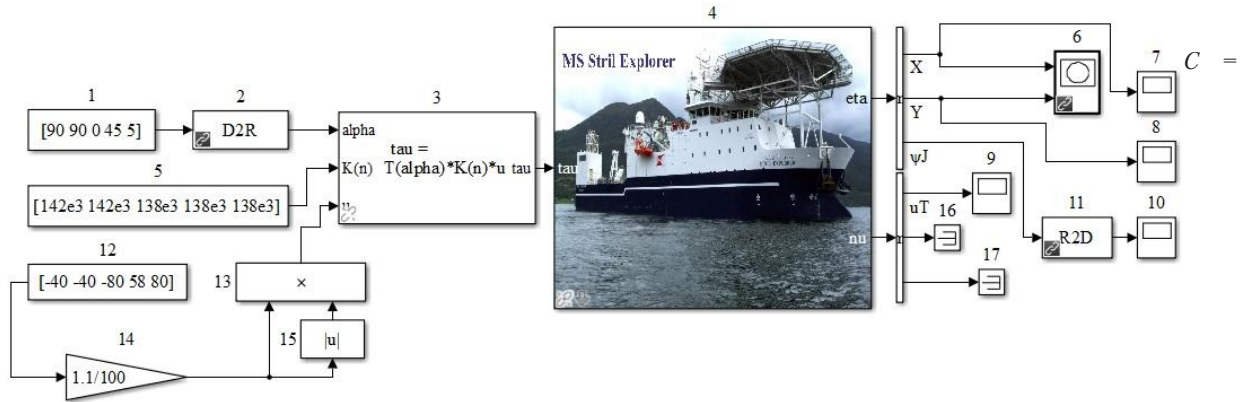


Рис. 3. Комп'ютерна модель у MatLab Simulink конфігурації підрулюючих пристроїв для судна типу *Supply Vessel*.
 1 – завдання кута розташування азимутальних пристроїв відносно діаметральної площини судна α_A , град.; 2 – блок перетворення градусів у радіани; 3 – модель КПК; 4 – модель ідентифікації параметрів судна; 5 – завдання коефіцієнту упору гвинта, K_T ; 6 – плоттер XY-координат, в. о.; 7 – 10 – осцилографи, що фіксують: XY-координати судна, м; значення середньозваженого упору, що прикладено до судна η_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 $p_D = H_p/D$, де D – діаметр гвинта, м; 15 – блок розрахунку абсолютної величини; 16, 17 – пристрої поглинання вихідних сигналів моделі судна, що не відстежуються

6. Результати досліджень поведінки судна при різних параметрах пропульсивного комплексу

Для різних типів суден були розроблені *m*-файли ідентифікаційних параметрів для подальшої імплементації у просторову модель СЕУ з метою отримання оптимальних с точки зору мінімізації XY-переміщення.

m-файл ідентифікації параметрів судна типу *Supply Vessel*, що знаходиться у режимі динамічного позиціонування, наведено далі по тексту:

```
function xdot = supply_vessel(x,Ttau)
%функція xdot = supply_vessel(x,Ttau) повертає похідну швидкості за часом xdot = E*Ttau + F*x вектору стану: x=[u v r x y psi]' для Supply Vessel довжиною L=76 м.
% Модель для нульової швидкості (DP).
% u = швидкість повздовжнього переміщення, м/с
% v = швидкість бокового переміщення, м/с
% r = швидкість нищпорення, рад/с
% x = позиція у x-напрямку, м
% y = позиція у y-напрямку, м
% psi = кут нищпорення, рад
% Ttau = [X, Y, N]' вектор упору/моменту
% Параметри судна
Ls = 76.4; % довжина судна, м
gs = 9.8; % прискорення сили тяжіння, м/с^2
tonn = 3657e3; % маса, кг
Tm = diag([1 1 1 Ls]);
Tminv = diag([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
K = (tonn*Tminv^2)*(Tm*Kmod*Tminv);
```

$$(tonn \cdot T_{minv}^2) \cdot (\sqrt{g_s/L_s}) \cdot T_m \cdot C_{mod} \cdot T_{minv};$$

```
F = [ zeros(3,3) eye(3)
      zeros(3,3) -inv(K)*C ];
E = [ zeros(3,3); inv(K) ];
% Визначення похідної стану
xdot = E*Ttau + F*x;
```

На рис. 4, 5, відповідно показані графіки зміни XY-координат та кута нищпорення ψ_j 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.

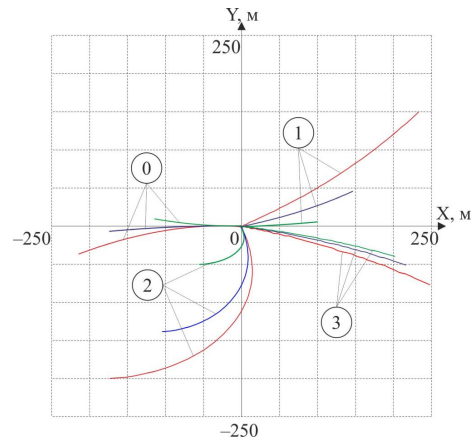


Рис. 4. Зміна координат судна типу *Supply Vessel*, довжиною 76 м, при різній конфігурації ПП: 0–3 – номери відповідних конфігурацій (16)–(19): — — взаємно-перпендикулярне розташування осей основних і допоміжних гребних гвинтів з незмінними значеннями крокових відношень і коефіцієнтів упорів; — — взаємно-перпендикулярне 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

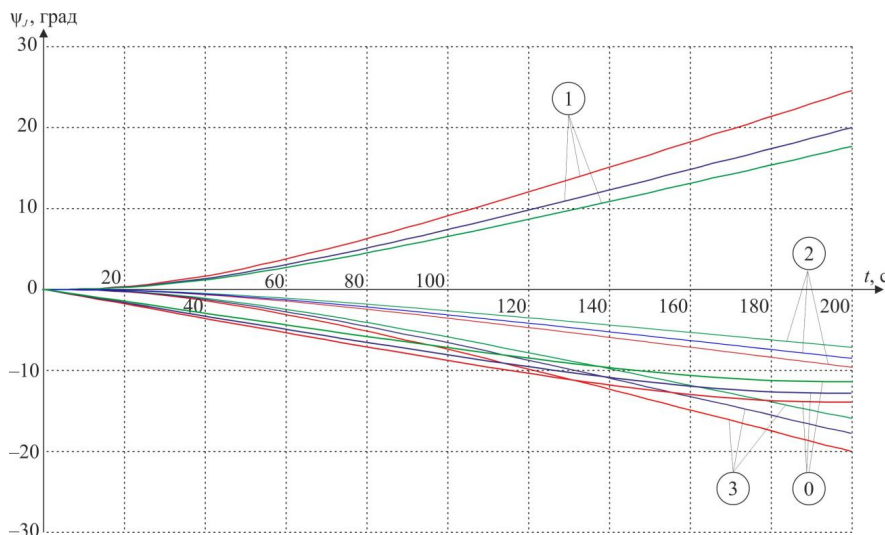


Рис. 5. Графіки залежності кута нищпорення судна типу *Supply Vessel*, довжиною 76 м, у функції часу: 0–3 – номери відповідних конфігурацій (16)–(19):
 — — взаємно-перпендикулярне розташування осей основних і допоміжних гребних гвинтів з незмінними значеннями крокових відношень і коефіцієнтів упорів;
 — — 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. 4, 5 можна зробити висновки, що оптимальною з точки зору мінімуму зсуву судна у ХУ-площині є конфігурація ПП № 2, яка визначається матрицею (18).

6. Висновки

1. 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 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.

2. 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 ДМІ-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.

3. Також було встановлено, 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.

Експериментальні дослідження для застосованих конфігурацій ПП планується проводити на фізичній моделі КПК [33–36].

Література

1. 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*. – 2002. – Vol. 33, Issue 2. – P. 111–126. doi: 10.1016/s0167-9236(01)00139-7
2. 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, 2013. doi: 10.2514/6.2013-500
3. 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*. – 2015. – Vol. 5, Issue 2. – P. 61–69. doi: 10.1049/iet-est.2013.0011
4. 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*. – 2014. – Vol. 136, Issue 12. – P. 121402. doi: 10.1115/1.4028282
5. Pereira, F. C. Text analysis in incident duration prediction [Text] / F. C. Pereira, F. Rodrigues, M. Ben-Akiva // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. – 2013. – Vol. 37. – P. 177–192. doi: 10.1016/j.trc.2013.10.002

6. Cwilewicz, R. Prognosis of marine propulsion plants development in view of new requirements concerning marine fuels [Text] / R. Cwilewicz, Z. Gorski // Journal of KONES Powertrain and Transport. – 2014. – Vol. 21, Issue 2. – P. 61–68. doi: 10.5604/12314005.1133866
7. Scherer, T. The Evolution of Machinery Control Systems Support At the Naval Ship Systems Engineering Station [Text] / T. Scherer, J. Cohen // Naval engineers journal. – 2011. – Vol. 123, Issue 2. – P. 85–109. doi: 10.1111/j.1559-3584.2011.00321.x
8. Yutao, C. Integrated Design Platform for Marine Electric Propulsion System [Text] / C. Yutao, Z. Fanming, W. Jiaming // Energy Procedia. – 2012. – Vol. 17. – P. 540–546. doi: 10.1016/j.egypro.2012.02.133
9. Vrijdag, A. Estimation of uncertainty in ship performance predictions [Text] / A. Vrijdag // Journal of Marine Engineering & Technology. – 2014. – Vol. 13, Issue 3. – P. 45–55. doi: 10.1080/20464177.2014.11658121
10. Jutao, C. Design and implementation of Marine Electric Propulsion Dynamic Load Simulation System [Text] / C. Jutao, Z. Huayao, Y. Aibing // 2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2008. – P. 483–488. doi: 10.1109/iciea.2008.4582562
11. 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. – Vol. 25, Issue 6. – P. 1497–1508. doi: 10.1109/tpel.2009.2037961
12. 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. Tarnaveanu // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2013. – Vol. 2, Issue 3. – P. 813–836. doi: 10.3390/ijgi2030817
13. Yipeng, G. Computer based concurrent design and realization of simulated training system for marine electric propulsion system [Text] / G. Yipeng, Z. Fanming, C. Yutao // 2010 2nd International Conference on Industrial and Information Systems. – 2010. – Vol. 2. – P. 511–513. doi: 10.1109/indusis.2010.5565766
14. 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, 2011. – P. 1–6. doi: 10.1109/vppc.2011.6043005
15. Wei, C. Dynamic Simulation and Control Strategy for Three-Shaft Marine Electric Propulsion Gas Turbine [Text] / C. Wei, S. Zang // Vol. 3: Controls, Diagnostics and Instrumentation; Cycle Innovations; Marine, 2010. – P. 1099–1104. doi: 10.1115/gt2010-23796
16. Power, D. J. Model-driven decision support systems : Concepts and research directions [Text] / D. J. Power, R. Sharda // Decision Support Systems. – 2007. – Vol. 43, Issue 3. – P. 1044–1061. doi: 10.1016/j.dss.2005.05.030
17. Zhang, J. Functional Mechanism: Regression Analysis under Differential Privacy [Text] / J. Zhang, Z. Zhang, X. Xiao, Y. Yang, M. Winslett // Proceedings of the VLDB Endowment. – 2012. – Vol. 5, Issue 11. – P. 1364–1375. – Available at: http://vldb.org/pvldb/vol5/p1364_junzhang_vldb2012.pdf doi: 10.14778/2350229.2350253
18. 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, 2009. – P. 1–13. doi: 10.1002/sys.20147
19. Babadi, M. K. Effect of hull form coefficients on the vessel sea-keeping performance [Text] / M. K. Babadi, H. Ghassemi // Journal of Marine Science and Technology. – 2013. – P. 594–604. – Available at: <http://jmst.ntou.edu.tw/marine/21-5/594-604.pdf>
20. 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. – 2014. – Вып. 29. – С. 6–13. – Режим доступа: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22822710> – 13.05.2016.
21. 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
22. 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. – 2016. – Vol. 75. – P. 28–47. doi: 10.1016/j.compgeo.2016.01.018
23. 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), 2010. – P. 1–15. – Available at: http://data.hiper-conf.info/Hiper2010_Melbourne.pdf – 13.05.2016.
24. Будашко, В. В. Математическое моделирование всережимных регуляторов оборотов подруливающих устройств судовых энергетических установок комбинированных пропульсивных комплексов [Текст] / В. В. Будашко, Е. А. Юшков // Электронное моделирование. – 2015. – Т. 37, № 2 (2015). – С. 101–114. – Режим доступа: <http://www.emodel.org.ua/index.php/ru/44-archive/2015-год/37-2/594-37-2-8.html> – 13.05.2016.
25. Глазева, О. В. Аспекти математичного моделювання елементів єдиних електроенергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів [Текст]: зб. наук. пр. / О. В. Глазева, В. В. Будашко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2015. – № 42 (1151). – С. 71–75.
26. 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. – P. 1–8. doi: 10.1155/2013/831560
27. 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. – Vol. 7, Issue 1. – P. 100–105. doi: 10.2174/1874444301507010098

28. Bekker, J. R. A Packaged System Approach to DP Vessel Conversion [Text] / J. R. Bekker, S. X. Dou // Dynamic positioning conference: Workboats, 2002. – 22 p.
29. Бодашко, В. В. Імплементарний підхід при моделюванні енергетических процесов динамічески позиціонуєуючого судна [Текст] / В. В. Бодашко // Електротехніка і Електромеханіка. – 2015. – № 6. – С. 20–25.
30. Бодашко, В. В. Удосконалення системи управління підрулюючим пристроєм комбінованого пропульсивного комплексу [Текст]: зб. наук. пр. / В. В. Бодашко, О. А. Онищенко / Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – 2014. – № 38 (1081). – С. 45–51. – Режим доступа: http://library.kpi.kharkov.ua/Vestnik/2014_38.pdf – 13.06.2016.
31. Fossen, T. I. Identification of dynamically positioned ships [Text] / T. I. Fossen, S. I. Sagatun, A. J. Sorensen // Control Engineering Practice. – 1999. – Vol. 4, Issue 3. – P. 369–376. doi: 10.1016/0967-0661(96)00014-7
32. Вагущенко, Л. Л. Системи автоматического управління движением судна. 3-є изд., перераб. и доп. [Текст] / Л. Л. Вагущенко, Н. Н. Цымбал. – Одесса: Фенікс, 2007. – 328 с.
33. 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), 2015. – P. 49–53.
34. 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), 2015. – P. 45–49.
35. Патент UA на корисну модель № 100819. Суднова система моніторингу для попередження ефекту Коанда [Електронний ресурс] / Бодашко В. В., Нікольский В. В., Хнюнин С. Г. – 2015. – Режим доступу: <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=215069>. – 13.05.2016.
36. Бодашко, В. В. Физическое моделирование многофункционального пропульсивного комплекса [Текст]: зб. наук. пр. / В. В. Бодашко, О. А. Онищенко, Е. А. Юшков // Праці Військової академії. Технічні науки. – 2014. – № 2. – С. 88–92. – Режим доступу: http://zbirnyk.vaodessa.org.ua/images/zbirnyk_2/13.PDF. – 13.05.2016.