

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ  
ІМ. АДМІРАЛА МАКАРОВА**

**Кісарова Альона Ігорівна**



УДК 621.436.13: 533.666: 629.5.03(043.3)

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОПУЛЬСИВНОЇ УСТАНОВКИ  
З КАЙТОМ ШЛЯХОМ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ПАРАМЕТРА  
УЗГОДЖЕННЯ ДЛЯ АДАПТАЦІЇ МАЛООБЕРТОВОГО ДВИГУНА**

Спеціальність 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

**Автореферат**  
дисертацій на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Миколаїв – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник** кандидат технічних наук, професор  
**Шостак Володимир Павлович,**  
Національний університет  
кораблебудування імені адмірала Макарова  
Міністерства освіти і науки України, м. Миколаїв,  
професор кафедри експлуатації суднових  
енергетичних установок і теплоенергетики.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Грицук Ігор Валерійович,**  
Херсонська морська державна академія  
Міністерства освіти і науки України, м. Херсон,  
професор кафедри експлуатації суднових  
енергетичних установок;

кандидат технічних наук, доцент  
**Щербак Юрій Георгійович,**  
Чорноморський національний державний  
університет імені Петра Могили  
Міністерства освіти і науки України, м. Миколаїв,  
доцент кафедри екології.

**Захист відбудеться** "04" грудня 2019 р. в 12:00 годин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 38.060.01 при Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: ауд. 360, просп. Героїв України 9, м. Миколаїв, 54025.

**З дисертацією можна ознайомитися** в бібліотеці Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: просп. Героїв України 9, м. Миколаїв, 54025 та на сайті спеціалізованої вченої ради за електронною адресою: <http://www.nuos.edu.ua/science/spetsializovani-vcheni-radi/spetsializovana-vchena-rada-d-38-060-01/>.

Автореферат розісланий " " 2019 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 38.060.01  
доктор технічних наук, професор

А. П. Шевцов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми дослідження.** В експлуатаційних затратах морського транспортного судна домінують затрати на паливо, що витрачається на його рух. Основний споживач палива – головний двигун (ГД), який є найбільш важливим елементом суднової пропульсивної установки (ПУ). У якості ГД на транспортних судах найчастіше застосовуються малообертові двигуни (МОД), що мають найменшу питому витрату палива. Одним із шляхів підвищення енергоефективності ПУ є мінімізація сумарних, за весь строк служби судна, витрат палива.

Сучасні МОД суттєво наблизилися до межі своєї термодинамічної досконалості, на що вказує фактична стабілізація питомої витрати палива протягом останніх 25 років. За даними компанії MAN Diesel & Turbo (MDT) подальший розвиток МОД йде по шляху їх удосконалення як елемента суднового пропульсивного комплексу, зокрема: пониження частоти обертання, що підвищує ККД гребного гвинта, адаптація їх при побудові до певних умов експлуатації. Для підвищення ефективності транспортування вантажів впроваджуються ідеї використання на судах додаткових екологічно чистих рушіїв, з яких перспективними є кайти – керовані буксируючі повітряні змії. Німецькою фірмою SkySails створені та апробовані суднові кайти площею від 80 до 640 м<sup>2</sup>. При сприятливому вітрі їх тяга може істотно знижувати навантаження ГД. Це веде до розширення діапазону його навантажень і зміщує домінуюче навантаження в область менших значень. Діапазон навантаження визначає раціональне значення параметра узгодження «двигун внутрішнього згоряння – турбокомпресор» (ДВЗ-ТК). Відповідно до цього значення при виготовленні МОД в його склад буде включено турбокомпресор (ТК) відповідної марки з певними розмірами проточних частин: соплового кільця турбіни і дифузора компресора. За даними компанії MDT у якості параметра узгодження ДВЗ-ТК виступають координати точки узгодження (matching point) на полі вибору робочих параметрів двигуна (engine layout diagram)  $L_1-L_2-L_3-L_4$  або певна програма адаптації МОД відповідно високого (High load), середнього (Part load) або низького (Low load) його навантаження. Раціональне значення параметра узгодження ДВЗ-ТК, визначене на стадії проектування судна, сприятиме мінімізації сумарної витрати палива за весь строк його служби. Однак будь-які рекомендації з цього питання стосовно транспортних суден з кайтом відсутні.

Компанія MDT дає загальні рекомендації по вибору значення параметра ДВЗ-ТК для транспортних суден з традиційною ПУ. Діапазон навантажень ГД у режимі повного ходу порівняно невеликий, і параметр для адаптації МОД приймається вольовим методом. Для комбінованої пропульсивної установки (КПУ) з кайтом такий метод прийняття проектного рішення стосовно параметра ДВЗ-ТК може суттєво збільшити витрату палива відносно можливої мінімальної. Для цього випадку в літературі не виявлено ні практичних рекомендацій, ні теоретичних рішень. Отже, процедура визначення раціонального значення параметра узгодження ДВЗ-ТК шляхом моделювання з оцінкою наслідків прийняття проектного рішення не формалізована і відноситься до невирішених завдань суднової енергетики.

Це спонукає до постановки та розв'язання, на базі математичної моделі, задачі стосовно такого значення параметра узгодження ДВЗ-ТК, при якому МОД буде адаптований найкращим чином до майбутніх умов експлуатації.

**Науково-прикладною задачею**, яка вирішується в даній дисертаційній роботі, є підвищення енергоефективності суднової ПУ шляхом розробки методики й імітаційної математичної моделі (ІММ) та визначення на їх основі раціонального параметра адаптації малообертового двигуна до майбутніх умов експлуатації транспортного судна з додатковим рушієм – кайтом, що забезпечує максимальне скорочення сумарної витрати палива за весь строк служби транспортного судна.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі експлуатації суднових енергетичних установок і теплоенергетики Машинобудівного навчально-наукового інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова відповідно до тематичного плану науково-дослідних держбюджетних і госпдоговірних робіт, зокрема відповідно до ДР № 0110U000904 «Підвищення енергоефективності та поліпшення енерговикористання в дизельних установках морських транспортних суден».

У цих роботах здобувач брала участь в якості виконавця будучи аспірантом, а потім асистентом вказаної кафедри.

**Мета дослідження** – підвищення енергоефективності КПУ з кайтом шляхом адаптації МОД до умов експлуатації транспортного судна з помірною швидкістю ходу. Адаптація полягає у виявленні й установці раціонального ТК з відповідними розмірами проточних частин, який визначається, як приписує провідна компанія MDT, за відповідним значенням параметра узгодження ДВЗ-ТК.

**Основні задачі наукового дослідження:**

1. Формалізувати критерій – сумарну витрату палива ГД за нормативний строк служби судна (НССС) з кайтом – для порівняння альтернативних значень параметра узгодження ДВЗ-ТК.

2. Удосконалити локальні методики, пов'язані з розрахунком сумарної витрати палива ГД, шляхом урахування змін в експлуатації наступних показників:

– опору руху судна через обростання і корозію його корпусу та внаслідок різних інтенсивності хвилювання і сили вітру;

– тривалості роботи кайта і його тяги завдяки коливанням швидкості та напряму вітру на рейсовій лінії;

– питомої витрати палива ГД при нестабільному навантаженні.

3. Формалізувати вихідні (початкові) дані для визначення на стадії проектування ПУ з кайтом раціонального значення параметра узгодження ДВЗ-ТК і мінімізації сумарної витрати палива ГД.

4. Розробити ІММ для визначення сумарної витрати палива ГД судна з кайтом, що включає в себе проектні дані та експлуатаційні характеристики, в тому числі і гідрометеорологічні на рейсовій лінії (в імовірно-визначеній формі); розробити програмний продукт для реалізації цієї моделі на комп'ютері.

5. Провести обчислювальний експеримент з використанням розробленої ІММ для отримання діапазонів і частот навантажень ГД, тяги гребного гвинта та кайта і сумарної витрати палива ГД.

6. Визначити раціональне значення параметра узгодження ДВЗ-ТК, яке забезпечує адаптацію МОД до очікуваного спектру його навантаження у складі КПУ з кайтом при експлуатації транспортного судна на конкретній рейсовій лінії.

**Об'єкт дослідження** – процеси в комбінованій пропульсивній установці з малообертовим двигуном і кайтом морського судна з помірною швидкістю ходу.

**Предмет дослідження** – параметр узгодження «двигун внутрішнього згоряння – турбокомпресор», раціональне значення якого забезпечує максимальне скорочення сумарної витрати палива малообертовим двигуном відповідно до умов експлуатації на конкретній рейсовій лінії середньотоннажного судна з кайтом.

**Методика і методи дослідження.** Методика дослідження полягає в створенні математичної моделі та проведенні завдяки їй машинних (на комп'ютері) експериментів в основному для визначення сумарної витрати палива ГД за весь строк служби транспортного судна з кайтом.

У якості основного метода в дисертаційній роботі прийнятий метод статистичного моделювання створюваних складних технічних систем, до яких належать і проєктовані пропульсивні установки морських транспортних суден. Метод, стосовно даного дослідження, передбачає використання зворотних інтегральних функцій розподілу значень ймовірнісних аргументів цільової функції та розрахунок масиву можливих значень цієї функції з використанням генератора випадкових рівномірно розподілених чисел.

Також у дисертаційній роботі використані:

- метод узагальнення статистичних даних з аналітичним визначенням характерних залежностей, у тому числі й імовірнісних величин;
- графоаналітичний метод подання, аналізу та інтерпретації результатів.

**Наукові результати, які автор захищає, та їх новизна.**

**Вперше:**

- розроблено ІММ з генератором рівномірно розподілених чисел для визначення цільової функції – сумарної витрати палива ГД з альтернативним значенням параметра узгодження «ДВЗ-ТК» стосовно транспортного судна з кайтом на стадії його проєктування; частина аргументів цієї функції – випадкові величини з законами розподілу їх значень у вигляді зворотних інтегральних функцій;

- розширено сферу застосування відомих методик для визначення опору руху судна, тяги кайта та питомої витрати палива шляхом урахування змін рівня обростання й корозії корпусу судна, інтенсивності хвилювання, сили вітру, їх напрямів, навантаження головного двигуна і температур забортної води і повітря;

- встановлено вплив площі кайта на раціональне значення параметра узгодження ДВЗ-ТК, згідно з яким, за рекомендаціями компанії MDT, визначається турбокомпресор із конкретними розмірами проточних частин, що забезпечує відповідну адаптацію МОД до умов експлуатації на конкретній рейсовій лінії;

- показано, що найбільший ефект завдяки визначенню раціонального параметра узгодження ДВЗ-ТК має місце при лінійному судноплаванні суден зі швидкістю ходу ~13,5 вузлів, характерною для сучасних балкерів і танкерів;

- встановлено, що раціональне значення параметра узгодження ДВЗ-ТК як визначального параметра для адаптації МОД суттєво відрізняється від загальноприйнятого і забезпечує економію сумарної витрати палива для середньотоннажного судна з кайтом 640 м<sup>2</sup> порядку 4 %, якщо: а) комерційна швидкість ходу помірна, тобто 13...14 вуз; б) експлуатація відповідає лінійному

судноплавству зі сталюю середньою швидкістю ходу; в) вітровий потенціал рейсової лінії сприятливий для роботи кайта, що має місце на трансатлантичній та транстихоокеанській рейсових лініях;

– встановлено, що оптимальна точка узгодження двигуна (matching point of engine), яка лежить у полі вибору параметрів на обтяженій гвинтовій характеристиці МОД, при застосуванні кайта з більшою площею інтенсивно зміщується в область менших значень потужності. Так, для середньотоннажного танкера зі сталюю середньорейсовою швидкістю ходу 13,7 вуз на трансатлантичній лінії координата цієї точки по навантаженню двигуна дорівнює: 80 % – кайт відсутній; 73 % – застосовується кайт площею 160 м<sup>2</sup>; 61 % – застосовується кайт площею 640 м<sup>2</sup>, що нижче загальноприйнятих рекомендацій (81...95 %);

– виявлено суттєвий вплив комерційної швидкості ходу, що задається, на раціональне значення параметра узгодження ДВЗ-ТК, відповідно до якого координата точки узгодження при вище зазначених умовах і кайті 640 м<sup>2</sup> становить при швидкості ходу 13 вуз – 58 %, при 13,7 вуз – 61 % і при 14,7 вуз – 85 %;

– показано, що при існуючій інформаційно-методичній базі на стадії проектування ПУ доцільно визначати розрахунковим шляхом (а не приймати вольовим методом) раціональне значення параметра узгодження ДВЗ-ТК, яке забезпечує вибір турбокомпресора з відповідними розмірами проточних частин.

#### ***Отримали подальший розвиток:***

– метод статистичного моделювання судових енергетичних установок, який полягає у використанні рівномірно розподілених чисел, що генеруються комбінацією як математичного способу, так і електронного;

– теорія прийняття проектних рішень в судовій енергетиці стосовно адаптації малообертових двигунів до експлуатаційних умов транспортних суден з помірними швидкостями ходу на конкретних рейсових лініях шляхом розробки та реалізації ІММ для визначення раціонального параметра узгодження ДВЗ-ТК.

#### **Достовірність отриманих у роботі результатів і висновків забезпечена:**

– застосуванням апробованих методик із сфери проектування та експлуатації морських суден і їх енергетичних установок, коректних даних щодо гідрометеорологічних параметрів у ймовірнісній формі та відомостей провідної компанії MDT по питомій витраті палива МОД;

– використанням саме ІММ зі значним числом (1000) статистичних випробувань та визначенням сумарної витрати палива за 25-річний строк служби судна як імовірної функції та її математичного сподівання (МС).

Результати розрахунків зіставлялися з даними по експлуатації судна-прототипу «Aghia Marina», на якому випробовувався кайт і яке за своїми параметрами близьке до танкера «Дмитрий Медведев». Відхилення для основних параметрів в аналогічних умовах не перевищувало 3,5 %, що вказує на високу якість розробленої ІММ. Її адекватність також підтверджується, в певній мірі, збігом відповідних даних дисертаційного дослідження з даними досліджень інституту ANWI в Едмонтоні (Institut für Seefahrt Leer).

### **Практичне значення отриманих результатів:**

– застосування розробленої та апробованої методики визначення раціонального параметра узгодження ДВЗ-ТК при проектуванні середньотоннажного судна дає інформацію для прийняття обґрунтованого рішення щодо адаптації ГД, яке забезпечує зниження, порядку 4 %, витрати палива за всю експлуатацію на рейсовій лінії зі сприятливим для кайта вітровим потенціалом;

– ефект від визначення раціонального параметра узгодження ДВЗ-ТК і застосування відповідного турбокомпресора позитивний: середньозважене зниження витрати палива МОД потужністю ~9000 кВт для танкера дедвейтом 26470 т з кайтом 640 м<sup>2</sup> – 4,3 %; очікувана економія при ціні на паливо 322 \$/т становить за 25-річний період експлуатації 2 млн дол. США, або в середньому за рік 81 тис. дол. США. Цей ефект близький до максимального, оскільки він розрахований стосовно рейсової лінії з гранично сприятливим для кайта вітровим потенціалом;

– створена і реалізована ІММ після коригування вихідних даних, в основному по корпусній частині судна, ГД, кайту та рейсовій лінії, стає прийнятною для вирішення практичних задач з адаптації головного МОД до експлуатаційних умов різних танкерів і балкерів.

**Впровадження і використання результатів досліджень.** Теоретичні та практичні результати дисертаційного дослідження використовуються в ВАТ "Чорноморсуднопроект" при обґрунтуванні проектних рішень і впроваджені в навчальний процес НУК при проведенні занять з дисциплін: «Математичне моделювання СЕУ», «Проектування СЕУ» й «Оптимізація СЕУ», використовуються в курсовому та дипломному проектуванні.

**Апробація результатів дисертації.** Основні теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи були представлені на науково-практичних семінарах кафедри ЕСЕУ та ТЕ НУК в 2005–2018 рр. і на наукових конференціях, де отримали позитивну оцінку спільноти: Міжгалузевій науково-технічній конференції, присвяченій 75-річчю кафедри суднових ДВЗ і дизельних установок СПбГМТУ «Современные проблемы развития поршневых ДВС» (2005 р.); на IV, VII, VIII Міжнародних науково-технічних конференціях «Судова енергетика: стан та проблеми» (Миколаїв, НУК, 2009 р., 2013 р., 2017 р.); на науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, присвяченій 90-річчю НУК (2010 р.); на I, III, VII, VIII Міжнародних науково-технічних конференціях «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (Миколаїв, НУК, 2010 р., 2012 р., 2016 р., 2017 р.); на Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування (СЕУТТОО-2012)» (2012 р.); на VII Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми екології та енергозбереження» (2013 р.); на Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасний стан та проблеми двигунобудування» (2014 р.); на VII Міжнародній науково-технічній конференції, присвяченій 75-річчю кафедри ССЕУ (2015 р.); на IX Миколаївських міських екологічних читаннях «Збережемо для нащадків» (2016 р.).

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 23 наукові роботи, з них 5 – статті в наукових фахових виданнях України (у тому числі 1 – в базі Scopus), 2 –

статті у збірнику наукових праць НУК та 16 – тези в збірниках науково-технічних конференцій.

**Особистий внесок здобувача** в отримання наукових результатів полягає в постановці мети, формулюванні задач дослідження, формалізації критерію порівняльної енергоефективності (ПЕЕ), у зборі, отриманні й обробці вихідної інформації, розробці укрупненої математичної моделі для визначення критерію та локальних математичних моделей, у проведенні машинних експериментів на комп'ютері, в розробці рекомендацій щодо підвищення енергоефективності суднової ПУ шляхом визначення раціонального значення параметра узгодження ДВЗ-ТК. Всі результати, наведені в дисертації, отримані самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить:

- обробка результатів дослідження щодо характеру спаду швидкості ходу транспортних суден і визначення залежності зменшення швидкості ходу внаслідок обростання та корозії для танкера типу «Дмитрий Медведев» від його віку;

- розробка укрупненої блок-схеми розрахунку палива на одиницю пройденого шляху транспортним судном і реалізація математичної моделі, що відповідає цій блок-схемі;

- розробка процедури отримання, за допомогою комп'ютера, залежності питомої витрати палива від навантаження МОД компанії MDT у вигляді полінома другого ступеня;

- подання результатів у графічному вигляді та отримання коефіцієнтів полінома для розрахунку питомої витрати палива деяких сучасних МОД з різними координатами точки узгодження;

- розробка ІММ, що включає в себе проектні та експлуатаційні дані по судну, в тому числі й гідрометеорологічні на рейсовій лінії (в імовірно-визначеній формі), та генератор псевдовипадкових чисел;

- формалізація процедури визначення корисної тяги кайта за допомогою графічної або аналітичної залежності, в якій аргументами виступають середні швидкість і кут уявного вітру;

- розрахунок ефекту від застосування кайта та раціонального ТК двигуна 6S50ME-C середньотоннажного танкера в колових рейсах у Північній Атлантиці.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з наступних структурних елементів: титульного аркуша, анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та 7 додатків. Загальний обсяг з додатками становить 213 сторінок, обсяг основного тексту – 174 сторінок з анотацією на 20 сторінках, 44 рисунків (6 – на окремих сторінках), таблиць – 13 (1 – на окремій сторінці). Список використаних джерел містить 134 найменування на 13 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

Дисертація присвячена вирішенню науково-практичної задачі підвищення енергоефективності суднової ПУ за рахунок раціональної адаптації МОД до майбутніх умов експлуатації транспортного судна з додатковим рушієм – кайтом.



У **вступі** обґрунтована актуальність теми, сформульовані об'єкт і предмет дослідження, мета й основні завдання, наведені методи дослідження, обґрунтована достовірність отриманих результатів і висновків, визначена наукова новизна та практичне значення результатів роботи, вказаний зв'язок роботи з науковими програмами, відображена повнота викладу результатів у публікаціях і ступінь апробації на наукових конференціях.

У **першому розділі** проведено огляд інформаційних джерел, який показав, що одним із найбільш дієвих шляхів підвищення енергоефективності ПУ є мінімізація витрат палива ГД за рахунок додаткового рушія – кайта і узгодження характеристик саме ДВЗ і його ТК. Сформульовано мету і основні задачі науково-прикладного дослідження щодо визначення раціонального параметра узгодження ДВЗ-ТК, при якому МОД буде найкраще адаптований до майбутніх умов експлуатації і матиме мінімальну сумарну витрату палива за НССС.

У **другому розділі** формалізовано критерій порівняльної енергоефективності (ПЕЕ) пропульсивних установок, МОД яких розрізняються значеннями параметра узгодження ДВЗ-ТК, але які не впливають на ремонтно-експлуатаційні цикли, вартість і цільову віддачу судна. Це дозволяє як критерій ПЕЕ прийняти сумарну витрату палива ГД за НССС –  $B_{ж}$ . Її мінімізація пов'язана з прийняттям рішень на етапі проектування судна. Тому основою даного дослідження є побудова ІММ для визначення вказаного критерію. За критерієм зіставляються проектні альтернативи і визначається значення параметра ДВЗ-ТК, яке вказує на раціональний ТК для МОД.

На рис. 1 наведена укрупнена структура визначення цього параметра, при якому МС витрати палива ГД за весь строк служби судна буде мінімальним, тобто  $M(B_{жm}) = B_{ж}^{\min}$ . Кожен рейс, кожна ділянка рейсової лінії, технічний стан судна протягом усієї експлуатації характеризуються як сталими, так і змінними (зазвичай імовірнісними) параметрами. Тому в ІММ для розрахунку  $B_{ж}$  використовуються імітовані в багато разів повторюваних розрахунках різні значення одних і тих самих вихідних імовірнісних величин. Це дозволяє імітувати із заданим ступенем повноти можливі експлуатаційні ситуації. Отже, розрахунок  $B_{ж}$  як випадкової цільової функції обумовлює використання саме імітаційної математичної моделі.

В основі ІММ лежить наступне рівняння для визначення витрати палива ГД на окремій  $i$ -й ділянці рейсової лінії з умовно сталою погодою (УСП) – погодою, при якій навантаження на ГД залишається незмінним:

$$B_i = N_c \bar{N}_i b_{ei} t_i,$$

де специфікаційна потужність МОД  $N_c$  – детермінована величина, а навантаження двигуна  $\bar{N}_i$ , його питома витрата палива  $b_{ei}$  та час переходу  $t_i$  на  $i$ -й ділянці – випадкові функції. Розрахунок цих функцій вимагає відповідних методик і обширної інформації зі сфери проектування, виготовлення та експлуатації.

Основна інформація – вихідні дані, а також позначення на рис. 1 наступні:

$D$  – водотоннажність;  $L, B, T_s, H$  – довжина, ширина, осадка і висота борту;  $v_{п}$  – проектна швидкість ходу;  $R = f(v_s)$  – опір руху судна залежно від його швидкості ходу – по корпусній частині судна;

$N_c$  – специфікаційна потужність;  $b_e = f(\bar{N})$  – питома витрата палива залежно від навантаження двигуна – по головному двигуну;

$D_{ГТ}$  – діаметр;  $\omega = f(K_{DE})$  і  $\tau = f(K_{DE})$  – гідродинамічні коефіцієнти,  $K_{DE}$  – коефіцієнт навантаження гребного гвинта (ГГ) за тягою;  $K_1 = f(J)$  і  $K_2 = f(J)$  – коефіцієнти дії ГГ відповідно по упору і моменту залежно від відносної ходи  $J$  – по гребному гвинту;

$S_k$  – площа;  $P_{kk} = f(V_{уб}, q_{уб})$  – корисна тяга залежно від швидкості і напрямку уявного вітру – по кайту;

$T_{c0}$  – дата введення судна в експлуатацію;  $T_{cc}$  – строк служби судна;  $t_d$ ,  $t_p$  і  $t_e$  – тривалості відповідно докування, ремонту та  $e$ -го рейсу – по експлуатаційно-ремонтному графіку (ЕРГ);

$\varphi$ ,  $\lambda$  – географічні координати портів відходу і прибуття; РМ – рекомендований маршрут;  $V_b = f(\varepsilon)$ ,  $h_{3\%} = f(\varepsilon)$  і  $q_b = f(\varepsilon)$  – зворотні інтегральні функції розподілу швидкості істинного вітру, висоти хвиль 3%-ї забезпеченості і кута, що визначає їх напрям – по рейсовій лінії (РЛ);

$v_k$  – комерційна швидкість ходу;  $v_{max}$  – максимально можлива швидкість ходу з дотриманням вимоги безпеки мореплавства – по організації руху судна (ОРС).

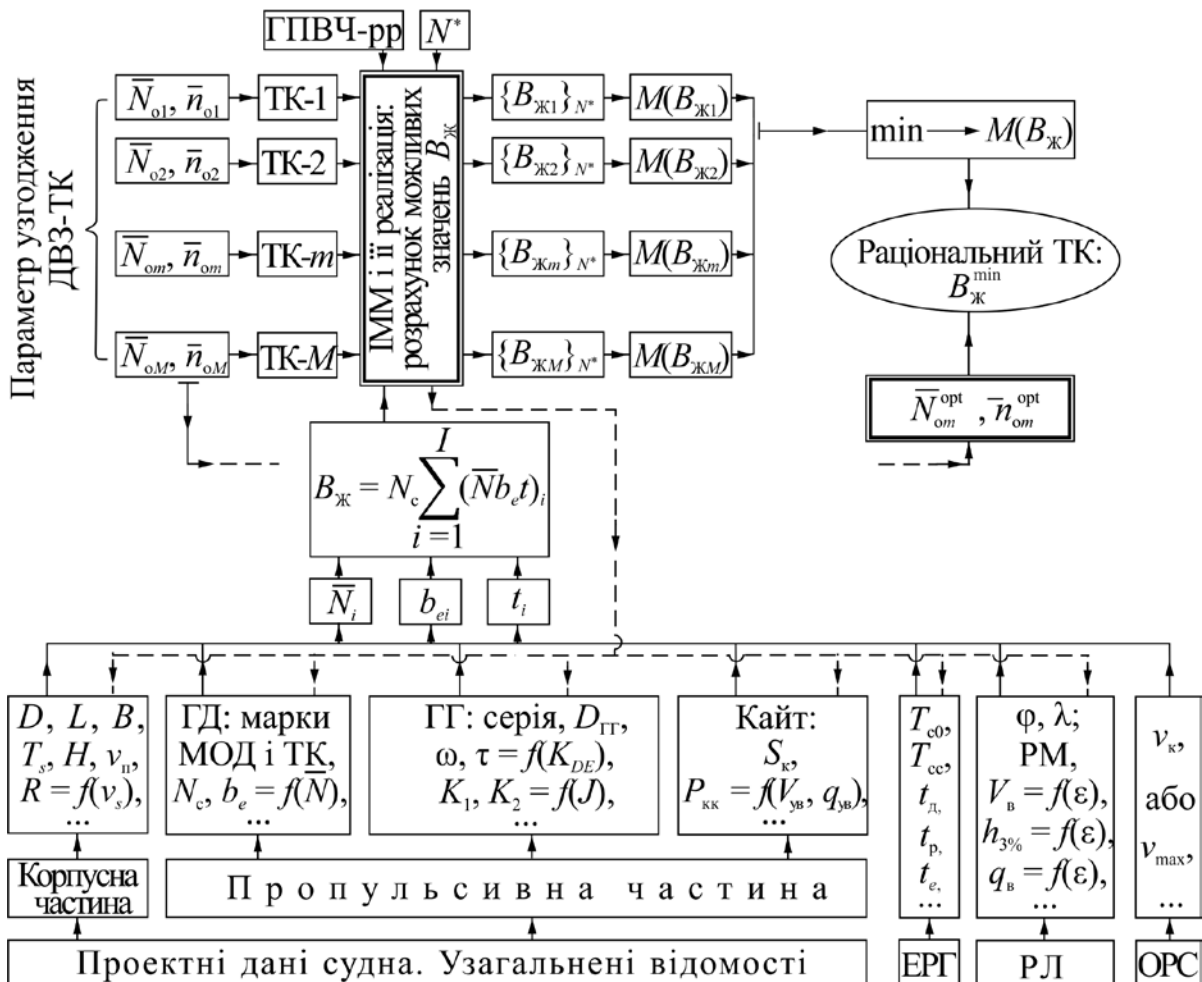


Рис. 1. Структура та основний зміст IMM для отримання масиву значень  $\{B_{жm}\}$ , математичного сподівання  $M(B_{ж})$  і визначення оптимальних координат  $\bar{N}_{om}^{opt}, \bar{n}_{om}^{opt}$  – при  $M(B_{жm}) = B_{ж}^{min}$

Оскільки при експлуатації судна гідрометеорологічні параметри, тяга кайта, технічний стан підводної частини корпусу судна, довжина шляху на ділянці з УСП

змінні, то величини  $\bar{N}_i$ ,  $b_{ei}$  і  $t_i$  у кожному наступному розрахунку набувають різних значень. Визначення  $B_{ж}$  можливе, якщо вихідні неоднозначні величини подані в імовірнісно-визначеному вигляді, що дозволяє застосовувати метод статистичного моделювання, використовуючи при цьому генератор псевдовипадкових рівномірно розподілених чисел на відрізьку 0...1 (ГПВЧ-рр).

На рис. 2 зображена схема розрахунку критерію ПЕЕ КПУ (масиву значень сумарної витрати палива  $\{B_{ж}\}_{N^*}$  і його МС  $M(B_{ж})$ ) методом статистичного моделювання. Метод передбачає зміну значень імовірнісних вихідних величин у кожному циклічному розрахунку, що робить його найбільш досконалим інструментом для прогнозування альтернативних значень параметра узгодження ДВЗ-ТК і дозволяє адекватно вирішити поставлену задачу.

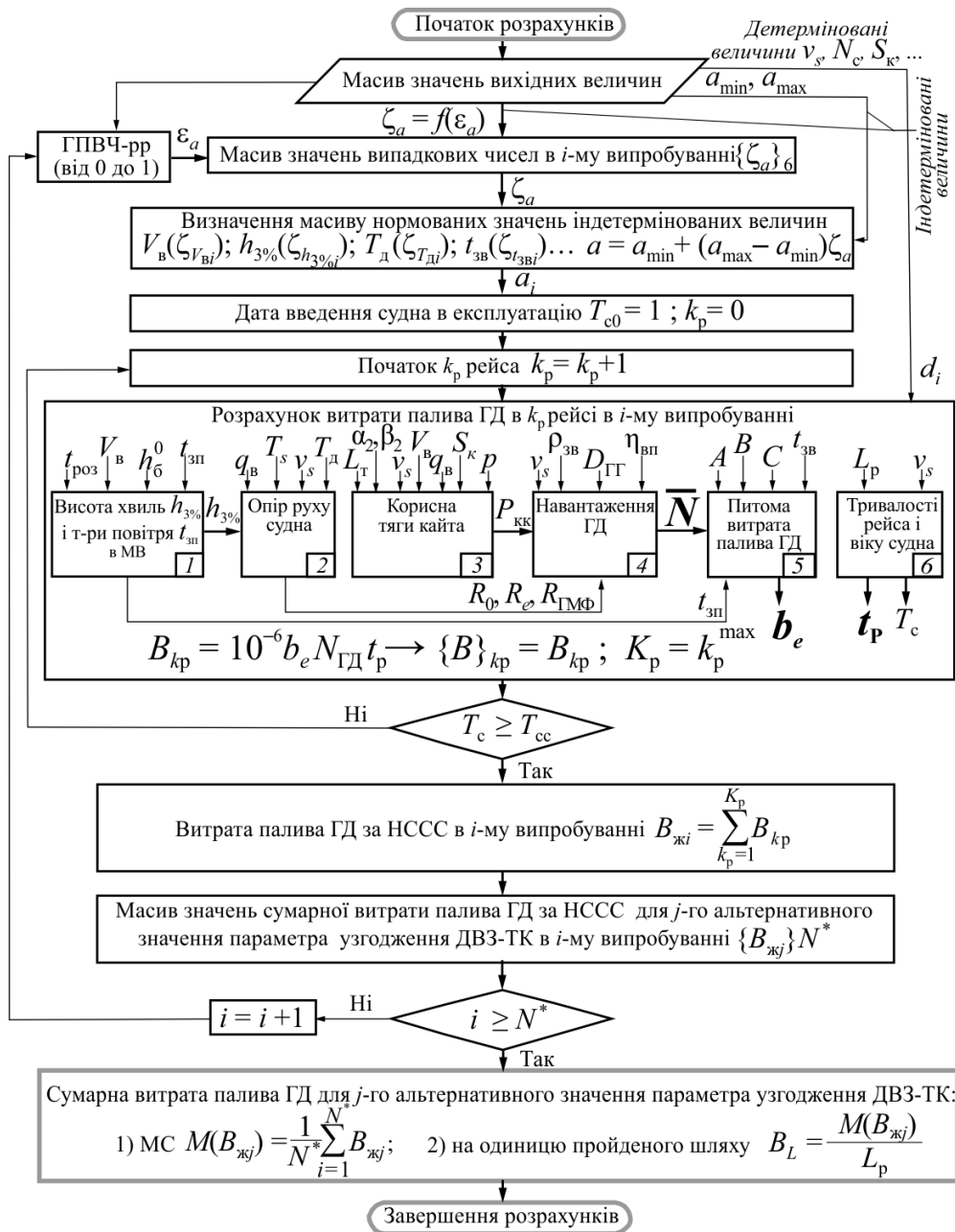


Рис. 2. Схема методу статистичного моделювання для визначення сумарної витрати палива для  $j$ -го альтернативного значення параметра узгодження ДВЗ-ТК

Величини, що наведені на схемі:  $a_{\min}$ ,  $a_{\max}$  – мінімальне і максимальне значення індетермінованої величини;  $T_c$  – поточний вік судна;  $k_p$  – номер поточного рейсу;  $t_p$  – тривалість рейса;  $A$ ,  $B$  та  $C$  – коефіцієнти для визначення питомої витрати палива ГД;  $t_{зп}$ ,  $t_{зв}$  – температура повітря та заборотної води;  $L_T$  – довжина тросу кайта;  $p$  – емпіричний коефіцієнт, що враховує траєкторію руху кайта;  $\alpha_2$  і  $\beta_2$  – осереднені кути в горизонтальній і вертикальній площинах;  $h_6^0$  – висота брижів;  $t_{роз}$  – час розгону хвилі; опір руху судна:  $R_0$  – буксирувальний;  $R_e$  – викликаний шорсткістю, обумовленою обростанням і корозією корпусу судна;  $R_{ГМФ}$  – викликаний гідрометеорологічними факторами;  $T_d$  – час, що минув з останнього докування;  $\rho_{зв}$  – щільність заборотної води;  $D_{ГГ}$  – діаметр ГГ;  $\eta_{вп}$  – ККД валопроводу;  $L_p$  – довжина рейсової лінії. Інші величини, присутні на схемі пояснені за змістом у тексті.

Реалізація ІММ дає масив витрати палива ГД за НССС для кожного альтернативного значення параметра узгодження ДВЗ-ТК і відповідні цьому масиву МС  $M(B_{ж})$ . Для визначення раціонального значення параметра узгодження ДВЗ-ТК порівнюються отримані  $M(B_{ж})$  для всіх альтернативних КПУ і вибирається те значення, при якому сумарна витрата палива ГД буде мінімальною.

**У третьому розділі** проведено аналіз зовнішніх чинників, які впливають на систему «судно – ГД – рушій» протягом усієї експлуатації, та розроблено локальні математичні моделі, які дозволяють обчислювати величини, використовувані в розрахунках витрати палива ГД. Формалізовано процедуру визначення  $b_e$  залежно від  $\bar{N}$  для будь-якої координати точки узгодження МОД. Проаналізовано основні фактори, що впливають на  $b_e$ , і отримано відповідні коригувальні коефіцієнти.

Проаналізовано відомості стосовно кайтів фірми SkySails для морських транспортних суден. Формалізовано алгоритм розрахунку корисної тяги кайта. Визначені процедури переведення частотних таблиць у зворотні інтегральні функції розподілу висоти хвиль, швидкості вітру та їх напрямку залежно від пори року і координат знаходження судна на рейсовій лінії. Розроблено методику для визначення опору руху судна за будь-яких умов експлуатації та визначення гідродинамічних коефіцієнтів і тяги КПУ. Типова проектно-конструкторська методика була перетворена для розробки електронної програми і циклічних розрахунків. Розроблено алгоритм визначення тривалості роботи кайта протягом НССС. Це дозволило побудувати локальні математичні моделі, які були адаптовані до лінійного судноплавства для середньотоннажного танкера типу «Дмитрий Медведев» дедвейтом 26470 т із середньоексплуатаційною швидкістю ходу 13,7 вуз і до колової рейсової лінії в Північній Атлантиці «Брест – Санта-Марія – Ла-Гуайра – Бостон – Брест» протяжністю 9825 миль.

**У четвертому розділі** упорядковані вихідні дані, які закладаються в ІММ, розроблена схема поточної імітації ймовірнісних величин, розроблено, верифіковано й апробовано розрахунковий алгоритм і програмний продукт на алгоритмічній мові Pure Basic для реалізації ІММ на комп'ютері.

Для повноти дослідження згенеровано можливі варіанти комплектації КПУ які можуть бути реалізовані на базі наявних інформаційних джерел: двигун компанії MDT 6S50ME-C 7-ї або 8-ї модифікації, кайт фірми SkySails площею 160, 320 або 640 м<sup>2</sup>, а також два варіанти організації руху суден: OPC-I – час приходу в порт

задано ( $t_p = \text{const}$ ;  $v_s = \text{const}$ ); ОРС-II – забезпечується максимальна безпечна швидкість ходу судна ( $t_p = \text{min}$ ;  $v_s = \text{var}$ ).

Визначено чутливість ІММ: встановлені вагомості впливу вихідних даних на сумарну витрату палива ГД та перелік величин, які використовуються з усередненими значеннями, та тих, що вводяться в ІММ діапазонами можливих значень з відповідними законами розподілу.

В розрахунках витрати палива передбачені обмеження щодо допустимих режимів роботи МОД, урахуваючи при цьому умови експлуатації двигуна і ГГ і зниження, при необхідності, швидкості ходу судна для дотримання умов безпеки мореплавання. Визначено діапазони значень і МС сумарної витрати палива ГД та розподіл його навантажень протягом НССС.

На рис. 3, як ілюстрація можливостей розробленої ІММ, наведені одні з можливих значень витрати палива ГД у рейсах, які здійснюються в різні періоди «життя» судна, але при однаковому поєднанні значень вихідних гідрометеорологічних параметрів. Кількісні показники витрати палива відносяться до 25-річного строку служби середньотоннажного танкера з 2-річним міждоковим періодом і ГД 6S50ME-C7 (зі специфікаційними потужністю 9006 кВт і частотою обертання  $124,7 \text{ хв}^{-1}$ ) та ТК ТСА55, з кайтом площею  $640 \text{ м}^2$  для координати точки узгодження з відносними потужністю – 87,5 % і частотою обертання – 93,3 %. Розрахункові діапазони значень гідрометеорологічних параметрів становили:  $h_{3\%} = 0,1 \dots 6,5 \text{ м}$ ;  $V_b = 0,5 \dots 22,0 \text{ м/с}$  (кайт включається в роботу при швидкості вітру від 3 до 22 м/с і сприятливому його напрямку). Часові характеристики рейсу: ходовий час – 29,88 діб; сумарна тривалість стоянок – 7 діб; тривалість колового рейсу – 36,88 діб. Під кінець міждокового періоду рейсова витрата палива збільшується на 86 т, або на  $\sim 12 \%$ , а під кінець строку служби – на 147 т, або на  $\sim 21 \%$ .



Рис. 3. Витрата палива ГД у рейсах:  $V_p$  – математичне сподівання, т;  $V_d$  – середньодобова, т/доба;  $V_r$  – середньогодинна, кг/год;  $V_L$  – середня на милю пройденого шляху, кг/миля

У табл. 1 наведені граничні значення і МС витрати палива ГД. Ці розрахункові дані відносяться до однієї марки ГД з різними значеннями параметра узгодження ДВЗ-ТК, а отже з різними ТК: ТСА55 і ТСА44. Точки узгодження розташовані на його штормовій гвинтовій характеристиці. Верхні числа в таблиці – для кайта

Таблиця 1. Витрата палива головним двигуном танкера типу «Дмитрий Медведев»

Координати точки узгодження	Турбокомпресор		Витрата палива										
	$\bar{N}_o, \%$	марка	діаметр колеса компресора, мм	рейсова		відносна		за 25-річний строк служби судна					
				абсолютна		абсолютна		відносна					
				$V_p, т$	$V_i, кг/миля$	$V_{ж}, тис.г$	$V_L, кг/миля$	min	max	min	max	МС	
$\bar{N}_{o1}, \%$	$\bar{n}_{o1}, \%$	ТСА55	550	min	max	min	max	min	max	МС	min	max	МС
87,5	93,3	ТСА55	550	630,2	781,0	64,1	79,5	161,3	199,9	173,1	64,1	79,5	68,8
53,1	81,1	ТСА44	440	617,4	765,1	62,9	77,9	158,1	195,9	169,6	62,9	77,9	67,4

ГД: МОД 6S50ME-C7 компанії MDT. Турбокомпресор компанії MDT.  
Потужність:  
номінальна  $N_n = 9480$  кВт ( $\bar{N}_n = 100 \%$ );  
специфікаційна  $N_c = 9006$  кВт ( $\bar{N}_c = 95,0 \%$ ).

Частота:  
номінальна  $n_n = 127$  хв<sup>-1</sup> ( $\bar{n}_n = 100 \%$ );  
специфікаційна  $n_c = 124,7$  хв<sup>-1</sup> ( $\bar{n}_c = 98,2 \%$ ).

Кайт фірми SKS площею  $320 \text{ м}^2$  /  $640 \text{ м}^2$   
Середньоексплуатаційна контрактна швидкість ходу  $v_s = 14,5$  вуз.  
Рейсова лінія «Брест – Санта-Марія – Ла-Гуайра – Бостон – Брест», довжина по рекомендованому маршруту  $L = 9825$  миль.  
Організація руху судна: лінійне судноплавство з фіксованим часом прибуття в порт призначення.

площею  $320 \text{ м}^2$ , нижні – для  $640 \text{ м}^2$ . Природно, що більший за розмірами кайт протягом НССС більшою мірою знижує навантаження на ГД і тим самим зменшує істотніше його сумарну витрату палива. Так, заміна кайта площею  $320 \text{ м}^2$  на площу  $640 \text{ м}^2$  зменшує сумарну витрату палива ГД на  $\sim 12 \%$ .

У п'ятому розділі проаналізовані результати розрахунків і визначено раціональне значення параметра узгодження ДВЗ-ТК для обраних судна, КПУ та рейсової лінії. Розрахунки проводилися для альтернативних значень параметра узгодження ДВЗ-ТК: ГД 6S50ME-C7 – для семи точок узгодження на обтяженій гвинтовій характеристиці МОД на полі  $L_1-L_2-L_3-L_4$ ; двигуна 6S50ME-C8.2 – сім програм його адаптації High load; Part load з Engine Control Tuning (ECT), або з Exhaust Gas Bypass (EGB), або з Variable Turbine Area (VTA); Low load з ECT, або з EGB, або з VTA.

На рис. 4 наведена залежність витрати палива від координати  $\bar{N}_o$  – відносної потужності на полі  $L_1-L_2-L_3-L_4$ , яка визначає параметр узгодження ДВЗ-ТК, що лежить на обтяженій гвинтовій характеристиці МОД. Мінімуму функції  $M(B_{ж}) = f(\bar{N}_o)$  відповідає оптимальна координата параметра узгодження ДВЗ-ТК  $\bar{N}_o^{opt} = 60,8\%$ .

У сучасній практиці прийняття рішень при проектуванні суднової ПУ потужність у точці узгодження зазвичай дорівнює специфікаційній, яка в даному випадку становить 95% від номінальної. Тоді величина  $\Delta M(B_{ж}) = 5300$  т на рис. 4 представляє собою економію палива від визначення раціонального параметра узгодження ДВЗ-ТК.

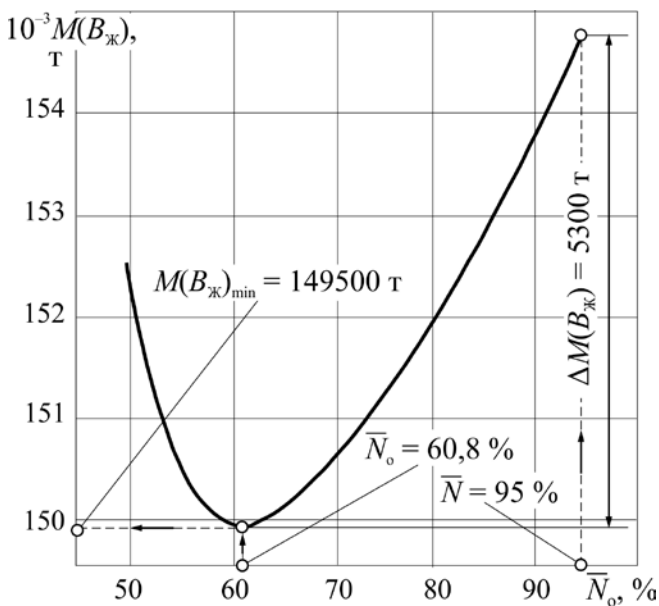


Рис. 4. Сумарна витрата палива ГД залежно від координати точки узгодження на його гвинтовій характеристиці

ТК в широкому діапазоні навантажень МОД забезпечується зміною площі прохідного перерізу соплового вінця газової турбіни. Різниця у витраті палива між розглянутими програмами адаптації МОД без кайта порівняно невелика і не перевищує 1,75%. Разом з тим, вибір кращої програми адаптації МОД, супроводжується завжди зниженням витрати палива. Із застосуванням кайта площею від 160 до 640 м<sup>2</sup> ефект від визначення раціональної програми адаптації МОД дещо зростає.

У табл. 2 наведені показники, які характеризують ефективність застосування на танкерах з двигуном 6S50ME-C7 різних за площею кайтів і

Реалізація ІММ показала, що при варіанті ОРС-І оптимальна координата точки узгодження для ГД 7-ї модифікації по мірі збільшення площі кайта від 160 до 640 м<sup>2</sup> в область менших значень потужності – від 80 до 63%. При цьому витрата палива на одиницю пройденого шляху зменшується від 72,8 до 55,6 кг/милю, тобто на 23,6%.

Для танкера без кайта з двигуном 8-ї модифікації при ОРС-І найбільша ефективність спостерігалась при адаптації двигуна за програмою Low load – VTA, оскільки для лінійного судноплавства при  $v_s = \text{const}$  домінуючі навантаження ГД є найменшими, а досить значний ККД

ТК, що відповідають раціональному параметру узгодження ДВЗ-ТК, при ціні на важке паливо 322 дол. США/т. Зниження витрат палива, згідно з цією таблицею, суттєво залежить від площі кайта. У випадку застосування кайта площею 640 м<sup>2</sup> воно досягає 21 %, що знижує середньорічні витрати на паливо приблизно на 500 тис. дол. США, а ще й при застосуванні ТК, визначеного за раціональним параметром ДВЗ-ТК – на 581 тис. долл. США. Відповідно, на долю раціонального ТК приходиться 81 тис. долл. США/рік. Само по собі визначення раціонального параметра узгодження ДВЗ-ТК, з кайтом чи без нього, дає зниження витрати палива на ГД. Застосування кайта все більшої площі зміщує домінуюче навантаження ГД в область менших значень. При цьому раціональний ТК зменшує витрату палива на 0,91...3,42 % відповідно при кайті площею  $S_k = 0...640$  м<sup>2</sup>, а загальне зниження витрати палива складає 0,91...24,37 %.

Таблиця 2. Ефективність застосування кайта й раціонального параметра узгодження ДВЗ-ТК

Показники		Площа кайта, м <sup>2</sup>			
		без кайта	160	320	640
Без визначення раціонального параметра узгодження ДВЗ-ТК					
МС витрати палива ГД	за НССС судна, тис. т	184,10	168,92	160,35	145,53
	питомої, кг/миля	73,48	67,42	64,00	58,09
Економія палива	за НССС, тис. т	–	15,18	23,75	38,57
	%	–	8,25	12,90	20,95
Зниження витрат на паливо	за НССС, тис. дол. США	–	4889	7648	12420
	тис. дол. США/рік	–	196	306	498
З визначенням раціонального параметра узгодження ДВЗ-ТК					
МС витрати палива ГД	за НССС, тис. т	182,42	165,51	156,08	139,23
	питомої, кг/миля	72,84	66,06	62,30	55,57
Економія палива	за НССС, тис. т	1,68	18,59	28,02	44,87
	%	0,91	10,10	15,22	24,37
Зниження витрат на паливо	за НССС, тис. дол. США	541	5986	9022	14448
	тис. дол. США/рік	22	239	361	578
Ефект від застосування ТК, визначеного за раціональним параметром узгодження ДВЗ-ТК					
Економія палива	за НССС, тис. т	1,68	3,41	4,27	6,3
	%	0,91	1,85	2,32	3,42
Зниження витрат на паливо	за НССС, тис. дол. США	541	1098	1375	2029
	тис. дол. США/рік	22	44	55	81

Визначена ефективність від використання кайта порівнювалася з відповідними результатами, одержаними в інституті ANWI в Едмонтоні (Institut für Seefahrt Leer), де було проаналізовано 15 рейсових ліній, на кожній з яких працює значна кількість суден (понад 1000). На трансатлантичній і транстихоокеанській рейсових лініях економія палива ГД завдяки застосуванню кайта склала 23 і 22 %, і це істотно вище, ніж на інших 13 лініях. Зіставлення відповідних результатів дисертаційного дослідження (~21 %) з даними досліджень в Едмонтоні щодо економії палива вказує на їх



практичний збіг у районах пануючих північно-східних пасатів і західних вітрів.

Розрахунки на базі розробленої ІММ засвідчили, що ефективність від раціонального ТК буде більшою там, де має місце значна економія від застосування кайта. Таким чином, визначення раціонального параметра ДВЗ-ТК у першу чергу слід проводити стосовно суден із помірними швидкостями ходу (до 14 вуз – балкери, танкери), експлуатація яких передбачається на вказаних лініях. На інших рейсових лініях цей ефект буде меншим, але, з огляду на витрати палива – завжди позитивний.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У роботі поставлена і розв’язана актуальна науково-прикладна задача підвищення енергоефективності суднової ПУ з кайтом.

Отримані наступні основні результати.

1. Розроблено ІММ (і відповідний їй програмний продукт) з генератором випадкових чисел для визначення ймовірнісної цільової функції – сумарної витрати палива ГД з альтернативним значенням параметра узгодження ДВЗ-ТК стосовно транспортного судна з помірною швидкістю ходу на стадії його проектування – з кайтом або без нього. Частина аргументів цієї функції – випадкові величини з певними законами розподілу їх значень у вигляді зворотних інтегральних функцій. Основними випадковими величинами виступають швидкість вітру, висота хвиль та їх напрям на окремих ділянках рейсової лінії. ІММ дозволяє визначити значення параметра ДВЗ-ТК, при якому забезпечується мінімальна сумарна витрата палива, за весь строк служби судна.

2. На раціональне значення параметра узгодження ДВЗ-ТК значний вплив має площа застосовуваного на судні кайта. Згідно з цим значенням, відповідно до приписів компанії MDT, визначається турбокомпресор із конкретними розмірами проточних частин, що і забезпечує адаптацію МОД на очікуваний спектр його навантаження.

3. Раціональна точка узгодження МОД, яка лежить у полі вибору робочих параметрів на обтяженій гвинтовій характеристиці МОД, зі збільшенням площі кайта інтенсивно зміщується в область менших значень потужності. Так, для середньотоннажного танкера з комерційною швидкістю 13,7 вузлів на трансатлантичній лінії координата цієї точки, по навантаженню МОД, дорівнює: 80 % – кайт відсутній; 73 % – застосовується кайт площею 160 м<sup>2</sup>; 61 % – застосовується кайт площею 640 м<sup>2</sup>, що нижче загальноприйнятих рекомендацій, а саме 81...95 %.

4. Доцільність визначення раціонального параметра ДВЗ-ТК шляхом побудови і реалізації ІММ на стадії проектування судна обумовлюється характером судноплавства: трамповим або лінійним з максимально можливою чи заданою сталою швидкістю ходу. Найбільший ефект раціональний параметр дає при лінійному судноплавстві з постійною середньорейсовою швидкістю ходу суден – у межах 13...14 вуз.

5. На раціональне значення параметра узгодження ДВЗ-ТК суттєвий вплив має задавана комерційна швидкість ходу. Так, для середньотоннажного танкера з кайтом 640 м<sup>2</sup> оптимальна координата точки узгодження по навантаженню МОД становить: 58 % – при швидкості 13 вуз; 61 % – при швидкості 13,7 вуз; 85 % – при швидкості 14,7 вуз.

6. Наявні сучасні інформаційні джерела та створена методична база дозволяють на стадії проектування ПУ суден з помірними швидкостями ходу розрахунковим шляхом визначати (а не приймати вольовим методом) раціональне значення параметра ДВЗ-ТК. Це забезпечує застосування в головному МОД турбокомпресора з певними розмірами проточних частин.

7. Отримав подальший розвиток метод статистичного моделювання суднових енергетичних установок завдяки використанню рівномірно розподілених чисел, які генеруються комбінацією як математичного способу, так і електронного. Це сприяє високому рівню достовірності результатів імітаційного моделювання.

8. Визначено ефект від вирішення науково-проектної задачі щодо параметра узгодження ДВЗ-ТК і, отже, від застосування раціонального ТК в складі МОД компанії MDT потужністю ~9000 кВт для танкера дедвейтом 26470 т з кайтом SKS 640. Ефект позитивний; середньозважене зниження витрати палива становить 4,3 %. Очікувана економія при ціні на важке паливо 322 \$/т склала: за 25-річний період експлуатації – 2 млн дол. США; у середньому за рік – 81 тис. дол. США. Цей ефект близький до максимального, оскільки він розрахований стосовно рейсової лінії з найбільш сприятливим для кайта вітровим потенціалом.

9. Вірогідність результатів дисертаційного дослідження ґрунтується:

- на достовірній інформації із сфери проектування суден, їх натурних випробувань в реальних рейсах, випробувань у дослідних басейнах;
- на використанні підтверджених практикою параметрів сучасних малообертових двигунів і кайтів;
- на проведенні достатньої кількості обчислювальних експериментів відповідно до частотних таблиць по розподілу гідрометеорологічних параметрів рейсової лінії.

10. Результати роботи використовуються в ВАТ "Чорноморсудопроект"; упроваджені в навчальний процес НУК імені адмірала Макарова при читанні курсу лекцій, проведенні практичних та індивідуальних занять з дисциплін «Математичне моделювання СЕУ», «Проектування СЕУ» й «Оптимізація СЕУ», використовуються в курсовому та дипломному проектуванні.

## **ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### **Список публікацій здобувача, опублікованих в фахових виданнях**

1. Кисарова А. И. Моделирование функционирования МОД в рамках ограничительных характеристик. *Научно-технический сборник «Судовые энергетические установки»*. 2012. № 30. С. 58–69.

2. Шостак В. П., Гершанік В. І., Кисарова А. І. Моделювання зниження швидкості ходу транспортного судна протягом його строку служби. *Електронний вісник НУК*. 2011. № 2. С. 50–62.

3. Шостак В. П., Кисарова А. И. Расход топлива и экологичность судовой пропульсивной установки с кайтом. *Електронний вісник НУК*. 2013. № 3.

4. Шостак В. П., Кисарова А. И. Формализация определения удельного расхода топлива современных МОД фирмы MAN DIESEL & TURBO. *Електронний вісник НУК*. 2011. № 3.

5. Shostak V., Kisarova A. Tools for forecasting and optimizing the tuning parameter of the low-speed engine for designing a ship with the kite. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2018. № 2/3(92). С. 13–20.

### Статті у збірниках наукових праць НУК

1. Шостак В. П., Кисарова А. И. Полезная тяга судового пропульсивного кайта. *Збірник наукових праць НУК*. 2016. № 4. С. 3–10.

2. Шостак В. П., Кисарова А. И. Суммарный расход топлива малооборотным двигателем судна с кайтом. *Збірник наукових праць НУК*. Николаев : НУК, 2016. № 2. С. 26–34.

### Додаткові публікації, тези і матеріали конференцій

1. Шостак В. П., Кисарова А. И. Аналитическое представление зависимости удельного расхода топлива от нагрузки малооборотных двигателей корпорации МАН БиВ. *Суднова енергетика: стан та проблеми* : матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції. Николаев : НУК, 2009. С. 19–21.

2. Шостак В. П., Кисарова А. И. Аналітичне подання залежності питомої витрати палива від навантаження судового малооборотного двигуна. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці* : матеріали I Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 90-річчю Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. Миколаїв : НУК, 2010. С. 186–187.

3. Шостак В. П., Кисарова А. И. Алгоритм определения расхода топлива на главный двигатель за жизненный цикл судна. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування (СЕУТТОО – 2012)* : матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції. Херсон : ХДМА, 2012. С. 216–220.

4. Шостак В. П., Кисарова А. И. Расход топлива на судовой главный двигатель при совместной работе с кайтом. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці* : матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 75-річчю Миколаївської області. Николаев : НУК, 2012. С. 300–302.

5. Шостак В. П., Кисарова А. И. Адаптивные свойства малооборотных двигателей в аспекте экологичности. *Проблеми екології та енергозбереження* : матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції. Николаев : НУК, 2013.

6. Шостак В. П., Кисарова А. И. Укрупненная математическая модель для определения параметров адаптации МОД. *Суднова енергетика: стан та проблеми* : матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції. Николаев : НУК, 2013. С. 66–69.

7. Шостак В. П., Кисарова А. И. Влияние разных факторов на расход топлива в судовой дизельной установке. *Сучасний стан та проблеми двигунобудування* : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. Николаев : НУК, 2014. С. 42–45.

8. Шостак В. П., Кисарова А. И. К вопросу настройки малооборотного двигателя при применении на судне кайта. *Сучасний стан та проблеми двигунобудування* : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. Николаев : НУК, 2014. С. 45–47.
9. Кисарова А. И. Алгоритм определения расхода топлива на главный двигатель судна с комбинированной тягой. *Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 75-річчю кафедри ССЕСУ*. Николаев : НУК, 2015. С. 118–122.
10. Шостак В. П., Кисарова А. И. Полезная тяга судового пропульсивного кайта. *Збірник наукових праць НУК*. 2016. № 4. С. 159–161.
11. Кисарова А. И. Суммарный расход топлива как критерий сравнительной эффективности настройки главного двигателя транспортного судна с кайтом. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці* : матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції. Николаев : НУК, 2016. С. 158 – 159.
12. Шостак В. П., Кисарова А. И., Манзюк А. Ю. Экология і суднова енергетика. *Збережемо для нащадків* : матеріали IX Миколаївських міських екологічних читань. Миколаїв. 2016. 100 с.
13. Шостак В. П., Кисарова А. И. Имитационная математическая модель для рациональной адаптации малооборотного двигателя судна с кайтом. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці* : матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції. Николаев : НУК, 2017. С. 176–177.
14. Шостак В. П., Кисарова А. И. Продолжительность работы и тяга судового кайта. *Сучасний стан та проблеми двигунобудування* : матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції. Николаев : НУК, 2017. С. 59–63.
15. Шостак В. П., Кисарова А. И. Развитие судовых кайтов фирмы SkySails. *Сучасний стан та проблеми двигунобудування* : матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції. Николаев : НУК, 2017. С. 78–82.
16. Кисарова А. И. Основные характеристики кайтов фирмы SkySails. *Сучасний стан та проблеми двигунобудування* : матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції. Николаев : НУК, 2017. С. 69 – 71.

## АНОТАЦІЯ

**Кисарова А.І. Підвищення енергоефективності пропульсивної установки з кайтом шляхом визначення раціонального параметра узгодження для адаптації малооборотного двигуна. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – Двигуни та енергетичні установки. – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2019.

У дисертаційному дослідженні вирішена актуальна науково-прикладна задача підвищення енергоефективності судової пропульсивної установки шляхом раціональної адаптації малооборотного двигуна до майбутніх умов експлуатації транспортного судна з додатковим рушієм – кайтом. Розроблено інструментарій для визначення раціонального значення параметра узгодження «двигун внутрішнього згоряння – турбокомпресор» при ймовірно-визначених гідрометеорологічних параметрах на рейсових лініях. Рух судна забезпечується як постійно працюючим МОД, так і кайтом, що епізодично включається в роботу.

Досліджено вплив параметра узгодження на сумарну витрату палива за строк служби судна за допомогою розробленої імітаційної математичної моделі. Встановлено, що для середньотонажного танкера з двигуном

6S50ME-C7 і кайтом  $640 \text{ м}^2$  раціональне значення параметра відповідає точці узгодження на гвинтовій характеристиці двигуна з координатою по навантаженню  $60,8 \%$  від номінального. Економія палива від визначення на стадії проектування судна раціонального параметра «двигун внутрішнього згоряння – турбокомпресор» становитиме за строк експлуатації на рейсовій лінії в Північній Атлантиці зі сприятливим для роботи кайта вітровим потенціалом понад  $4 \%$ .

**Ключові слова:** імітаційна математична модель, судновий малообертовий двигун, турбокомпресор, параметр узгодження, кайт, витрата палива.

## ABSTRACT

**Kisarova A. I. Improving the energy efficiency of the propulsion plant with the kite by determining the rational matching parameter for the adaptation of the low-speed engine. – Manuscript.**

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences on the specialty 05.05.03 “Engines and Power Plants”. – Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, 2019.

In the thesis study, the actual scientific and applied problem concerning improving of fuel saving of combined propulsive plant with kite by the rational adaptation of low-speed engine (LSE) in the best way to the expected ship conditions of its exploitation, has been solved. The information and methodological base has been created for system studies of propulsion plants of transport vessels with moderate speeds at the design stage. According to the developed methodology, the rational value of the “internal combustion engine – turbocharger” (ICE-TC) matching parameter for the main LSE is determined by calculation. Thus, it provides a reduction in the total fuel consumption over the service life of the transport vessel. The matching parameter predetermines, according to the regulations of MAN Diesel & Turbo, a specific turbocharger with the corresponding dimensions of flow sections, which ensures the adaptation of the low-speed engine to the expected spectrum of its load.

The kite has a variable useful thrust that allows, at a favorable wind, to significantly reduce the ship engine load with moderate speeds. This leads to an expansion of the load range of the main engine at the full speed modes of the vessel. In the traditional version of the propulsion plant, the range of load distribution on the engine at the full speed mode is relatively narrow and basically varies from  $80$  to  $93\%$  of the specified engine power. For the combined PP – with the LSE and the kite – this range is much wider, mainly, from  $55$  to  $93\%$ .

In the thesis, a simulation mathematical model and a corresponding software product with a generator of random evenly distributed numbers were developed, representing the original toolkit for the study of ship propulsion plant. The model and product allow calculating arrays of possible values of target functions and their expected values. Some of the arguments of these functions are random variables with certain distribution laws of their values in the form of inverse integral functions. In this study, the target function is the total fuel consumption of the

main low-speed engine for the normative service life of a medium-tonnage tanker with or without a kite. The main random variables are wind speed, wave height and their direction on round voyages in the North Atlantic with a favorable wind potential for the kite. The organization of the vessel motion corresponds to linear navigation.

It has been established that the rational value of the matching parameter is significantly different from the generally accepted one and provides the savings of the total fuel consumption for the medium tonnage vessel with a kite of 640 m<sup>2</sup> at an order of 4% if: a) the commercial speed is moderate, that is 13...14 knots; b) operation corresponds to linear navigation with a constant average speed; c) the wind potential of the voyage line is favorable for the kite operation taking place on the transatlantic and trans-Pacific voyage lines.

The significant impact of the given commercial vessel speed on the rational value of the ICE-TC matching parameter was revealed. For a “Dmitriy Medvedev” type tanker with a MAN Diesel & Turbo 6S50ME-C7 engine (specification power is 9006 kW and rotation speed is 124,7 min<sup>-1</sup>) and SkySails kite with an area of 640 m<sup>2</sup>, making round voyages in the North Atlantic, the power matching point is: at a speed of 13 knots – 58%, at 13.7 knots – 61% and at 14.7 knots – 85%. The area of the used kite has a significant impact on the rational value of the ICE-TC matching parameter. According to this value, the turbocharger with specific dimensions of the flow sections is being determined, which ensures the adaptation of the low-speed engine to upcoming operating conditions. The rational coordinate of the matching point on the field for selecting the parameters on the loaded screw performance of the engine, as the kite area increases from 160 to 640 m<sup>2</sup> to an area of lower power values from 80 to 61%. At the same time, fuel consumption per unit of distance/mileage decreases from 72,8 to 55.6 kg / mile, or by 23.6%.

At the linear navigation with an average voyage speed of 13.7 knots, effect of determining the rational value of the ICE-TC matching parameter and the application of the corresponding turbocharger is positive. The weighted average decrease in fuel consumption of the engine with a capacity of ~ 9000 kW for a tanker with a deadweight of 26470 tons with a kite of 640 m<sup>2</sup> is 4.3%; the expected savings for a fuel price of 322 dollars per ton are 2 million dollars over a 25-year operation period, or an average of 81 thousand dollars per year. This effect is close to the maximum, since it is calculated relative to the voyage line with extremely favorable wind potential for the kite. In other situations, the effect will be lower.

The created simulation mathematical model after adjusting the output data, mainly on the ship hull, the main engine, the kite and the voyages line, becomes acceptable for solving the practical problems of adapting the main low-speed engine to the operating conditions of various tankers and bulk carriers.

**Keywords:** simulation mathematical model, ship low-speed engine, turbocharger, matching parameter, kite, fuel consumption.