

Міністерство освіти України  
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ МОРСЬКИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

МІЮСОВ Михайло Валентинович

УДК 629.123.03

РЕЖИМИ РОБОТИ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОПУЛЬСИВНОГО  
КОМПЛЕКСУ ТЕПЛОХОДА З ВІТРОРУШІЯМИ

Спеціальність 05.08.05 - Суднові енергетичні установки

А в т о р е ф е р а т  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Миколаїв 1996



00759955 (/)

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Одеській державній морській академії.

Офіційні опоненти:

Заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук професор Конаков Геннадій Олексійович;

доктор технічних наук професор Крючков Юрій Семенович;

доктор технічних наук професор Суворов Петро Семенович.

Провідна організація: Південний науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут морського флоту (Одеса).

Захист дисертації відбудеться 21 жовтня 1996 р. о 12.00 год. на засіданні спеціалізованої ради Д 30.02.01 при Українському державному морському технічному університеті за адресою: 327025, м. Миколаїв, пр. Героїв Сталінграда, 9.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Українського державного морського технічного університету за адресою: 327025, м. Миколаїв, проспект Героїв Сталінграда, 9.

Відгуки на автореферат просимо надсилати на ім'я ученого секретаря спеціалізованої ради за зазначеною адресою.

Автореферат розіслано " 2 " вересня 1996 р.

Учений секретар спеціалізованої  
ради докт. техн. наук професор

В. Ф. Квасницький

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблема раціонального використання палива є однією з центральних світових проблем. Суттєве зниження вживання палива на флоті може бути досягнуто за рахунок використання екологічно чистої енергії вітру для забезпечення руху суден. Найбільш простим і ефективним засобом, що забезпечує безпосереднє перетворення енергії вітру в роботу переміщення судна, є вітрорухій (ВР).

Проведені в різних країнах світу дослідження, досвід проектування і експлуатації суден-вітроходів показали, що сьогодні найбільш перспективним є використання автоматизованих ВР, як допоміжного засобу забезпечення руху транспортних суден спільно з традиційною головною енергетичною установкою.

Проектування, будівництво і експлуатація суден з ВР є новим, перспективним напрямком в суднобудуванні і використанні морського флоту. Різним аспектам проблеми застосування енергії вітру на морі присвячено численні публікації вітчизняних та зарубіжних авторів, а саме: Ю. С. Крючкова, Г. А. Алчуджана, І. І. Кринецького, Г. В. Васильєва, В. Б. Жінкіна, Б. М. Захарова, Є. В. Знаменського, Г. М. Кудреватого, В. Є. Микитюка, О. Г. Олійника, О. О. Русецького, Б. О. Царьова, Ю. І. Чучко, В. М. Щередіна, В. І. Юшина, P. Schenzle, B. Wagner, W. Prölss, M. Sudo, Y. Endo, J. S. Letcher, T. Watanabe та ін. Але питання спільної роботи ВР, головних двигунів (ГД) і гребних гвинтів в комбінованому пропульсивному комплексі, а також його автоматизації досліджені ще недостатньо. Це є

причиною зниження потенційного ефекту від використання ВР на флоті.

Тема дисертації відповідає Національній програмі досліджень і використання ресурсів Азово-Чорноморського басейну, інших регіонів Світового океану на період до 2000 року (шифр "Флот і транспорт"), а також пріоритетному напрямку наукових досліджень Міністерства освіти України "Екологічно чиста енергетика і технології ресурсозбереження". У 1982-90 рр. дослідження за темою дисертації виконувались у відповідності з планами НДР Мінморфлоту СРСР і Координаційним планом НДР з проблеми використання енергії вітру в межах загальносоюзної міжвузівської програми "Вітрохід".

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розробка методів підвищення ефективності пропульсивного комплексу на стадії проектування і в експлуатації теплохода з ВР. Для досягнення цієї мети треба було розв'язати такі головні завдання.

1. За даними досліджень режимів роботи пропульсивного комплексу теплохода з ВР розробити рекомендації з раціонального вибору складу і характеристик елементів комплексу на етапі проектування судна.

2. Обґрунтувати оптимальні експлуатаційні режими роботи пропульсивного комплексу з ВР і оцінити їх ефективність.

3. Розробити принципи, алгоритми і системи автоматичного управління роботою ВР і ГД у складі комбінованого пропульсивного комплексу.

Методи досліджень. В дисертації застосовано методи математичного моделювання з використанням ЕОМ, теорії оптимального управління, теорії імовірностей, теорії

автоматичного управління, теорії корабля та ін.

Наукова новизна роботи полягає в розв'язанні загальної теорії динаміки суднових гідромеханічних комплексів, створенні і розробці теоретичних засад дослідження і оптимізації режимів роботи комбінованого пропульсивного комплексу, а також його автоматизації. Вперше вирішені такі питання:

запропоновано методи моделювання аеродинамічних характеристик (АДХ) ВР за різними програмами управління кутом їх атаки;

встановлено закономірності зміни тяги і потужності ВР в залежності від їх АДХ, вітрових умов і швидкості судна;

запропоновано узагальнені показники ефективності ВР і обґрунтовано метод їх розрахунку;

розроблено математичні моделі пропульсивного комплексу з ВР, що дозволяють дослідити на ЕОМ усталені та перехідні режими роботи комплексу на прямому курсі і при русі судна за заданим морським шляхом;

обґрунтовано методи підвищення ефективності пропульсивного комплексу з ВР за рахунок прийняття раціональних проектних рішень при виборі складу і характеристик елементів комплексу;

розроблено методику оптимізації експлуатаційних режимів роботи пропульсивного комплексу з ВР стосовно до двох ієрархічних рівнів - "судноплавної компанії" та "судна";

для розв'язання задачі оптимізації режимів спільної роботи ВР з ГД обґрунтовано застосування класичних методів варіаційного обчислення, можливість використання яких узагальнено на випадок мінімізації функціоналу в класі кусково-гладких

дких функцій за наявності змінних обмежень у вигляді подвійних нерівностей;

розроблено вимоги, принципи, алгоритми і системи автоматичного управління ВР і ГД в складі комбінованого пропульсивного комплексу.

Практична цінність результатів роботи полягає в тому, що вони дозволяють на етапі проектування суден з ВР зробити раціональний вибір складу і характеристик елементів пропульсивного комплексу, а в період експлуатації судна - підвищити ефективність роботи комплексу за рахунок оптимізації його режимів і автоматизації процесів управління. Практичні результати досліджень рекомендовано для використання в науково-дослідних і проектно-конструкторських організаціях, суднохідних компаніях та в учбовому процесі вищих морських учбових закладів.

Реалізація роботи. Основні техніко-експлуатаційні вимоги до автоматизації судна із допоміжними ВР, алгоритми функціонування і варіанти технічної реалізації систем автоматичного управління ВР і ГД в їх спільній роботі як елементів комбінованого пропульсивного комплексу впроваджено в ЦКБ "Шельф" (Волгоград). В Українській Дунайській судноплавній компанії (Ізмаїл) впроваджена інструкція для плавскладу з управління ГД теплоходу "і. Сельвинський" із допоміжним вітрильним спорядженням. Крім того, деякі результати досліджень використані у ЦНДі морського флоту (Санкт-Петербург), у Чорноморському морському пароплавстві (Одеса), Каспійському ЦПКБ (Баку) і в навчальному процесі Одеської державної морської академії (ОДМА).

Апробація роботи. Результати досліджень

доповідались і обговорювались на:

II і III Всесоюзних симпозиумах "Транспарус-82" і "Транспарус-86" (Миколаїв, 1982 і 1986 рр.);

науково-технічних конференціях Ленінградського басейнового правління Науково-технічного товариства водного транспорту "Використання енергії вітру на морських транспортних суднах" (Ленінград, 1983, 1986, 1989 рр.);

семінарах "Проблеми морської кібернетики" секції наукової ради АН України з проблеми "Кібернетика" (Одеса, 1986, 1989, 1994 рр.);

наукових і науково-методичних конференціях професорсько-викладацького складу ОДМА (1986-1996);

науково-технічних і технічних радах з прийому виконаних НДР: у Каспійському ЦПКБ (Баку, 1988), Всесоюзному об'єднанні "Мортехсудоремпром" (Москва, 1988), Науково-технічному управлінні Мінморфлоту (Москва, 1989, 1991), ЦНДІ морського флоту (Санкт-Петербург, 1988, 1989, 1991), ЦКБ "Шельф" (Волгоград, 1989), Українському Дунайському пароплавлі (Ізмаїл, 1990), Чорноморському морському пароплавлі (Одеса, 1991), ОДМА (1990, 1992, 1994, 1995).

П у б л і к а ц і і. За темою дисертації опубліковано 21 наукову роботу; із них: одна монографія, 17 статей, два авторських свідоцтва на винахід. Крім того, результати роботи містяться у 16 звітах з НДР.

Н а з а х и с т в и н о с и т ь с я:

наукове обґрунтування узагальнених показників ефективності ВР і метод їх розрахунку;

наукове обґрунтування методів і результати дослідження усталених та перехідних режимів роботи пропульсивного комп-

лексу теплохода з ЕР при його русі прямим курсом і заданим морським шляхом;

методи підвищення ефективності пропульсивного комплексу з ЕР за рахунок прийняття раціональних проектних рішень при виборі складу і характеристик елементів комплексу;

методи і результати оптимізації експлуатаційних режимів роботи пропульсивного комплексу теплоходу з ЕР;

принципи, алгоритми, техніко-експлуатаційні вимоги і системи автоматизації ЕР і ГД у складі комбінованого пропульсивного комплексу.

Особистий вклад дисертанта. Наукові положення і результати, які виносяться на захист, одержано автором особисто. У друкованих роботах, що опубліковані у співавторстві, дисертанту належить: постановка задач, теоретичні обґрунтування і розробка математичних моделей, методів, алгоритмів, обробка результатів досліджень та їх аналіз.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, семи глав, закінчення, списку літератури із 172 найменувань та 8 додатків. Загальний обсяг роботи - 426 стор.: із них 275 стор. основного тексту, 18 стор. списку літератури, 83 малюнка, 21 таблиця і 41 стор. додатків.

#### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету та головні завдання роботи, відзначено її наукову новизну і практичну цінність, наведено

найбільш вагомими науковими досягненнями, які виносяться на захист, відомості про апробацію, публікації та реалізацію результатів дослідження.

У першій главі наведено аналітичний огляд робіт в галузі проектування та експлуатації суден з ВР. Розглянуто основні тенденції використання енергії вітру на транспортному флоті, проекти суден з ВР, а також конструктивні особливості перспективних типів ВР. Систематизовано дані з АДХ основних типів сучасних ВР. Проаналізовано також перспективні конструкції ВР, розроблені співробітниками Лабораторії досліджень суден з екологічно чистими двигунами (ЛДСЕД) Українського державного морського технічного університету під керівництвом докт. техн. наук проф. Крючкова Ю. С. Показано, що найбільш перспективним в наш час є використання допоміжних жорстких або м'яких вітрильних ВР за умовою забезпечення автоматичного або дистанційного управління ними.

Основним об'єктом дослідження є транспортні теплоходи дедвейтом до 10 тис. т з допоміжними вітрильними ВР. За основу дослідження і оптимізації режимів роботи пропульсивного комплексу взяті роботи А. М. Басіна, М. А. Брука, В. А. Ваншейдта, Ф. М. Кацмана, Г. О. Конакова, В. Б. Ліпса, В. І. Небенцова, Г. Е. Павленко, Р. Я. Першиця, Ю. П. Петрова, Ю. В. Ремеза, О. О. Ріхтера, К. К. Федяєвського і інш. Як базові в галузі вітроруху суден автор розглядає роботи Ю. С. Крючкова і Г. А. Алчуджана. Залучено також дослідження автора, викладені в кандидатській дисертації, що стосуються рішень деяких окремих задач оптимізації спільної роботи ГД і ВР для одного типу судна.

Проведеним аналізом доведено, що проблема розробки ме-

тодів підвищення ефективності пропульсивних комплексів теплоходів з ВР при проектуванні та експлуатації суден має важливе народно-господарське і соціально-економічне значення. На підставі зробленого аналізу сформульовано мету і завдання дослідження.

У другій главі виконано моделювання АДХ ВР різних типів. АДХ ВР прийняті за даними аеродинамічних випробувань, наведеними в літературних джерелах у вигляді табличних залежностей коефіцієнтів підйомної сили  $C_y$  і сили опору  $C_x$  від кута атаки  $\alpha$ . Для моделювання залежностей коефіцієнтів аеродинамічних сил тяги  $C_T$  і дрейфу  $C_D$  від напрямку позірного вітру  $\delta_K$ , що для конкретного типу ВР визначаються програмою управління кутом атаки, запропоновано два варіанти апроксимаційних моделей. Перша модель базується на припущеннях щодо можливості додержання незмінного кута атаки на більшості курсових кутів вітру і щодо рівності на повних курсових кутах коефіцієнта тяги найбільшому коефіцієнту опору, а коефіцієнта дрейфу - нулю. У цьому випадку модель може бути подана з використанням трьох одиничних показників аеродинамічної досконалості ВР: максимального коефіцієнту підйомної сили  $C_{y_{max}}$ , відповідної йому аеродинамічної якості  $K$  та максимального коефіцієнту сили опору  $C_{x_{max}}$ , у вигляді

$$C_T(\delta_K) = \begin{cases} C_{T_{max}} \sin(\delta_K - \delta'_A), & \delta'_A < \delta_K < \varphi_3, \\ C_{x_{max}}, & \varphi_3 \leq \delta_K \leq \pi, \end{cases}$$

$$C_D(\delta_K) = \begin{cases} C_{T_{max}} \cos(\delta_K - \delta'_A), & \delta'_A < \delta_K < \varphi_3, \\ 0, & \varphi_3 \leq \delta_K \leq \pi, \end{cases}$$

де параметри  $C_{Tmax}$ ,  $\varphi_3$  визначаються за формулами

$$C_{Tmax} = \sqrt{C_{x1}^2 + C_{y_{max}}^2}, \quad \varphi_3 = \frac{\pi}{2} + \delta'_A + \arccos \frac{C_{x_{max}}}{C_{Tmax}},$$

$$\delta'_A = \arctg K \quad \text{і} \quad C_{x1} - \text{кут аеродинамічного опору та коефі-}$$

цієнт сили опору на куті атаки максимуму підйомної сили відповідно. Найбільша похибка цієї моделі (на курсі бейдевінд) досягає 6 %, причому розрахункові значення завжди нижчі від фактичних.

Другу модель засновано на використанні апроксимаційних поліномів із застосуванням методу найменших квадратів у вигляді

$$C_y(\alpha) = \sum_{i=0}^n q_i \alpha^i, \quad C_x(\alpha) = \sum_{i=0}^m s_i \alpha^i,$$

де  $\{q_i\}_0^n$  і  $\{s_i\}_0^m$  - матриці коефіцієнтів. Подання АДХ ВР у формі алгебраїчних поліномів виявилось вельми зручним для подальших досліджень і дало можливість визначити аналітично або чисельно програму управління кутом атаки ВР в залежності від напрямку вітру. З використанням критерію максимуму тяги оптимальний кут атаки визначається розв'язанням рівняння

$$\sum_{i=1}^e i(q_i - s_i \text{ctg} \sigma_K) \alpha^{i-1} = 0,$$

де  $e$  - число, що дорівнює більшому з показників степеня  $n$  чи  $m$ . із застосуванням критерію максимуму аеродинамічної якості (на курсі бейдевінд) оптимальний кут атаки визначається з рівняння

$$\sum_{i=1}^n i q_i \alpha^{i-1} - \sum_{i=0}^m s_i \alpha^i - \sum_{i=1}^m i s_i \alpha^{i-1} \sum_{i=0}^n q_i \alpha^i = 0.$$

Залежності коефіцієнтів тяги і дрейфу від напрямку вітру у відповідності з обраною програмою управління ВР також апрок-

симулюються поліномами. Похибка другої моделі суттєво нижча і не перевищує 1,5 %. Для обробки результатів аеродинамічних випробувань і аналізу АДХ ВР розроблено пакет з п'яти застосовних програм для ПЕОМ. Моделювання виконано для 11 типів перспективних ВР. Розроблені моделі складають відповідну базу для подальших досліджень.

Для порівняльного аналізу АДХ запропоновано номенклатуру одиничних показників аеродинамічної досконалості ВР, а також класифікацію ВР за максимальним коефіцієнтом підйомної сили, у відповідності з якою всі ВР розподіляються на групи малої ( $C_y < 1,2$ ), середньої ( $1,2 \leq C_y < 1,8$ ), підвищеної ( $1,8 \leq C_y < 3,5$ ) та високої ( $C_y \geq 3,5$ ) ефективності. У дві останні групи потрапляють ті ВР, конструкція яких дозволяє управління обтіканням за рахунок зміни геометрії профілю (вітрило-крило з передкрилком і закрилком, ВР типу Walker Wingsail, крилові решітки різних типів); регулювання поля тиску навколо ВР шляхом зміни швидкості обертання роторів (ротор Флеттнера, аеродинамічний рушійний комплекс "ротор-крило") або вентилявання профіля ("турбопарус"). Проте застосування одиничних показників для оцінювання ефективності ВР виявляється недостатнім, тому необхідно обґрунтувати вибір узагальнених показників, які б комплексно характеризували корисний ефект від роботи ВР на судні.

Основний науковий результат дослідження другої глави - методика моделювання АДХ за різними програмами управління кутком атаки ВР, а також одержані з її використанням математичні моделі.

У т р е т і й г л а в і розглянуто режими роботи ВР в складі пропульсивного комплексу. Досліджено залежності

тяги і потужності ВР від їх АДХ, вітрових кондицій і швидкості судна. Сформульовано умови, за яких залежність тяги ВР від швидкості судна може мати екстремуми (і максимум, і мінімум). У той же час залежність потужності ВР від швидкості судна має максимум, абсцисса якого залежить від аеродинамічної якості ВР і для більшості курсових кутів вітру розташовується в зоні високих відносних швидкостей судна (по відношенню до швидкості істинного вітру). Тому для сучасних ВР в діапазоні експлуатаційних швидкостей транспортних суден, як правило, більшій швидкості відповідає більша потужність ВР і, отже, більша абсолютна економія палива.

Швидкість судна суттєво впливає на режим роботи ВР: більш високій швидкості відповідає менший курсовий кут позірного вітру. Тому закон розподілу імовірності позірного вітру залежить від швидкості судна. Якщо для напрямку істинного вітру прийняти закон рівної імовірності, то функція розподілу позірного вітру може бути подана у вигляді

$$F(\delta_K) = \frac{1}{\pi} \arccos \left( -\bar{V}_S \sin^2 \delta_K + \cos \delta_K \sqrt{1 - \bar{V}_S \sin^2 \delta_K} \right),$$

де  $\delta_K$  - курсовий кут позірного вітру;  $\bar{V}_S = V_S/V_M$  - відносна швидкість судна;  $V_S$  і  $V_M$  - швидкості судна і істинного вітру. Порівняно високі швидкості сучасних транспортних суден обумовлюють високу імовірність роботи ВР на зустрічних курсових кутах вітру. У зв'язку з цим ВР повинні бути пристосовані до ефективною роботи на курсі бейдевінд (тобто мати високу аеродинамічну якість), а в разі оцінки їх ефективності треба враховувати швидкість судна і характеристики розподілу імовірності вітру в районі експлуатації судна.

На підставі аналізу різних підходів до оцінки ефектив-

ності ВР за узагальнюючі показники запропоновано прийняти відносні інтегральні за швидкістю і напрямом істинного вітру величини тяги та потужності ВР. Для визначення цих показників розроблено метод, заснований на розрахунку математичного сподівання тяги і потужності ВР з використанням закону рівної імовірності для розподілу напрямку і закону Вейбулла - для розподілу швидкості істинного вітру. У відповідності із запропонованим методом згадані показники подаються як функції швидкості судна

$$\frac{\bar{T}(V_s)}{S} = \frac{\rho_l \delta \ln 2}{2\pi V_{0,5}} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} C_T(\delta_u, V_u, V_s) V_K^2(\delta_u, V_u, V_s) \times \\ \times \left(\frac{V_u}{V_{0,5}}\right)^{\delta-1} \exp\left[-\ln 2 \left(\frac{V_u}{V_{0,5}}\right)^\delta\right] d\delta_u dV_u, \quad (1)$$

$$\frac{\bar{N}(V_s)}{S} = \frac{\bar{T}(V_s)}{S} V_s, \quad (2)$$

де  $\bar{T}$  і  $\bar{N}$  - інтегральні тяга і потужність ВР відповідно;  $S$  - площа ВР;  $\rho_l$  - густина повітря;  $V_{0,5}$  і  $\delta$  - параметри розподілу Вейбулла (приймаються за довідковими даними Регістра);  $C_T(\delta_u, V_u, V_s)$  - коефіцієнт тяги ВР;  $V_K(\delta_u, V_u, V_s)$  - швидкість позірного вітру;  $\delta_u$  та  $V_u$  - курсовий кут і швидкість істинного вітру відповідно. Для визначення ділянок неперервності підінтегральної функції з урахуванням обмежень на діапазони робочих параметрів істинного і позірного вітру розроблено відповідний алгоритм. Практична реалізація метода забезпечується розробленою для ПЕОМ програмою.

Застосовні задачі, що розв'язуються із допомогою цього методу, включають:

порівняльну оцінку енергетичної ефективності ВР різних

типів на судах із різним рівнем середньої швидкості;

оцінювання величини середнього виграшу потужності і тяги за рахунок використання ВР і величини втрат через неоптимальність кутів установки ВР;

оцінку ефективності використання найбільш сильних і найменш слабких вітрів і рівня втрат потужності від шкідливого опору складених вітрил;

розробку рекомендацій з проектування та експлуатації пропульсивного комплексу суден з ВР.

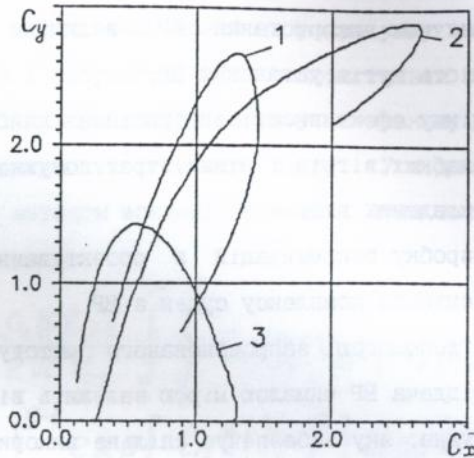
За допомогою запропонованого методу встановлено, що енерговіддача ВР чималою мірою залежить від середньої швидкості судна, яку забезпечує спільне використання ВР і головної силової установки. Залежність математичного сподівання потужності ВР від середньої швидкості містить максимум в реальному діапазоні швидкостей сучасних суден (мал. 1), абсциса якого визначається АДХ ВР, діапазоном використовуваних швидкостей вітру і параметрами вітрозабезпеченості району плавання. Для кожного з досліджених типів ВР може бути рекомендовано діапазон середніх швидкостей судна, де його ефективність буде найбільшою.

Головним науковим результатом дослідження третьої глави є метод розрахунку інтегральних показників ефективності ВР.

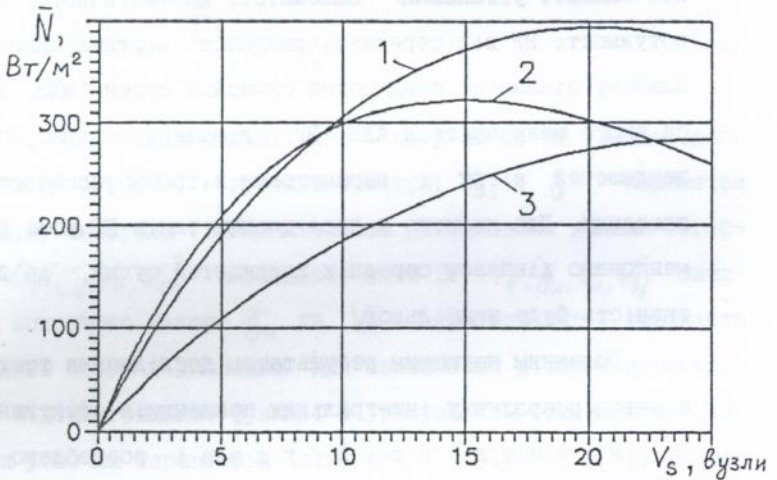
У ч е т в е р т і й г л а в і розроблено методику, математичні моделі і програмне забезпечення для чисельного моделювання руху теплохода з ВР. Подано три види математичних моделей: динаміки пропульсивного комплексу з ВР; усталеного руху комплексу; режимів роботи комплексу при русі судна заданим морським шляхом.

Математична модель динаміки пропульсивного комплексу з

а)



б)



Мал. 1. Поляри вітрорухіів різних типів (а) та залежність їх інтегральної потужності від середньої швидкості судна (б):  
1 - "крилова решітка" - біплан; 2 - "крилова решітка" з поворотними симетричними криловими елементами; 3 - жорстке парус-крило.

ВР за умовою руху судна курсом, близьким до прямого, з урахуванням припущення про сталий кут дрейфу подана у вигляді системи рівнянь

$$\left\{ \begin{array}{l} -(m_s + \lambda_{11}) \frac{dV_s}{dt} \cos\beta = X_r + X_A + X_p + X_{\delta A} - \sum_{i=1}^z P_{Ei} - \sum_{i=1}^n T_i, \\ -m_s \frac{dV_s}{dt} \sin\beta = Y_r - Y_A - Y_p - \sum_{i=1}^n D_i, \\ M_r - M_A - M_p - \sum_{i=1}^n M_i = 0, \\ (I_i + \lambda_{Bi}) \frac{dn_{Bi}}{dt} = \frac{1}{2\pi} (M_{Di} - M_{Ci}), \quad i = \overline{1, z}, \end{array} \right. \quad (3)$$

де  $m_s$  - маса судна;  $\lambda_{11}$  - приєднана маса рідини;  $X_r, Y_r, M_r$  - позиційні гідродинамічні сили і момент на корпусі судна;  $X_A, Y_A, M_A$  - аеродинамічні сили і момент, що діють на надводну частину корпусу і надбудови;  $X_p, Y_p, M_p$  - гідродинамічні сили і момент, що обумовлені дією руля;  $P_{Ei}$  - корисний упор (тяга)  $i$ -го гребного гвинта;  $z$  - кількість гребних гвинтів;  $T_i, D_i, M_i$  - аеродинамічні сили тяги і дрейфу, а також момент цих сил на  $i$ -му ВР;  $n$  - кількість ВР;  $X_{\delta A}$  - додатковий гідродинамічний опір, зумовлений впливом вітрового хвилювання і хитавиці судна;  $I_i$  - момент інерції мас  $i$ -го гребного вала;  $\lambda_{Bi}$  - приєднана маса рідини при обертанні  $i$ -го гребного гвинта;  $n_{Bi}$  - частота обертання  $i$ -го гребного гвинта;  $M_{Di}$  та  $M_{Ci}$  - відповідно моменти рушійний та опору на  $i$ -му гребному гвинті;  $\beta$  - кут дрейфу. Система (3) містить невідомі функції часу - швидкість судна  $V_s(t)$  і частоти обертання гребних гвинтів  $n_{Bi}(t), i = \overline{1, z}$ , а також невідомі сталі - кут дрейфу і кут перекладки руля. Для розв'язання системи використано процедуру чисельного інтегрування Рунге-Кутта-

Мерсона з автоматичним вибором кроку інтегрування.

Розроблена математична модель дозволяє моделювати поведінку пропульсивного комплексу при різних змінах вхідних координат, а саме: виконанні маневрів вводу ВР у робочий стан і виводу з нього; пориві вітру; зміні курсового кута вітру, подачі палива до ГД і кута установки ВР. При цьому завбачене моделювання роботи ГД за регуляторною і зовнішньою або частковою характеристиками. Вплив управління або збурення задається як функція часу.

Математична модель усталеного руху дозволяє розрахувати на ЕОМ режимні показники роботи пропульсивного комплексу з ВР за гвинтовою характеристикою з будь-яким кроком дискретизації швидкості судна для всього діапазону вітрових умов, можливих в експлуатації. Розрахунки ходкості теплохода з ВР виконано за методикою ЦНДІ морського флоту. Оскільки на судах з допоміжними ВР кут крену, як правило, не перевищує  $5^\circ$ , його вплив на аеро- та гідродинамічні сили не враховувався. Не враховувався також взаємний вплив кількох ВР, що є припустимим саме для випадку значного віддалення ВР один від одного, характерного для суден з допоміжними ВР. Додатковий опір рухові судна від морського хвилювання та хитамиці обчислювався згідно з методикою В.Б. Ліпіса. Висота хвиль 3 %-ної забезпеченості визначалася в залежності від швидкості вітру і району плавання (обмежений чи необмежений) для випадку розвиненого морського хвилювання. На підставі моделювання усталених режимів формується "матриця судна", що характеризує зміну параметрів роботи комплексу залежно від швидкості і напрямку істинного вітру і швидкості судна. За характерні режимні показники прийнято: швидкість судна,

частота обертання вала ГД, корисні потужність і момент ГД, витрата палива ГД, корисний упор гребного гвинта, похідна витрати палива за швидкістю судна. "Матриця судна" дає можливість визначити швидкість судна, витрату палива та інші параметри роботи пропульсивного комплексу в обумовлених режимах роботи ГД і будь-яких вітрових кондиціях.

Модель режимів роботи комплексу при русі судна заданим морським шляхом дозволяє прогнозувати середньорейсові експлуатаційні характеристики. Ця модель використовує довідкові дані Регістра із статистичної повторюваності вітрових режимів по районах океанів і морів в різні сезони року. У відповідності з методикою ЦНДІ морського флоту для кожної лінії і пори року формується "матриця маршрута", яка характеризує повторюваність різних вітрових режимів:  $\{p_{ij}\} (i=\overline{1,26}; j=\overline{1,19})$ , де  $i$  і  $j$  - параметри для визначення номерів інтервалів швидкості і напрямку істинного вітру відповідно. Кількість інтервалів прийнята з урахуванням дискретизації за швидкістю вітру 1 м/с в діапазоні 0 ... 25 м/с і за напрямом вітру -  $10^\circ$  в діапазоні 0 ...  $180^\circ$ . Для всіх  $ij$ -х вітрових умов відповідно до прийнятого способу регулювання ГД і заданого  $k$ -го швидкісного режиму із застосуванням "матриці судна" визначаються швидкість судна  $V_{ijk}$  і витрата палива  $B_{ijk}$ . Середньорейсові показники за відомою протяжністю маршрута  $L_{\Sigma}$  визначаються по формулах:

середньоозважена швидкість судна

$$\tilde{V}_k = \sum_{i=1}^{26} \sum_{j=1}^{19} V_{ijk} p_{ij},$$

час виконання рейсу

$$\tilde{T}_k = L_{\Sigma} / \tilde{V}_k,$$

середньозважена витрата палива

$$\tilde{B}_k = \sum_{i=1}^{26} \sum_{j=1}^{19} B_{ijk} P_{ij},$$

сумарна витрата палива

$$Q_{\Sigma k} = \tilde{T}_k \tilde{B}_k.$$

Методика чисельного моделювання і відповідні математичні моделі, розроблені автором, мають ряд відмінностей від методики ЦНДІ морського флоту, серед яких:

передбачено можливість моделювання динаміки пропульсивного комплексу з ВР;

для розрахунків АДХ ВР використано апроксимаційні моделі;

більш коректно визначається кут дрейфу і додатково враховується кут перекладки руля;

розрахунок опору від хвилювання та хитавиці виконується безпосередньо для кожного режиму роботи комплексу за всіх вітро-хвильових умов;

для визначення гідродинамічних характеристик гребних гвинтів використано апроксимаційні моделі без застосування коефіцієнту упора-діаметра;

розв'язання рівняння ходкості виконано методом дихотомії, що забезпечує стаду збіжність ітераційного процесу на відміну від методу простих ітерацій;

враховано вплив навантаження ГД на механічний ККД і питому ефективну витрату палива, а також більш коректно враховані різні обмеження на експлуатаційні режими роботи ГД;

"матриця судна" формується для усіх можливих в експлуатації режимів роботи ГД, а режимні показники роботи комплексу

су при визначенні середньорейсових характеристик обчислюються з її використанням у відповідності із заданим алгоритмом управління ГД;

забезпечено можливість порівняння різних варіантів спільного використання ВР і ГД з однаковою середньорейсовою швидкістю судна за результатами використання палива.

Розроблені математичні моделі і програми дають змогу розв'язувати широке коло задач, пов'язаних з дослідженнями техніко-експлуатаційних характеристик суден-вітроходів, серед яких:

визначення режимних показників роботи комплексу по гвинтовій характеристиці за будь-яких вітро-хвильових умов;

розрахунки середньорейсової швидкості, часу виконання рейсу і сумарних витрат палива за рейс і оцінка абсолютної і відносної економії палива за рахунок використання ВР;

аналіз алгоритмів управління ГД і ВР при їх спільній роботі з позицій економії палива;

аналіз ефективності різних проектних рішень по вибору типу і характеристик ВР, ГД, гребних гвинтів;

дослідження відгуку пропульсивного комплексу на різні динамічні збуджуючі дії, оцінка інерційних характеристик процесів в елементах комплексу;

вибір маршрута судна-вітрохода і оцінка доцільності лавірування та ін.

Вірогідності математичних моделей досягнуто коректною їх побудовою, ретельною формалізацією модельованих процесів, використанням надійних апробованих розрахункових методик, застосуванням цифрових ЕОМ, задовільним узгодженням розрахункових і реальних даних для деяких вітрильних і парусно-

дизельних суден.

В п'ятій главі розглянуто питання автоматизації управління ВР. Корисний ефект використання парусних ВР перш за все визначається ефективністю управління кутом атаки ВР. Розгляд ВР як об'єктів управління дав змогу розробити методи побудови програм і сформулювати вимоги до точності управління кутом атаки ВР. За критерій оптимальності при побудові програми управління кутом атаки прийнято мінімум витрати палива при заданій швидкості судна. В результаті моделювання залежності витрати палива від кута атаки ВР була також показана можливість використання для цієї програми максимуму тяги як критерію в різних вітрових умовах, за винятком бейдевінду при швидкості вітру більше 15 м/с (у цьому разі програму управління ВР може бути реалізовано на підставі критерію максимуму аеродинамічної якості).

ВР різного типу реагують на коливання напрямку вітру неоднаково. Для кількісного оцінювання цього факту запропоновано показник у вигляді довжини інтервалу кутів атаки  $\Delta d^*$ , на якому модуль похідної відносного коефіцієнта підйомної сили  $\bar{C}_y$  з кута атаки  $d$  не перевищує 1 % на 1 градус відхилення кута атаки від того кута, що відповідає  $C_{y_{max}}$ , тобто

$$\left| \frac{d \bar{C}_y}{d d} \right| \leq 1 \frac{\%}{\text{град}} , \text{ де } \bar{C}_y = C_y / C_{y_{max}} \cdot 100\% .$$

Аналіз ступеня впливу зміни кута атаки на  $C_y$  з використанням цього критерія показав: найменший ступінь згаданого впливу характерний для ВР типу "крилова решітка" з симетричними поворотними криловими елементами, найбільший - для жорстких парусів-крил. Встановлено, що для більшості типів ВР вимоги до точності управління кутом їх установки на курсі

Бейдевінд значно вищі, ніж на курсах бакштаг і фордевінд. Для обґрунтування потрібної точності управління кутом атаки ВР досліджено втрати інтегральної потужності рушіїв різних типів від неоптимальності установки ВР відносно вітру. Наприклад, для жорсткого паруса ЛДСЕД типу "спускні жалюзі" похибці установки ВР  $\Delta \alpha = 2^\circ$  відповідає втрата потужності до 2 %, при  $\Delta \alpha = 4^\circ$  - 3 ... 5,6 %, при  $\Delta \alpha = 10^\circ$  - 18 ... 29 %.

На підставі аналізу спектральних характеристик вітру і динамічних характеристик датчиків швидкості і напрямку вітру розроблено рекомендації з вибору типу і характеристик датчиків вітру для системи автоматичного управління (САУ) ВР. Проведено дослідження точності визначення кута вітру із застосуванням рекомендованого перетворювача параметрів вектора вітру суднової метеостанції КМС-3. З метою підвищення точності вимірювання даних розроблено рекомендації по розміщенню датчиків на судні з урахуванням вертикального профіля вітру і залежності похибки виміру напрямку вітру від його кута, а також запропоновано методику коректування показів датчиків швидкості і напрямку вітру в разі їх довільного розташування по висоті.

Для максимального зниження втрат потужності ВР через неоптимальність кута атаки при обмеженні витрат енергії на довороти ВР до оптимального кута розроблено методику визначення допустимої зони нечутності для вихідного сигналу управління кутом установки ВР.

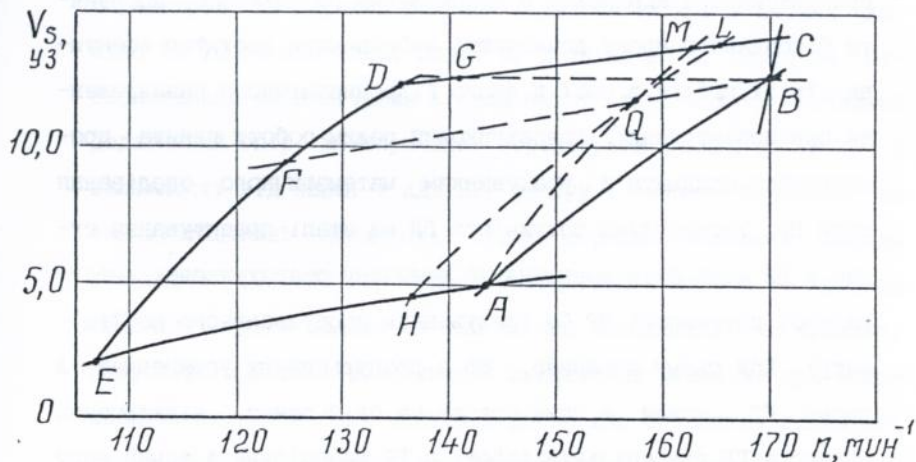
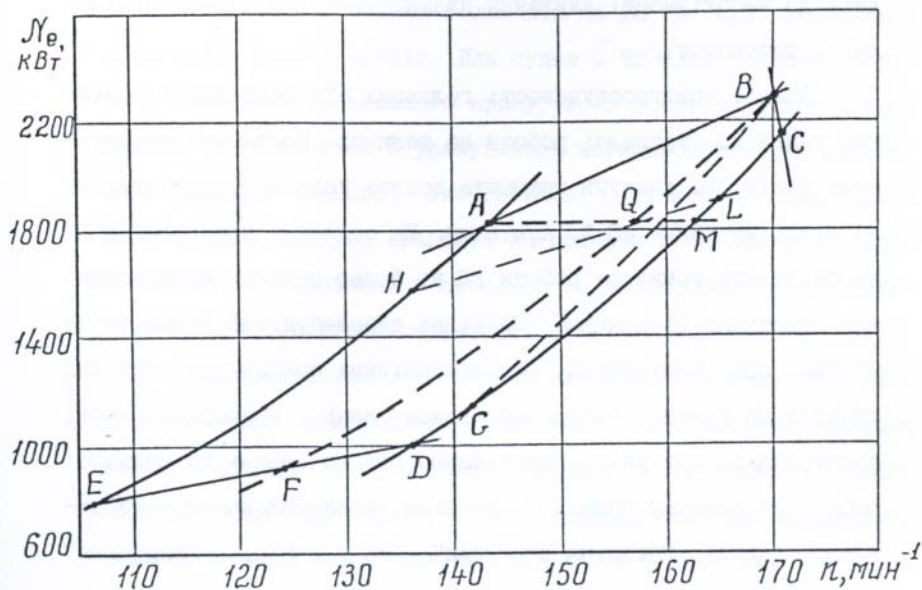
Обґрунтовано обсяг функцій і алгоритм функціонування САУ парусним ВР, а також вибір технічних засобів автоматизації для підвищення ефективності ручного дистанційного управ-

лінія ВР. Розроблено динамічний стенд САУ парусним ВР, призначений як для роботи в лабораторних умовах з модельним жорстким вітрилом, так і в судових умовах з реальними ВР. САУ побудовано на принципі уніфікації на рівні функціональних модулів, вона має багаторівневу структуру для можливості роботи в режимах дистанційного і автоматичного управління та під супервізорним управлінням бортової ЕОМ.

Дослідження, що є матеріалом п'ятої глави, дозволяє досягти підвищення ефективності використання ВР за рахунок автоматизації процесів управління.

В шостій главі досліджені експлуатаційні режими роботи комплексу з використанням розроблених математичних моделей і програм, розглянуто режими роботи ГД і гребних гвинтів у складі пропульсивного комплексу з ВР.

Моделювання зміни режимних показників роботи комплексу в залежності від вітро-хвильових кондицій проведено для чотирьох варіантів регулювання потужності ГД в сумісній роботі з ВР (мал. 2). Кожний з цих варіантів відповідає режимові утримання на сталому рівні одного з параметрів: швидкості судна (лінія ВВ), частоти обертання вала ГД (лінія ВС), ефективних потужності (лінія АМ) і моменту (лінія НЛ) на валу ГД. Із зміною зовнішніх умов утримання відповідного параметра на сталому рівні здійснюється тільки у межах області тривалих експлуатаційних режимів роботи ГД. З виходом на одне з обмежень - за мінімальним та максимальним навантаженням або граничною частотою обертання валу - двигун працює на відповідній межі області. Моделюванням показано, що з використанням гвинта фіксованого кроку тільки один режим із тих, що розглянуті, а саме режим сталої швидкості судна, приво-



Мал. 2. Область експлуатаційних режимів роботи пропульсивного комплексу танкера дедвейтом 5 тис. т з вітровоушнями площею  $440 \text{ м}^2$

дить до необхідності зниження навантаження ГД до меж мінімальної потужності.

Аналіз пристосовуваності головних суднових дизелів різних типів до тривалої роботи на режимах часткових навантажень довів, що двигуни працюють досить надійно і економічно на рівні не нижче 40 % номіналу. На суднах з допоміжними ВР необхідність тривалої роботи ГД на більш низьких навантаженнях практично не виникає. Провідні дизелебудівні фірми світу дбають про поліпшення експлуатаційних показників суднових дизелів на режимах часткових навантажень. Розроблено нові конструкції двигунів, спеціально пристосованих до тривалої роботи на важкому паливі з різними навантаженнями, наприклад, дизелі "Пілстик-Вяртсиля" РС 4.2-570, "Вяртсиля" Vasa 32, Vasa 46 та ін.

Дослідженнями режимів роботи гребних гвинтів у складі пропульсивного комплексу з допоміжними ВР показано, що гвинти фіксованого кроку дозволяють забезпечити достатню ефективність їх роботи в разі деякого гідродинамічного навантаження при проектуванні. Розрахунковий режим роботи гвинта пропонується приймати з урахуванням математичного сподівання тяги ВР. Установлена потужність ГД на етапі проектування судна з ВР може бути зменшена на величину розрахункової інтегральної потужності ВР (з урахуванням пропульсивного коефіцієнту). При цьому показано, що в пропульсивних установках з двома ГД, кожен з яких працює на свій гвинт, відключення одного з ГД при спільній роботі з ВР недоцільне з точки зору економії палива. Зокрема, для теплохода "і. Сельвинський" з двома м'якими вітрилами площею 200 м<sup>2</sup> за погожим вітром швидкістю 15 м/с відключення одного з ГД призводить до

збільшення витрат палива більш ніж на 20 % при збереженні швидкості судна 9 вузлів. Для суден з ВР слід віддати перевагу гвинтам регульованого кроку, хоча остаточний вибір типу гвинта здійснюється з урахуванням загальнопроектних рішень щодо головної суднової енергетичної установки. Традиційно малообертові двигуни працюють на-пряму з гвинтами фіксованого кроку, в установках з середньо- і високообертовими двигунами використовуються редуктор і гвинт регульованого кроку.

З використанням розроблених математичних моделей і програм виконано моделювання усталених та перехідних режимів роботи пропульсивного комплексу різних типів суден, зокрема: танкерів типу "Дрогобич", "Олег Кошевой" та "Дм. Медведев", суховантажників типу "інженер Белов" та "Кишинів". Одержано дані про зміну режимних показників роботи пропульсивного комплексу в залежності від вітро-хвильових умов і регульованих параметрів. На окремих режимах відносна економія палива навіть за умови обмеженої площі ВР досягає 50 %, проте за несприятливих умов вітрила в складеному стані можуть виявляти додатковий опір, що спричиняє перевитрати палива до 10 %. В залежності від площі і АДХ ВР, району і сезону плавання та експлуатаційної швидкості судна середня економія палива становить 10...20 %, причому відносна економія із зростом швидкості судна падає, в той же час абсолютна, як правило, несуттєво зростає. Моделювання перехідних режимів при виконанні експлуатаційних маневрів дозволило одержати динамічні характеристики, корисні для проектування САУ режимами роботи пропульсивного комплексу.

Теоретичним і експериментальним шляхом обґрунтовано можливість використання квазістаціонарного підходу в дослід-

женні раціональних режимів спільної роботи ГД і ВР - підходу, що ігнорує динаміку переходу від одного усталеного режиму до іншого. З метою розв'язання задач оптимізації роботи пропульсивного комплексу побудовано апроксимаційні залежності витрат палива від швидкості судна з ВР в різних вітрових умовах. Апроксимація поліномами третього ступеня забезпечує точність до 1 %.

Запропоновано моделювання для оцінки доцільності лавірування судна з ВР, що рухається проти вітру. Для цього за умов постійності кількох швидкостей руху судна проти вітру визначалися потрібні швидкості руху на різних лавіровочних кутах і розраховувались відповідні витрати палива. Показано, що для згаданих вище типів суден витрати палива із зростанням лавіровочного кута неминуче зростають, тобто використання лавіровки недоцільне.

Матеріали цієї глави надають можливість прийняття раціональних рішень при проектуванні пропульсивного комплексу теплоходів з ВР, а також обґрунтувати методи їх ефективної експлуатації.

В сьомій главі розглянуто питання оптимізації експлуатаційних режимів пропульсивного комплексу теплохода з ВР стосовно двох ієрархічних рівнів - "судноплавна компанія" і "судно". На засадах критеріїв першого рівня судну визначається середньорейсова швидкість або час прибуття до порту призначення. Критерії, що відповідають рівню судна, стосуються безпосередньо вибору режимів роботи силової установки в конкретних умовах експлуатації і формуються на підставі задач вищого рівня.

Визначення оптимальних середньорейсових швидкостей су-

ден в ВР обумовлено такими критеріями: мінімум витрат палива на мильо шляху плавання, мінімум експлуатаційних витрат, максимум прибутку за одиницю часу рейса з урахуванням і без урахування стоянки. При цьому використовувались результати моделювання середньорейсових експлуатаційних характеристик суден в ВР для різних ліній і сезонів року, за якими будувались апроксимаційні залежності середньозваженої за рейс витрати палива ГД від середньозваженої швидкості судна. Застосування алгебраїчних поліномів дозволило визначити оптимальну швидкість судна аналітично. Запропонованою методикою одержано графічні і аналітичні розв'язання для всіх згаданих критеріїв оптимізації. Розроблено відповідне програмне забезпечення для бортової ЕОМ.

За критерій оптимізації експлуатаційних режимів спільної роботи ГД і ВР прийнято мінімум витрати палива за рейс  $Q_{\Sigma}$  при заданій середньорейсовій швидкості судна  $V_{Scp}$ , тобто

$$Q_{\Sigma} = \int_0^{T_{\Sigma}} B(t, V_s) dt \rightarrow \min, \quad (5)$$

за умовою

$$\frac{1}{T_{\Sigma}} \int_0^{T_{\Sigma}} V_s(t) dt = V_{Scp} = \text{const}, \quad (6)$$

де  $B(t, V_s)$  - поточна витрата палива ГД, що є функцією швидкості судна і зовнішніх умов, залежних від часу  $t$ ;  $T_{\Sigma}$  - час виконання рейсу.

Вид залежності  $B(t, V_s)$  визначено із застосуванням статистичного і квазістаціонарного підходів. Час рейсу розділено на  $n$  умовних часових інтервалів, всередині яких параметри вітру і хвилювання вважаються незмінними. В моменти

часу  $t = t_h$ , де  $t_h \in (0; T_x)$ ,  $h = \overline{1, n}$ , припускається стрибкувата зміна вітрових умов. У відповідності із квазістационарним підходом динаміка перехідних рухів при  $t = t_h$  не враховується. Таким чином, залежність витрат палива ГД від швидкості судна подана у вигляді кусково-сталогої функції часу, що має розриви першого роду в точках  $t = t_h$ :

$$B(t, V_s) = \sum_{m=0}^3 b_m(t) V_s^m, \quad t \in [t_h; t_{h+1}], \quad h = \overline{0, n}. \quad (7)$$

На управління, яким у даному разі є швидкість судна, накладено змінні обмеження у вигляді подвійних нерівностей

$$V_{smin}(t) \leq V_s(t) \leq V_{smax}(t),$$

де  $V_{smin}(t)$ ,  $V_{smax}(t)$  - кусково-сталі функції часу. З метою обґрунтування можливості застосування в розв'язанні цієї задачі класичних методів варіаційного обчислення доведено наступну теорему.

Теорема. Нехай у функціоналі

$$Q = \int_a^b F(t, y, y') dt, \quad (8)$$

де  $y' = dy/dt$ , функція  $F(t, y, y')$  має розриви першого роду в точках  $t_h \in (a; b)$ , а на функцію  $y(t)$  накладено обмеження виду

$$y_{min}(t) \leq y(t) \leq y_{max}(t), \quad (9)$$

де  $y_{min}(t)$ ,  $y_{max}(t)$  - кусково-гладкі функції виду

$$y_{min}(t) = \tilde{y}_h, \quad y_{max}(t) = \bar{y}_h, \\ t \in (t_h; t_{h+1}), \quad h = \overline{0, n}, \quad t_0 = a, \quad t_{n+1} = b. \quad (10)$$

Тоді за умов

$$\lim_{y' \rightarrow \infty} \frac{F(t, y, y')}{y'} = 0, \quad h = \overline{1, n}, \quad (11)$$

функціонал (8) за наявності обмежень (9) може досягати екстремуму у класі кусково-гладких функцій, що в точках  $t_h$  ( $h = \overline{1, n}$ ) стрибком переходять від одного значення до іншого, лише на кривих, складених з кусків межі допустимої області і кусків екстремалей, що задовольняють при  $t \neq t_h$  рівнянню Ейлера

$$\frac{\partial F}{\partial y} - \frac{d}{dt} \frac{\partial F}{\partial y'} = 0, \quad t \in \bigcup_{h=0}^n (t_h; t_{h+1}).$$

Ця теорема дозволяє розв'язати оптимізаційну задачу (5) - (6), ізопериметричну з урахуванням інтегральної умови (6). Рівняння Ейлера для проміжної функції Лагранжа після відповідних перетворень має вигляд

$$\frac{\partial B}{\partial V_s} = -\lambda_0, \quad t \in \bigcup_{h=0}^n (t_h; t_{h+1}), \quad (12)$$

де  $\lambda_0$  - множник Лагранжа (стале число).

Позначимо  $C = -\lambda_0$ , тоді з урахуванням (7) з виразу (12) одержуємо рівняння екстремалей у явному вигляді

$$V_s(t) = -\frac{\beta_2(t)}{3\beta_3(t)} + \sqrt{\left(\frac{\beta_2(t)}{3\beta_3(t)}\right)^2 - \frac{\beta_1(t)}{3\beta_3(t)} + \frac{C}{3\beta_3(t)}}, \quad (13)$$

$$t \in \bigcup_{h=0}^n (t_h; t_{h+1}).$$

Таким чином, на кожному часовому інтервалі  $(t_h; t_{h+1})$ ,  $h = \overline{0, n}$ , що характеризується незмінними зовнішніми умовами, швидкість судна визначається за виразом (13) і забезпечує мінімум сумарних витрат палива. При  $t = t_h$  разом із зміною зовнішніх умов повинна бути змінена до нового значення відповідно (13) і швидкість судна. Стала  $C$  визначається на підставі (6) і залежить від заданої середньорейсової швидкості, району пла-

вання і пори року. Оптимальні режими спільної роботи ВР і ГД забезпечуються розробленим способом регулювання потужності ГД, який захищено авторським свідоцтвом на винахід. Він полягає у вимірюванні поточних швидкостей судна і витрат палива ГД, усередненні їх на протязі заданого періоду часу і регулюванні потужності ГД пропорційно різниці сталої  $C$  і відношення приросту витрат палива до приросту швидкості судна.

Квазістаціонарний підхід до оптимізації експлуатаційних режимів роботи пропульсивного комплексу з ВР застосований автором на підставі теоретичних і експериментальних розробок. Запропонований засіб оптимального регулювання потужності може бути вжитий на мало- і середньотонажних суднах.

Розроблено алгоритм оптимального регулювання потужності ГД шляхом дії на настройку швидкісного режиму всережимоного регулятора частоти ГД, а також відповідний пристрій, що забезпечує оптимальне регулювання у залежності від вітро-хвильових кондицій за критерієм мінімальної витрати палива при заданій середньорейсовій швидкості судна (загаданий пристрій захищено авторським свідоцтвом).

З використанням математичної моделі руху судна з ВР заданим морським шляхом виконане моделювання оптимальних і квазіоптимальних режимів роботи пропульсивного комплексу з ВР. Оптимізація експлуатаційних режимів шляхом регулювання потужності ГД залежно від вітро-хвильових умов при заданій середньорейсовій швидкості судна дозволяє одержати додаткову економію палива до 4 %. Імітаційним моделюванням рейса можна обрати квазіоптимальний режим, що наближається до оптимального і простіше реалізується. Так, для теплохода "і. Сельвинський" рекомендовано комбінований режим, за яким додержу-

ється стала частота обертання вала ГД при гідродинамічно важкому гвинті і стала швидкість судна при полегшенні гвинта за рахунок використання вітрил. Застосування бортової ЕОМ дозволяє в судових умовах виконати за розробленими методами і програмами розрахунки рекомендованих режимів зважаючи на фактичні параметри роботи комбінованого пропульсивного комплексу.

Результати дослідження сьомої глави дозволяють забезпечити оптимальні експлуатаційні режими роботи пропульсивного комплексу теплохода з ВР.

У д о д а т к а х наведено: методику апроксимації і результати моделювання аеродинамічних характеристик деяких типів ВР; методику аналітичного визначення оптимального кута атаки ВР в окремих випадках; обґрунтування алгоритму визначення робочого діапазону використовуваних швидкостей і курсових кутів істинного вітру; тексти програм для ЕОМ; акти впровадження результатів дослідження.

## В И С Н О В К И

1. В дисертації розв'язано наукову проблему розробки і теоретичного обґрунтування методів підвищення ефективності пропульсивних комплексів теплоходів із ВР при їх проектуванні і експлуатації, що має важливе соціально-економічне і народно-господарське значення. Уперше за системною постановкою узагальнені розробки у галузі проектування і експлуатації суден-вітроходів, а також динаміки та оптимізації режимів роботи судових пропульсивних комплексів, що дозволило створити теоретичні основи для дослідження, оптимізації і авто-

матизації нового типу комбінованих суднових енергетичних установок теплоходів з ВР.

2. Дослідження показали, що одиничні показники аеродинамічної досконалості не дають змоги оцінити ефективність роботи ВР у складі суднового пропульсивного комплексу. Запропоновано узагальнені показники ефективності ВР і метод їх розрахунку, що дозволяє обґрунтувати раціональний вибір типу ВР для установки на конкретному судні і вирішити ряд гостросовних задач. З використанням цього методу доведено можливість ефективного застосування ВР на судах з відносно високим рівнем середньої швидкості.

3. Розроблені в дисертації математичні моделі і програмне забезпечення для ЕОМ дозволяють виконати дослідження установлених і перехідних режимів роботи комплексу у прямолінійному русі, статистичне моделювання середньорейсових показників руху судна заданим маршрутом, а також вирішити широке коло завдань, пов'язаних з аналізом і прогнозуванням техніко-економічних характеристик теплоходів з ВР.

4. Запропоновані рішення у галузі автоматизації процесів управління ВР дозволяють забезпечити високу ефективність їх застосування на флоті. У дисертації обґрунтовано: необхідний обсяг функцій та алгоритми функціонування САУ ВР; методику визначення програмної залежності управління кутом атаки ВР і потрібної точності його підтримання; вимоги до характеристик датчиків вітру і рекомендації з їх розміщення на судні з урахуванням вертикального профілю вітру; технічні засоби автоматизації для дистанційного та автоматичного управління ВР. Розроблену відповідно з цими вимогами САУ ВР побудовано на принципі уніфікації на рівні функціональних моду-

лів з багаторівневою структурою, що передбачає можливість роботи системи в режимах дистанційного і автоматичного управління і під супервізорним управлінням бортової ЕОМ.

Б. Проведені дослідження режимів спільної роботи ГД, гребних гвинтів і ВР у складі гідродинамічного пропульсивного комплексу дозволили визначити характер і діапазон змін режимних показників роботи комплексу за різних зовнішніх умов і засобів регулювання. З метою визначення меж мінімальної експлуатаційної потужності проведено аналіз економічності та надійності головних судових дизелів різних фірм у тривалій роботі на часткових навантаженнях. Розроблено рекомендації по проектуванню та експлуатації пропульсивного комплексу теплоходів з ВР.

Б. Оптимізацію експлуатаційних режимів руху судна з ВР виконано на двох ієрархічних рівнях. Для рівня "судноплавна компанія" одержано аналітичні та графічні рішення для визначення середньорейсової швидкості за різними критеріями оптимальності. На рівні "судно" за критерій оптимальності обгрунтовано мінімум сумарних витрат палива на здійснення рейсу із заданою середньорейсовою швидкістю. Для рішення оптимізаційної задачі пошуку мінімуму функціонала в класі кусково-гладких функцій при наявності змінних обмежень на управління у вигляді подвійних нерівностей доведено можливість використання класичних методів варіаційного обчислення. При цьому одержано вираз для визначення оптимальної поточної швидкості теплохода з ВР у залежності від заданої середньорейсової швидкості судна і зовнішніх умов. Для реалізації оптимальних режимів розроблено спосіб і пристрій оптимального регулювання потужності ГД на судах з ВР (захищені авторськими сві-

доцтвами на винаходи). Моделювання режимів роботи пропульсивного комплексу конкретних суден з ВР дозволяє приймати рішення для визначення квазіоптимальних експлуатаційних режимів.

7. Розроблені в дисертації теоретичні засади і методи підвищення ефективності пропульсивного комплексу теплохода з ВР створюють передумови для подальшого вивчення можливостей використання на судах безкоштовної та екологічно чистої енергії вітру з метою переведення частини тонажу транспортного флоту на допоміжний вітрорух.

Список опублікованих наукових праць, що відображують основні положення дисертації:

#### Монографія

1. Миюсов М. В. Режимы работы и автоматизация пропульсивного комплекса теплохода с ветродвижителями. - Одесса: Одесская государственная морская академия; ОКФА, 1996. - 256 с.

#### Статті у наукових виданнях

2. Миюсов М. В. Особенности работы энергетической установки парусно-дизельного судна // Исследование, проектирование и постройка парусных судов: Сб. науч. тр. / НКМ - Николаев, 1982. - С. 79-86.

3. Миюсов М. В., Новокрещенцев А. А. Автоматизированное управление парусным вооружением транспортных судов // Исследование, проектирование и постройка парусных судов: Сб. науч. тр. / НКМ - Николаев, 1982. - С. 86-93.

4. Кринецкий И. И., Миюсов М. В. Использование энергии ветра на судах со вспомогательным парусным вооружением //

Перспективные типы судов, мореходные и ледовые качества: Сб. науч. тр. / ЦНИИМФ. - Л.: Транспорт, 1985. - С. 109-114.

5. Михсов М. В. Автоматическая оптимизация режимов работы транспортных судов // Разработка и моделирование в технических и социально-экономических проблемах освоения океана: Сб. науч. тр. - Владивосток: ДВПИ, 1985. - С. 38-40.

6. Михсов М. В. Оптимизация проектных решений по эффективному использованию вспомогательного ветроэнергетического вооружения на судах // Перспективные типы морских транспортных судов: Сб. науч. тр. / ЦНИИМФ. - Л.: Транспорт, 1986. - С. 109-116.

7. Михсов М. В. Оптимизация совместной работы главного двигателя и вспомогательной ветросиловой установки транспортного судна // Морской транспорт. Сер. Техническая эксплуатация флота. Экспресс-информация. - 1986. - Вып. 14 (634). - С. 12-22.

8. Михсов М. В. Программа "Ветроход" для исследования режимов совместной работы главного судового двигателя и вспомогательного ветроэнергетического вооружения // Исследование, проектирование и постройка парусных судов: Сб. науч. тр. / НКИ. - Николаев, 1986. - С. 45-51.

9. Михсов М. В., Варбанец Р. А. Системы автоматизации судов японской постройки со вспомогательным парусным вооружением // Судостроение за рубежом. - 1988. - N 4 (256). - С. 12-24.

10. Кринецкий И. И., Михсов М. В. Использование имитационных моделей при решении задач оптимизации управления судовыми комплексами с ветросиловыми установками // Информационные системы на транспорте: Сб. науч. тр. / Ин-т кибернетики

АН УССР. - Киев, 1989. - С. 55-60.

11. Бендерук А. М., Миюсов М. В. Оптимизация пути транспортного судна с ветродвижителями // Применение информационных систем на транспорте: Сб. науч. тр. / Ин-т кибернетики АН УССР. - Киев, 1990. - С. 81-87.

12. Миюсов М. В., Карпилов А. Ю. Результаты моделирования режимов работы пропульсивных комплексов судов типа "Инженер Белов" и "Кишинев" со вспомогательными ветродвижителями // Ветродвижение и ветроэнергетика транспортных судов. Сб. науч. тр. / ЦНИИМФ. - М.: Транспорт, 1991. - С. 96-101.

13. Миюсов М. В., Бендерук А. М. Алгоритм расчета траектории оптимального по расходу топлива пути транспортного судна с ветродвижителями // Ветродвижение и ветроэнергетика транспортных судов: Сб. науч. тр. / ЦНИИМФ. - Л.: Транспорт, 1991. - С. 31-36.

14. Миюсов М. В., Карпилов А. Ю. Модель динамики судового пропульсивного комплекса с ветродвижителями // Автоматизация судовых технических средств: Научн. техн. сб. - 1993. - Вып. 1. - Одесса: ОГМА. - С. 63-72.

#### Авторські свідчення

15. Миюсов М. В. Способ регулирования мощности судовой дизельной установки. А. с. 1257264. - Оpubл. в Б. И. - 1986. - N 34.

16. Миюсов М. В., Михайлов С. А., Карпилов А. Ю. Устройство регулирования мощности главного судового двигателя. А. с. 1601025. - Оpubл. в Б. И. - 1990. - N 39.

Автореферат, депоновані та ановані у  
наукових журналах статті

17. Миюсов М. В. Оптимизация совместной работы главного

двигателя и вспомогательной ветросиловой установки транспортного судна: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. - Одесса: ОВИМУ, 1986. - 22 с.

18. Михсов М. В. К вопросу оптимизации совместного использования вспомогательного ветроэнергетического вооружения и главного судового двигателя. Одес. высш. инж. мор. уч-ще. - Одесса, 1985. - 16 с. - Деп. в В/О "Мортехинформреклама" 23.05.85, N 446 мф-85Деп.

19. Михсов М. В. Метод сравнительной оценки эффективности судовых ветроэнергетических установок различных типов. Одес. высш. инж. мор. уч-ще. - Одесса, 1985. - 12 с. - Деп. в В/О "Мортехинформреклама" 04.11.85, N 503 мф-85Деп.

20. Михсов М. В. Способы автоматизации скоростных режимов судов с ветродвижителями: Информационный листок/ Украинская информационная корпорация "УКРНТИ". Одесский ЦНТ и ЭИ. - Одесса, 1995. - N 069-95. - 4 с.

21. Михсов М. В. Устройство регулирования мощности судовой дизельной установки: Информационный листок/ Гос. комитет Украины по вопросам науки и технологий. Одесский ЦНТ и ЭИ. - Одесса, 1995. - N 194-95. - 5 с.

Особистий внесок автора в роботах, які опубліковані в співавторстві, наведено в таблиці.

Декларація особистого внеску автора  
в роботах, опублікованих у співавторстві

| N<br>п/п | Пов. за перел.<br>публікацій | Особистий внесок<br>в зміст   | Внесок<br>у % |
|----------|------------------------------|---|---------------|
| 1        | 3                            | Розробка алгоритма управління жорстким вітрилом                       | 70            |
| 2        | 4                            | Методика розрахунку і аналіз силових та енергетичних показників ВР    | 80            |
| 3        | 9                            | Систематизація, аналіз і узагальнення публікацій                      | 80            |
| 4        | 10                           | Обґрунтування принципів побудови імітаційних моделей                  | 80            |
| 5        | 11                           | Обґрунтування критеріїв і методів оптимізації                         | 40            |
| 6        | 12                           | Розробка математичних моделей і програм для ЕОМ, аналіз результатів   | 70            |
| 7        | 13                           | Розробка алгоритма вибору оптимального маршруту                       | 40            |
| 8        | 14                           | Розробка методів і математичних моделей, обробка і аналіз результатів | 70            |
| 9        | 16                           | Структура регулятора і основні технічні рішення                       | 33            |

Miyusov M.V. Modes of operation and automatic control of the motorship propulsive complex with wind-propulsors. Manuscript. Doctor of sciences (technology) dissertation, speciality 05.08.05 - Ship's power plants, Ukrainian State Maritime University, Nikolaev, 1996.

Presented the results of working out the theoretical fundamentals of research and optimization of operational modes of the combined motorship propulsive complex with wind-propulsors. Worked out the methods of increasing the effectiveness of the complex through the choice of the rational project decisions, the optimization of operational modes and automatic control. On the research results published 1 monograph and 20 scientific works (including 2 author's certificates).

Миюсов М.В. Режимы работы и автоматизация пропульсивного комплекса теплохода с ветродвижителями. Диссертация (рукопись) на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.08.05 - Судовые энергетические установки, Украинский государственный морской технический университет, Николаев, 1996.

Представлены результаты разработки теоретических основ исследования и оптимизации режимов работы комбинированного пропульсивного комплекса теплохода с ветродвижителями. Разработаны методы повышения эффективности комплекса путем выбора рациональных проектных решений, оптимизации эксплуатационных режимов работы и автоматизации процессов управления. По результатам исследований опубликованы 1 монография и 20

научных работ (в том числе 2 авторских свидетельства).

Ключові слова: суднові енергетичні установки, вітрово-  
щії, математичне моделювання, оптимізація, автоматизація.

*Мисюк*

ДРА ОДМА. Підписано до друку 19.08.96 р.

Умовн. друк. арк. 2,0. Тираж 100 прим.

Замовлення N 256.

1100700

AE 35.522

**AB 35.522**