

УДК 629.5
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.3\(496\).7](https://doi.org/10.15589/znp2024.3(496).7)

DETERMINATION OF SCHEMATIC SOLUTIONS RATIONAL STRUCTURES OF SURFACE SHIP POWER PLANTS IN THE DISCLOSURE OF TARGET UNCERTAINTY

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ СТРУКТУР СХЕМНИХ РІШЕНЬ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК НАДВОДНИХ КОРАБЛІВ ПРИ РОЗКРИТТІ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ЦІЛІ

Vadym E. Borysov
vadim.borisov@srdsr.com
ORCID: 0000-0002-0827-7480
Heorhii V. Kuznetsov
kuznetsov_georgiy@ukr.net
ORCID: 0000-0002-1028-4102

В. Є. Борисов,
т.в.о. директора
Г. В. Кузнецов,
аспірант
інженер-конструктор 3 категорії

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
State Research and Design Shipbuilding Center, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
ТОВ Дослідно-проектний центр кораблебудування, м. Миколаїв*

Abstract. The rational structure of ship power plants when located in the engine room is based on the conditions of survivability, energy efficiency and compactness. The above-mentioned conditions have certain contradictions and require substantiation of an optimization solution by disclosing uncertainties under technical limitations due to the class of a surface ship. When disclosing the uncertainties of ship power plants, the consideration of options related to the achievement of the goal and taking into account the effect of the external environment requires the use of various methods. The aim of the research is to determine the rational structure of ship power plants schematic solutions in the engine room of the ship under the conditions of technical constraints. The research method of the complex technical systems structure is based on systems theory and system analysis using the mathematical theory of graphs.

The following results were obtained: the use of separate variants of power plants structural diagrams for surface ships with a full forward speed from 25 to 60 knots was determined, which justifies the use of a diesel plant at speeds up to 25 knots, gas turbine and combined plants CODOG, CODAG and COGAG at speeds from 30 to 44 knots, combined plants CODOG, CODAG and COGAG at speeds of more than 45 knots; surface ships power plants structural diagrams in terms of the diameter of the structure, the coherence of elements, its degree of centralization and complexity have the following topological properties: diesel plant – compact, not complicated, but has satisfactory indicators of survivability and uneven loading; CODOG – relatively compact, more complex, tenacious and evenly loaded; CODAG – has increased dimensions, is complex, but tenacious and evenly loaded; COGOG – compact, more complex, tenacious and evenly loaded; COGAG – has increased dimensions, is more complex, tenacious and less evenly loaded.

The technical implementation of the elements of the ship's power plant in its composition depends on the initial data and is associated with the search for a generalized goal on the basis of a specified technical characteristics set and their quantitative assessments.

Key words: composition; simple; combined; topological properties; graph; indicators.

Анотація. Раціональна структура корабельних енергетичних установок при розташуванні в машинному відділенні базується на умовах живучості, енергетичної ефективності та компактності. Наведені умови мають певні протиріччя і потребують обґрунтування оптимізаційного рішення шляхом розкриття невизначеностей при технічних обмеженнях внаслідок класу надводного корабля. При розкритті невизначеностей корабельних енергетичних установок розгляд варіантів пов'язаних з досягненням цілі та урахуванням дії зовнішньої середовища потребують використання різних методів.

Метою дослідження є визначення раціональної структури схемних рішень корабельних енергетичних установок в машинному відділенні корабля на умовах технічних обмежень. Метод дослідження структури складних технічних систем базується на теорії систем та системному аналізі з використанням математичного апарату теорії графів.

Отримано наступні результати: визначено використання окремих варіантів структурних схем енергетичних установок для надводних кораблів зі швидкістю повного переднього ходу від 25 до 60 вузлів, що обґрунтовує використання дизельної установки при швидкостях до 25 вузлів, газотурбінних і комбінованих установок CODOG, CODAG та COGAG при швидкостях від 30 до 44 вузлів, комбінованих установок CODOG, CODAG та COGAG при швидкостях більше 45 вузлів; структурні схеми енергетичних установок надводних кораблів за показниками діаметру структури, зв'язковості елементів, її ступеня централізації та складності мають наступні топологічні властивості: дизельна установка – компактна, не складна, але має задовільні показники живучості та нерівномірності завантаження; CODOG – відносно компактна, більш складна, живуча і рівномірно завантажена; CODAG – має підвищені габарити, складна, але живуча і рівномірно завантажена; COGOG – компактна, більш складна, живуча і рівномірно завантажена; COGAG – має підвищені габарити, більш складна, живуча і менш рівномірно завантажена.

Технічна реалізація елементів корабельної енергетичної установки в її складі залежить від вихідних даних і пов'язана з пошуком узагальненої цілі на базі сукупності заданих технічних характеристик та їх кількісних оцінок.

Ключові слова: склад; прості; комбіновані; топологічні властивості; граф; показники.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Рациональна структура корабельних енергетичних установок (КЕУ) при розташуванні в машинному відділенні базується на умовах живучості, енергетичної ефективності та компактності. Наведені умови мають певні протиріччя і потребують обґрунтування оптимізаційного рішення шляхом розкриття невизначеностей при технічних обмеженнях внаслідок класу надводного корабля.

При розкритті невизначеностей КЕУ розгляд варіантів пов'язаних з досягненням цілі та урахуванням дії зовнішньої середовища потребують використання різних методів.

Тому обґрунтування методу оптимізації для визначення раціональної структури простих і комбінованих схемних рішень енергетичних установок надводних кораблів є актуальним науково-технічним завданням.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

За структурою КЕУ можливо представити як прості схеми – дизельні енергетичні установки та комбіновані енергетичні установки (CODOG, CODAG, COGOG, COGAG). Згідно з класифікації енергетичних установок використовують наступні літерні символи: D – дизельна установка, G – газотурбінна, S – котлотурбінна, N – ядерна, L – електрична передача потужності на гребний вал, CO – комбінована, O – з розподіленою роботою установки економічного ходу та A – з сумісною роботою двигунів на усіх режимах.

На рисунках 1, 2 та 3 приведені результати аналізу існуючих типів головних пропульсивних установок КЕУ [1].

Результати приведені для 53 проектів фрегатів, 39 проектів корветів та 85 проектів патрульних кораблів.

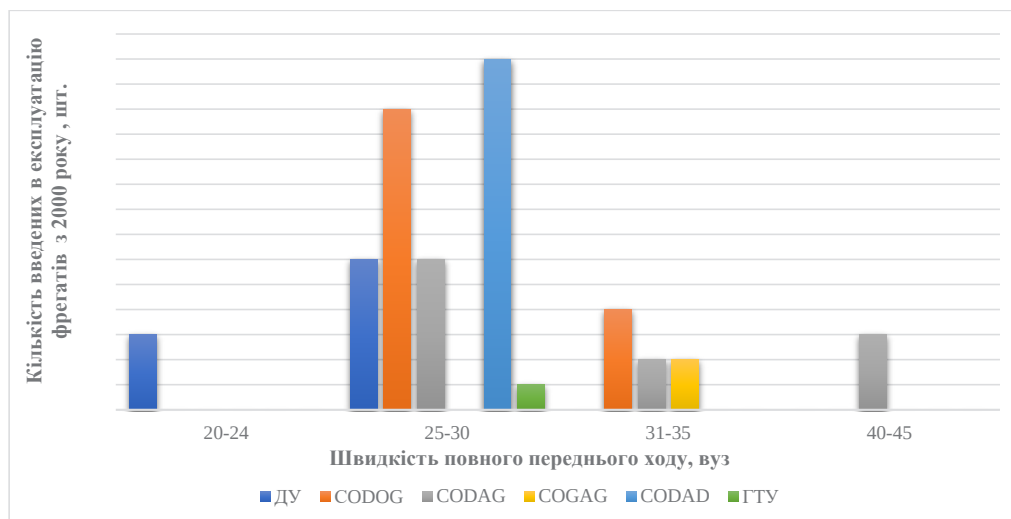


Рис. 1. Застосування різних типів головних енергетичних установок в залежності від повного переднього ходу для фрегатів згідно класифікації енергетичних установок відповідно до [2]: ДУ – дизельна установка; CODOG – combined diesel or gas power plant; CODAG – combined diesel and gas power plant; COGAG – combined gas and gas power plant; CODAD – combined diesel and diesel power plant; ГТУ – газотурбінна установка

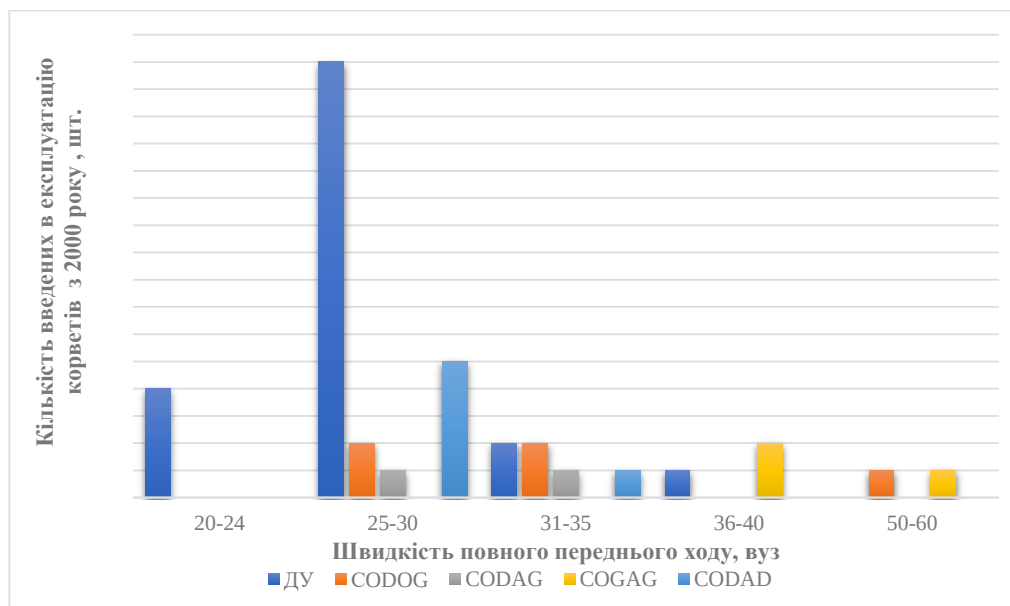


Рис. 2. Застосування різних типів головних енергетичних установок в залежності від повного переднього ходу для корветів. Позначення КЕУ наведені на рисунку 1

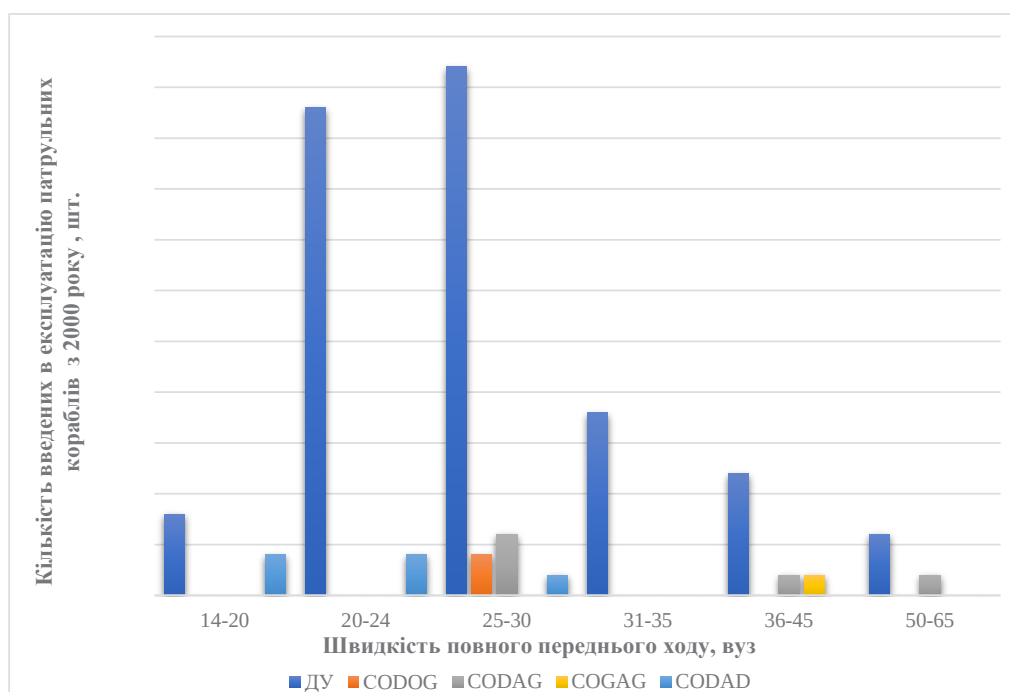


Рис. 3. Застосування різних типів головних енергетичних установок в залежності від повного переднього ходу для патрульних кораблів. Позначення КЕУ наведені на рисунку 1

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Розташування головних і допоміжних елементів КЕУ характеризується тривимірним розташуванням у машинному відділенні, що визначає форму і геометричні розміри трас для переміщення робочих тіл між цими елементами. Визначення раціональної

структури схемних рішень КЕУ залежить від сукупності критеріїв, що об'єднують тип установки, потужність головних двигунів, масогабаритні характеристики, розташування, забезпечення роботи на часткових режимах, автоматизацію, витрату палива та мастила, віброакустичні характеристики, вартість, експлуатаційні витрати, живучість, надійність,

ремонтпридатність з урахуванням тактико-технічних вимог до корабля: швидкості повного та економічного ходу, типу і матеріалу корпусу, водотоннажності, маневреності, виконання завдань протичовнової оборони, роботи гідроакустичної системи, чисельності екіпажу, дальності плавання, заданої спектрограми ходів, малопомітності, живучості корабля, екологічності, стійкості до зовнішнього середовища (кліматика, хитація і т.п.), стійкості до зовнішніх впливів (вибуху) і обґрунтовується шляхом аналізу структури елементів в складі енергетичних установок.

Таким чином визначення структури схемних рішень дизельних, газотурбінних та комбінованих корабельних енергетичних установок є актуальним науково-технічним завданням.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є визначення раціональної структури схемних рішень корабельних енергетичних установок в машинному відділенні корабля на умовах технічних обмежень.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метод дослідження структури складних технічних систем базується на теорії систем та системному аналізі з використанням математичного апарату теорії графів.

Об'єкт дослідження – структура КЕУ як система її елементів головних і допоміжних і зв'язків між ними.

Предмет дослідження – характеристики топологічних властивостей елементів енергетичної установки, їх зв'язків та їх показників при розташуванні в машинних відділеннях корабля.

Завдання дослідження. Досягнення поставленої мети досягається шляхом вирішення наступних завдань:

1. Проаналізувати існуючі схеми КЕУ різних класів надводних кораблів для визначення топологічних властивостей елементів енергетичної установки та їх зв'язків.

2. Визначити показники структури при заданих технічних обмеженнях.

3. Синтезувати структури з урахуванням елементів енергетичної установки на апріорних умовах живучості, енергетичної ефективності і компактності.

4. Оцінити можливість технічної реалізації елементів корабельної енергетичної установки.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Аналіз існуючих схем КЕУ різних класів надводних кораблів для визначення топологічних властивостей елементів енергетичної установки та їх зв'язків. Для визначення раціональної структури схемних рішень енергетичних установок надводних кораблів розглянуто наступні варіанти компоновки: прості схеми – дизельні енергетичні установки та комбіновані енергетичні установки (CODOG, CODAG, COGOG, COGAG), які представлено на рисунку 4 [3].

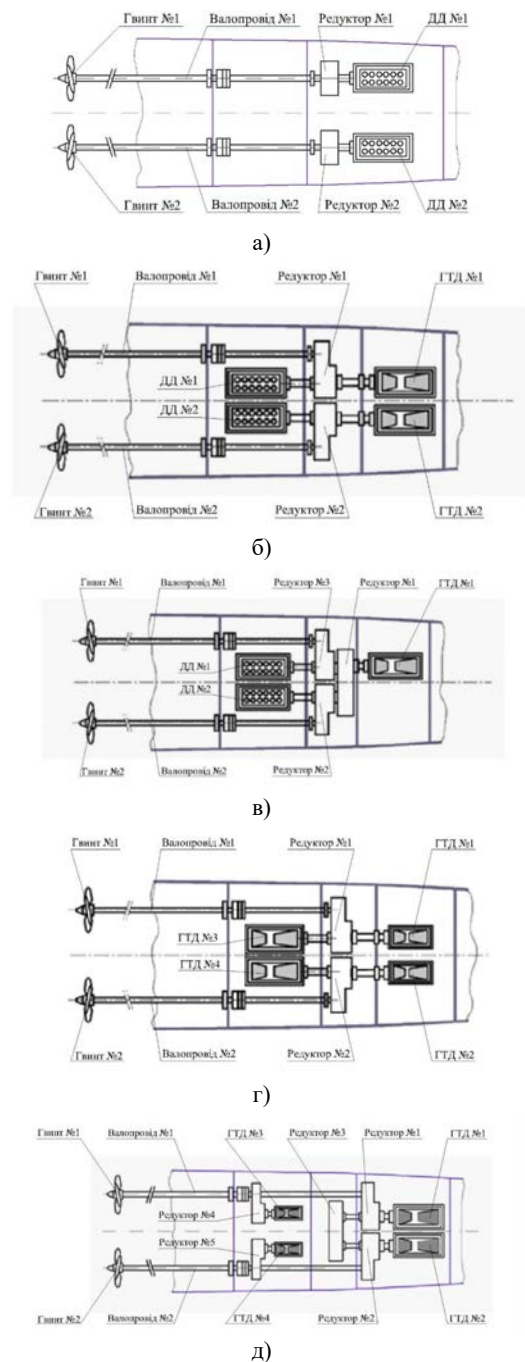


Рис. 4. Схеми КЕУ: ДД – дизельний двигун, ГТД – газотурбінний двигун
а) ДУ (2 маршових ДД, для ракетних та патрульних катерів); б) CODOG (2 маршових ДД, 2 форсажних ГТД, для фрегатів, корветів, ракетних та патрульних катерів); в) CODAG (2 маршових ДД, 1 форсажний ГТД, для фрегатів, корветів, ракетних та патрульних катерів); г) COGOG (2 маршових ГТД, 2 форсажних ГТД, для фрегатів); д) COGAG (2 маршових та 2 форсажних ГТД, для фрегатів, корветів, ракетних та патрульних катерів)

Аналіз структур компоновання головних енергетичних установок дозволив виявити їх такі визначальні ознаки: кількість і тип двигунів та рушіїв,

симетричність або несиметричність розташування, пряме, зворотне або змішане виконання, реверсивність або неревверсивність, кількість та тип редукторів (одношвидкісні, багатошвидкісні, реверсивні, неревверсивні).

Визначення показників структури при заданих технічних обмеженнях. Структура схемного рішення представлялася відповідним орієнтованим графом (рис. 5), що дозволило формалізувати дослідження інваріантних у часі властивостей загальної системи та використати математичний апарат теорії графів [4].

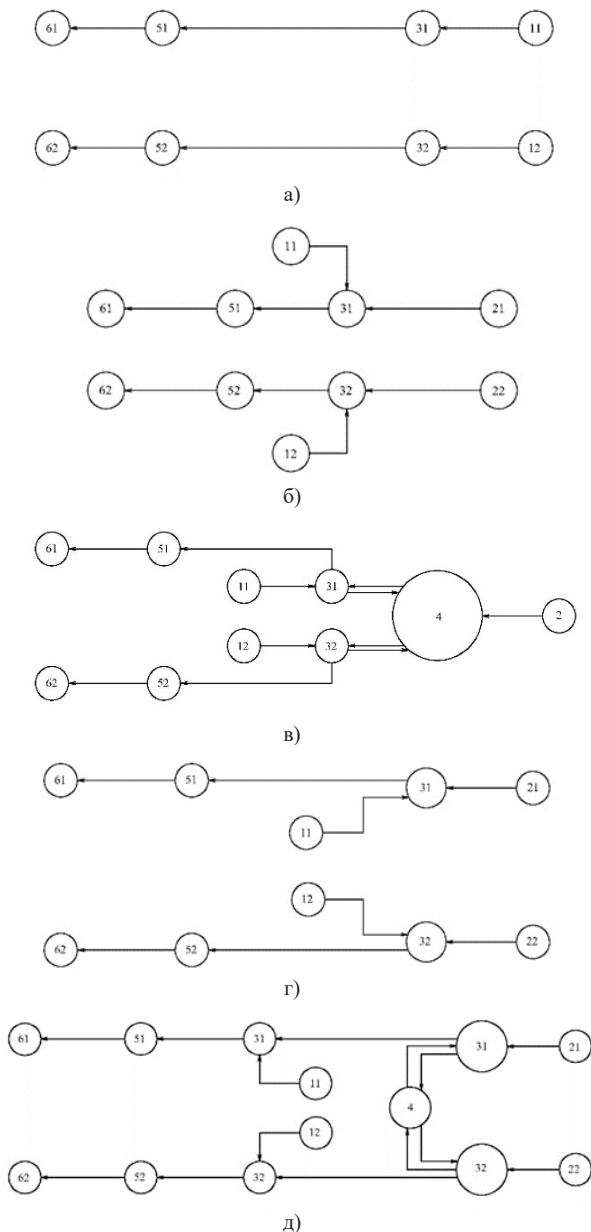


Рис. 5. Схеми КЕУ у вигляді орієнтованих графів відповідно рисунку 4: перша цифра визначає номер елемента КЕУ: 1 – ДД; 2 – ГТД; 3 – редуктор; 4 – підсумовуючий редуктор; 5 – валопровід; 6 – гвинт; друга цифра визначає борт: 1 – лівий, 2 – правий

Для визначення раціональної структури КЕУ згідно з отриманими графами визначаються матриці суміжності для топологічних властивостей елементів енергетичної установки та їх зв'язків за принципом передачі і розподілу потужності. У результаті визначено початкові (двигуни) та кінцеві (рушії) елементи, що відносяться до висячих і тупикових вершин графа, показники діаметру структури, зв'язковості елементів, її ступеня централізації та складності.

Діаметр структури характеризує максимальне число зв'язків, що розподіляють початкові та кінцеві елементи. За його значенням можна оцінювати технічні обмеження системи, зокрема її надійність, інерційність, тривалість запізнення та інше.

Під зв'язковістю елементів розуміється їх найменше число видалення яких робить неможливим передачу потужності, а енергетичну установку недієздатною. Для оцінки зв'язковості використано показник, що характеризує відносну кількість різниці зв'язків в наявній структурі і мінімальною кількістю зв'язків працездатної структури. Показник зв'язковості інтерпретується зазвичай як міра надмірності структури за зв'язками.

Індекс центральності використовується для характеристики нерівномірності завантаження елементів структури.

Поняття складності структури КЕУ визначається, як процес переносу її потужності від головних двигунів до рушіїв для забезпечення руху корабля. Чим більше варіантів цього переносу потужності тим складніша структура енергетичної установки. Кількісний показник складності пропорційний кількості складових шляхів між початковим і кінцевим елементами структури КЕУ.

Алгоритм визначення показників наступний [4]:

1. Пронумеровуються усі елементи графу, будується матриця суміжності, де показується зв'язки між усіма елементами, визначаються тупикові та висячі вершини;

2. Визначається довжина мінімального шляху d_{ij} між висячою вершиною i та тупиковою вершиною j , яка дорівнює числу ребер, що складають даний шлях. Якщо I та J є множинами висячих та тупикових вершин графа діаметр структури $d = \max_{i,j} d_{ij}$;

3. Показник зв'язковості визначається за формулою: $\alpha = \frac{R}{n-1} - 1$, де n – кількість вершин графа, R – показник, який згідно матриці суміжності для орієнтованого графа визначається як сума одиничних елементів матриці;

4. Індекс центральності для орієнтованого графа представляється у вигляді

$$\gamma = \frac{1}{(n-1) \cdot (V(k)-1)} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{i \neq k} (V(k) - V(i)),$$

де $V(i) = v_i + v^i$ – сумарне число входних та вихідних ребер i -ої вершини, а $V(k) = \sum_i V(i)$.

5. Показник складності для орієнтованого графа представляється у вигляді

$$\rho = \frac{1}{\rho_d} \cdot \left(m_1 \cdot m_2 \cdot \sum_{i=1}^{m_1} \sum_{j=1}^{m_2} \rho_{ij} \right),$$

де m_1 та m_2 – число висячих та тупикових вершин у структурі графа, ρ_{ij} – кількість складових шляхів, що ведуть від i -ої висячої вершини до j -ої тупикової, ρ_d – показник одиниці виміру для одновальної ДУ.

Приклад реалізації алгоритму визначення вищезазначених показників представлено для схеми COGAG, а результати для розглянутих схем KEY в таблиці 1.

1. Згідно з графом схеми COGAG матриця суміжності

$$V_{COGAG} = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccccccccccccc} 21 & 22 & 31 & 32 & 4 & 31 & 32 & 11 & 12 & 51 & 52 & 61 & 62 \end{array} \\ \begin{array}{cccccccccccccccc} 21 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 22 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 31 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 32 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 31 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 32 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 11 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 51 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 52 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 61 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 62 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{array} \end{array} \cdot \begin{array}{c} 1 \\ 1 \\ 3 \\ 3 \\ 2 \\ 3 \\ 3 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \\ 2 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{array}.$$

2. Довжина мінімального шляху між вершинами: $d_{21,61} = d_{22,62} = 4$, $d_{11,61} = d_{12,62} = 3$, $d_{21,62} = d_{22,61} = 6$.
Діаметр структури $d = \max_{i,j} d_{ij} = d_{21,62} = 6$.

3. Показник зв'язковості

$$\alpha = \frac{1}{13-1} (1+1+3+3+2+3+3+1+1+2+2+1+1) - 1 = 1.$$

4. Сумарне число вхідних та вихідних ребер для кожної вершини:

$$V(21) = V(22) = V(11) = V(12) = V(61) = V(62) = 1;$$

$$V(51) = V(52) = 2;$$

$$V(31) = V(32) = 3;$$

$$V(31) = V(32) = V(4) = 4.$$

Індекс центральності

$$\gamma = \frac{(3 \cdot 6 + 2 \cdot 2 + 1 \cdot 2)}{12 \cdot 3} = \frac{24}{36} = 0,667.$$

5. Згідно графу схеми COGAG висячі вершини це 11, 12, 21, 22, а тупикові – 61, 62. З вершини 11 до 61 можна потрапити шляхом 11-31-51-61, з 21 до 61 шляхом 21-31-31-51-61, а з 21 до 62 шляхом 21-31-4-32-32-52-62. Так як показник одиниці виміру для одновальної ДУ дорівнює 3, а показник її складності – 1, то загальна складність схеми COGAG дорівнює

$$\rho = \frac{1}{3} \cdot 4 \cdot 2 \cdot (3 + 4 + 6) = 34,7.$$

Синтез структури з урахуванням елементів енергетичної установки на апіорних умовах живучості, енергетичної ефективності і компактності за

кількістю машинних відділень. Результати аналізу складу головних енергетичних установок, що визначається кількістю машинних відділень, дозволяють виявити наступну тенденцію: одномашинний та двомашинний склади має дизельні установки, комбіновані установки, що працюють за схемою CODOD та CODAD, а установки, що працюють за іншими схемами, у тому числі CODOG та CODAG, як правило, двомашинний та тримашинний склади. При цьому практично реалізувати тримашинний склад для корветів більш складно, ніж для фрегатів.

Наявність декількох машинних відділень приводить до того, що зв'язок між елементами KEY інцидентний не двом, як в простому графі, а більший кількості (рисунок 6 [3]).

Тобто структури KEY при багатомашинних варіантах можуть визначатися гіперграфами $H=(A,B)$, де A – множина елементів установки, а B – множина зв'язків в якому кожний зв'язок задається переліченням елементів йому інцидентних. Використовуючи позначення 1, 2, 5 і 6 щодо рисунку 5 та додавши 7 – електрогенератор та 8 – електромотор, для схеми KEY CODELAG $A=\{1, 2, 5, 6, 7, 8\}$, $B=\{B_1, B_2\}$, $B_1=\{1, 2, 7, 8\}$, $B_2=\{8, 5, 6\}$.

Матриця інцидентій гіперграфа для схеми KEY CODELAG задається наступним чином

$$W = \begin{array}{c} B_1 \\ B_2 \end{array} \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ \hline 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ \hline \end{array}.$$

Алгоритм дослідження структури багатомашинних відділень пропонується наступним. Визначаються рівні ієрархії структури елементів за заданим принципом, наприклад, живучістю і будується багаторівневий ієрархічний граф. Ієрархічний граф перетворюється в еквівалентний граф в якому відсутні суміжні елементи, що розташовані на одному рівні ієрархії. Отриманий граф трансформується в сукупність гіперграфів і визначаються їх матриці інцидентій. Отримані матриці інцидентій використовуються при розрахунку показників топологічних властивостей багатомашинних відділень KEY.

Загальна складність схеми CODELAG дорівнює 85,3.

Оцінка можливості технічної реалізації елементів корабельної енергетичної установки. Оскільки KEY є складною технічною системою її технічна реалізація повинна відповідати умовам тактико-технічного завдання корабля. Ці умови визначають тип енергетичної установки, потужність її головних двигунів, масогабаритні характеристики, розміщення по машинним відділенням на кораблі, забезпеченість роботи на часткових режимах, автоматизацію, витрату палив та мастил, віброакустичні характеристики, вартість, експлуатаційні витрати, живучість, надійність та ремонтпридатність. Таким чином оптимізація KEY зводиться до завдання розкриття невизначеностей цілей. Рішення завдання може бути виконано

Таблиця 1. Показники топологічних властивостей KEY

Схема KEY	Назва показника				
	Висячі та тупикові вершини	Діаметр структури d	Зв'язність, α	Індекс центральності, γ	Складність, ρ
ДУ	11, 12 61, 62	3	0,714	0,571	2
CODOG	11, 12, 21, 22 61, 62	3	0,778	0,778	8
CODAG	11, 12, 2 61, 62	5	1,000	0,778	30
COGOG	11, 12, 21, 22 61, 62	3	0,778	0,778	8
COGAG	11, 12, 21, 22 61, 62	6	1,000	0,667	34,7

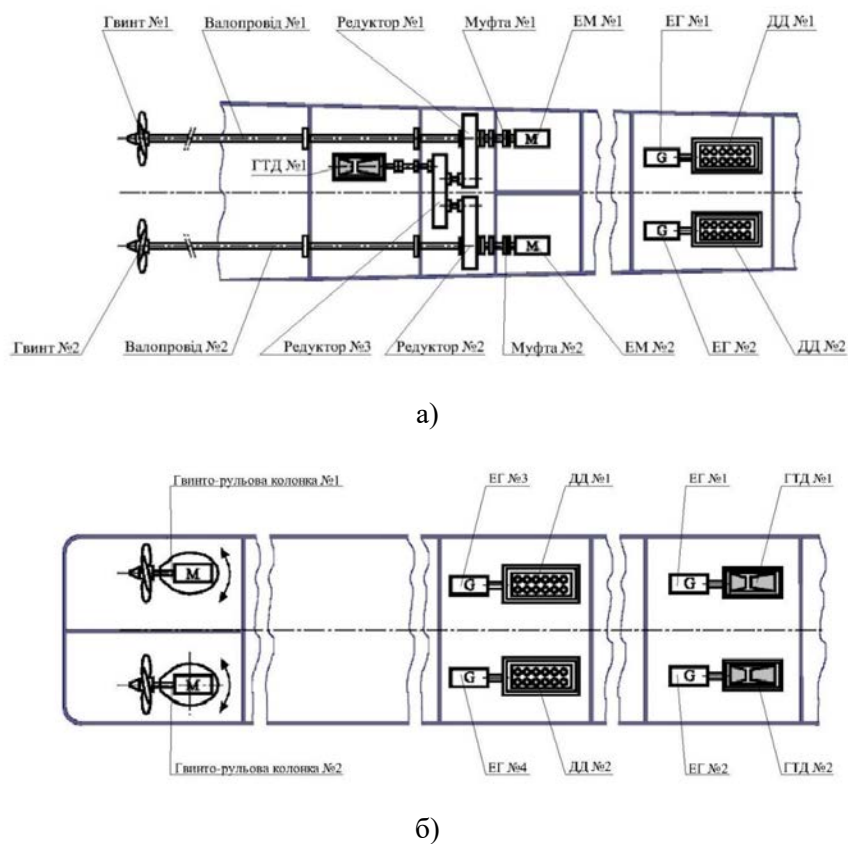


Рис. 6. Схеми KEY: ЕГ – електрогенератор, ЕМ – електромотор: а) CODELAG, б) Azimuthing Propulsion (AZP)

методом згортки при мінімізації сукупності показників: потужність головних двигунів, при заданих параметрах швидкості повного переднього ходу і характеристиках корпусу; маси і об'єму; питомої довжини машинних відділень; керованої швидкості; вахт на постах; особистого складу, запасу палива і мастила для забезпечення заданої дальності плавання; питомих витрат палива і мастила на різних режимах експлуатації, віброакустичних характеристик; вартості; експлуатаційних витрат на обслуговування; локалізованих машинних відділень; середньостатистичного

напрацювання на відмову; середнього часу на відновлення працездатності [5].

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Для надводних кораблів класів фрегат, корвет та патрульний корабель зі стандартною водотоннажністю від 100 до 6650 т, спущених на воду з 2000 року зі швидкістю повного переднього ходу до 25 вузлів, включно, основним типом установки є дизельна. Для фрегатів та корветів загальний відсоток дизельних або комбінованих дизельних установок CODAD складає

відповідно 32% та 70%, а для патрульних кораблів кількість дизельних і комбінованих дизельних установок CODAD становить близько 80% від загальної кількості. Кораблі зі швидкістю повного переднього ходу від 25 до 30 вузлів можуть мати як дизельну так і комбіновану енергетичні установки (CODOG, CODAG та CODAD). Сумарна потужність більшості дизелів у комбінованих установках становить від 20 до 45% від потужності газотурбінних двигунів.

Для кораблів швидкість повного переднього ходу, яких становить від 30 до 44 вузлів – найбільш поширеними типами установок є газотурбінні і комбіновані установки, що працюють за схемами CODOG, CODAG та COGAG. При цьому сумарна потужність більшості дизелів у комбінованих установках становить від 20 до 27% від потужності газотурбінних двигунів.

Для кораблів швидкість повного переднього ходу, яких становить понад 45 вузлів – найбільш поширеними типами установок є комбіновані установки, що працюють за схемами CODOG, CODAG та COGAG. Сумарна потужність більшості дизелів у комбінованих установках становить від 20 до 25% від потужності газотурбінних двигунів.

Слід також відзначити зростання дизель-електричних і електричних установок різних схем, що намітилося за останні 20 років, в діапазоні швидкостей від 20 до 35 вузлів.

На підставі топологічних показників розглянутих систем KEY на апріорних умовах енергетичної ефективності та компактності можливі їх слідувачі загальні характеристики. Дизельна установка – компактна, не складна, але має задовільні показники живучості та нерівномірності завантаження; CODOG – відносно компактна, більш складна, живуча і рівномірно завантажена; CODAG – має підвищені габарити, складна, але живуча і рівномірно завантажена; COGOG – компактна, більш складна, живуча і рівномірно завантажена;

COGAG – має підвищені габарити, більш складна, живуча і менш рівномірно завантажена.

Підвищення кількості локалізованих машинних відділень при сталій енергетичній ефективності KEY підвищує її живучість за рахунок збільшення загальної питомої довжини відділень і ускладнення.

Технічна реалізація елементів корабельної енергетичної установки в її складі залежить від вихідних даних і пов'язана з пошуком узагальненої цілі на базі сукупності заданих технічних характеристик та їх кількісних оцінок.

ВИСНОВКИ

1. Визначено використання окремих варіантів структурних схем енергетичних установок для надводних кораблів зі швидкістю повного переднього ходу від 25 до 60 вузлів, що обґрунтовує використання дизельної установки при швидкостях до 25 вузлів, газотурбінних і комбінованих установок CODOG, CODAG та COGAG при швидкостях від 30 до 44 вузлів, комбінованих установок CODOG, CODAG та COGAG при швидкостях більше 45 вузлів.

2. Структурні схеми енергетичних установок надводних кораблів за показниками діаметру структури, зв'язковості елементів, її ступеня централізації та складності мають наступні топологічні властивості: дизельна установка – компактна, не складна, але має задовільні показники живучості та нерівномірності завантаження ($d=3$; $\alpha=0,714$; $\gamma=0,571$; $\rho=2$); CODOG – відносно компактна, більш складна, живуча і рівномірно завантажена ($d=3$; $\alpha=0,778$; $\gamma=0,778$; $\rho=8$); CODAG – має підвищені габарити, складна, але живуча і рівномірно завантажена ($d=5$; $\alpha=1,000$; $\gamma=0,778$; $\rho=30$); COGOG – компактна, більш складна, живуча і рівномірно завантажена ($d=3$; $\alpha=0,778$; $\gamma=0,778$; $\rho=8$); COGAG – має підвищені габарити, більш складна, живуча і менш рівномірно завантажена ($d=6$; $\alpha=1,000$; $\gamma=0,667$; $\rho=34,7$).

REFERENCES

- [1] Pape, A. (Ed.). (2019). *Jane's Fighting Ships 2019-2020*. Surrey: IHS Global.
- [2] Demirci, M.C. (2021). *Propulsion Systems Used in Modern Naval Vessels*. Retrieved from: <https://navalpost.com/propulsion-systems-navies-gas-diesel-electric/>.
- [3] *Rules for classification: Naval vessels. Propulsion plants*. (2015). Pt3Ch2. Retrieved from <https://www.dnv.com/rules-standards/>.
- [4] Karnaukh, T.O., Stavrovskiy, O.B. *Teoriya hrafiv u zavdannakh* [Graph theory in problems]. Retrieved from: <https://studfile.net/preview/5768773/> [in Ukrainian].
- [5] Zgurovskii, M.Z., Pankratova, N.D. (2007). *Osnovy systemnoho analizu* [Fundamentals of system analysis]. Kyiv: Publishing Group BHV [in Ukrainian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Pape, A. (Ed.). (2019). *Jane's Fighting Ships 2019-2020*. Surrey: IHS Global.
- [2] Demirci, M.C. (2021). *Propulsion Systems Used in Modern Naval Vessels*. Відновлено з URL: <https://navalpost.com/propulsion-systems-navies-gas-diesel-electric/>.
- [3] *Rules for classification: Naval vessels. Propulsion plants*. (2015). Pt3Ch2. Відновлено з URL: <https://www.dnv.com/rules-standards/>.
- [4] Карнаух, Т.О., Ставровський, А.Б. *Теорія графів у задачах*. Відновлено з URL: <https://studfile.net/preview/5768773/>.
- [5] Згуровський, М.З., Панкратова, Н.Д. (2007). *Основи системного аналізу*. Київ: Видавнича група BHV.

© Борисов В. Є., Кузнецов Г. В.

Дата надходження статті до редакції: 01.07.2024

Дата затвердження статті до друку: 12.07.2024