

В.В. Будашко

РОЗРОБКА ТРИРІВНЕВОЇ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ СТРАТЕГІЇ УПРАВЛІННЯ ГІБРИДНОЮ СУДНОВОЮ ЕНЕРГЕТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ КОМБІНОВАНОГО ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСУ

На підставі системної класифікації топологій судових енергетичних установок (СЕУ) комбінованих пропульсивних комплексів (КПК) були систематизовані основні переваги і недоліки СЕУ КПК в залежності від топології системи розподілення енергії. Були отримані характеристики процесів передачі потужності у СЕУ КПК і системах енергопостачання, і їх стратегій контролю з точки зору підвищення ефективності та усунення зазначених недоліків. Удосконалено математичний апарат для проведення досліджень з точки зору розробки методів проектування і управління гібридними СЕУ КПК зі скороченням споживання палива, викидів у довкілля і підвищенні ремонтпридатності, маневреності і рівня комфорту. Розроблений метод дає можливість ітераційної оптимізації параметрів СЕУ КПК, що дозволяє використовувати його як засіб інтелектуального проектування, результатом застосування якого є вдосконалені експлуатаційні характеристики СЕУ КПК. Бібл. 49, табл. 1, рис. 12.

Ключові слова: суднова енергетична установка, комбінований пропульсивний комплекс, система управління енергоспоживанням, стратегія управління.

На основании системной классификации топологий судовых энергетических установок (СЭУ) комбинированных пропульсивных комплексов (КПК) были систематизированы основные преимущества и недостатки СЭУ КПК в зависимости от топологии системы управления распределением энергии. Были получены характеристики процессов передачи мощности в СЭУ КПК и системах энергоснабжения, и их стратегий контроля с точки зрения повышения эффективности и устранения указанных недостатков. Усовершенствован математический аппарат для проведения исследований с точки зрения разработки методов проектирования и управления гибридными СЭУ КПК с сокращением потребления топлива, выбросов в окружающую среду и повышении ремонтпригодности, маневренности и уровня комфорта. Разработанный метод дает возможность итерационной оптимизации параметров СЭУ КПК, что позволяет использовать его как средство интеллектуального проектирования, результатом применения которого является усовершенствованные эксплуатационные характеристики СЭУ КПК. Библ. 49 табл. 1, рис. 12.

Ключевые слова: судовая энергетическая установка, комбинированный пропульсивный комплекс, система управления энергопотреблением, стратегия управления.

Вступ. Мінімізація додаткових витрат зі зміною експлуатаційного режиму суднової енергетичної установки (СЕУ) комбінованого пропульсивного комплексу (КПК) досягається шляхом забезпечення стабільності потужності СЕУ і навантаження середньо-оборотних дизель-генераторів (СОДГ) в умовах збурення довкілля за рахунок оптимального в сенсі мінімуму критерію споживаної потужності при управлінні параметрами СЕУ КПК. З метою підвищення продуктивності СЕУ КПК із різними архітектурними рішеннями структур, застосування тої або іншої інтелектуальної стратегії управління базується до визначенні ефективності настроювання всережимних регуляторів СОДГ і частотних перетворювачів (ЧП), що живлять гребні електродвигуни (ГЕД) підрулюючих пристроїв (ПП) з точки зору дотримання відповідного рівня питомої витрати палива (ПВП) в залежності від навантаження на гребні гвинти і СОДГ (рис. 1).

Не дивлячись на різноманітність структур СЕУ КПК їх можливо групувати за схожими перевагами і недоліками (табл. 1), проаналізувавши яку можна зробити висновок, що основними недоліками сучасних гібридних СЕУ КПК, з точки зору ефективності управління і забезпечення експлуатаційних режимів, є неможливість коригувати оберти СОДГ у відповідності до навантаження на гребні гвинти і необхідність застосування альтернативних джерел енергії (АДЕ).

Постановка задачі. На першому етапі потрібно класифікувати топологію СЕУ КПК за механіч-

ними, електричними або гібридними типами двигунів, і топологією живлення (телові, електрохімічні і гібридні).

Потім, розглядаючи процеси у СЕУ КПК і системах енергопостачання і їх стратегій контролю, підвищити можливості та усунути недоліки для цих систем і їх відповідного контролю. І врешті необхідно розробити математичний апарат для проведення досліджень з точки зору розробки методів проектування і управління гібридними СЕУ КПК зі скороченням споживання палива, викидів у довкілля і підвищенні ремонтпридатності, маневреності і рівня комфорту.

Дослідження проводяться в рамках науково-дослідної держбюджетної роботи «Концепції, технології та напрямки удосконалення судових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів» Національного університету «Одеська морська академія» (державний реєстраційний номер 0114U/000340).

Метою статті є підвищення ефективності гібридних СЕУ КПК методом поєднання критеріїв стратегій управління розподілом енергії.

Методи досліджень. Гібридні СЕУ КПК з АДЕ, які використовують максимальну ефективність прямого механічного приводу і гнучкість поєднання потужності згоряння від теплового двигуна і накопиченої енергії з АДЕ, є найбільш перспективними. На низькій потужності пропульсивного електричного

© В.В. Будашко

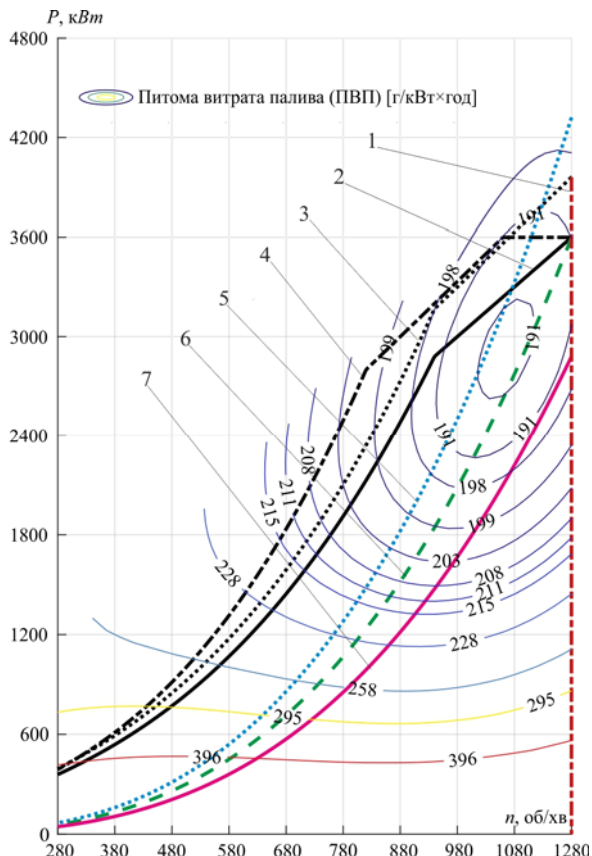


Рис. 1. Залежності питомої витрати палива від навантаження на СОДГ і характеристик гребних гвинтів: 1–4 – характеристики СОДГ; 1 – загороджувальна; 2 – навантажувальна; 3 – навантажувальна з підвищеним рейтингом; 4 – навантажувальна з послідовним турбонаддувом; 5–6 – характеристики гребних гвинтів; 5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

приводу, призначеного для приведення у рух судна, ГЕД забезпечує необхідну потужність, а надлишок потужності теплового двигуна може бути використаний в якості живлення власних потреб від валогенератора. Типова архітектура такої СЕУ КПК показана на рис. 2 [41, 42].

Слід зазначити, що СОДГ, обладнанні системами автоматичного пуску, таких як *PMR (Power Management Relay)* у складі *PMS (Power Management System)*, у період очікувань знаходяться у “гарячому резерві”. Це означає, що як мінімум, здійснюється постійний підігрів двигуна (для єдиних СЕЕС з рідинним охолодженням). Електростанція з автоматичним пуском може прийняти на себе навантаження за декілька секунд з моменту зникнення напруги на головний розподільний щит (ГРЩ), їй не потрібен час на додатковий прогрів двигуна. Крім того, немає необхідності вручну здійснювати перемикання у ГРЩ – всі необхідні комутації виконуються автоматично, а під час роботи СОДГ здійснюється автоматична підтримка частоти вихідної напруги і обертів дизеля. Для особливо складних умов експлуатації, у спеціальних СЕЕС можлива робота СОДГ й у такому режимі, коли двигун працює постійно, але до генератору навантаження не підключене або мінімальне. У такому режимі витрата пального, хоч і не дуже велика, але теж є. Необхідно пам’ятати, що при переключеннях у аварійні режими необхідна гарантована робота акумуляторних батарей. Тому під час нормальної експлуатації СЕЕС необхідно забезпечити й підзарядку акумуляторних батарей, на що теж витрачається пальне. Зрозуміло, що сумарна витрата пального для двох частково завантажених СОДГ істотно вища, ніж у одного СОДГ, працюючого при аналогічному навантаженні.

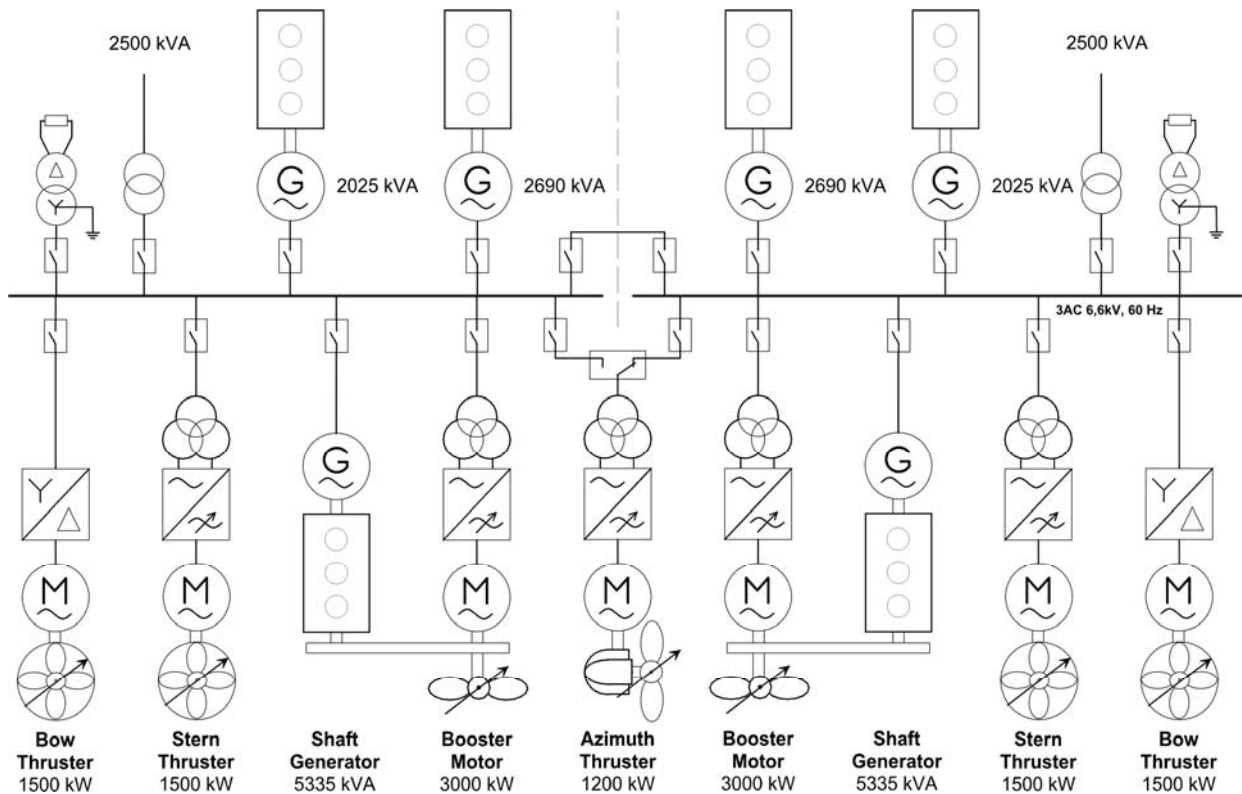


Рис. 2. Однолінійна схема гібридної СЕУ КПК багатопільового судна з допоміжними ПП типу *L-Drive*

Переваги і недоліки двигунів і технологій систем живлення СЕУ КПК

Технологія	Переваги	Недоліки	Джерело
Електромеханічний КПК	Низькі втрати при розрахунковій потужності	Низька ефективність при часткових і пікових навантаженнях	Рис. 1 [1, 2]
	Низькі викиди CO_2 та NO_x при розрахунковій потужності	Високі викиди NO_x при зниженні навантаження	[3, 4]
	Низькі втрати перетворення енергії	Низьке резервування	[5]
		Підвищений рівень шуму	[6]
Дизель-електричний пропульсивний комплекс (ДЕПК)	Перевантажувальна спроможність	Постійність частоти обертання СОДГ	[9, 10]
	Узгодженість навантаження із СОДГ	Втрати при розрахунковій потужності	[11]
	Висока перспективність	Ризик постійної нестабільності потужності навантаження	[12]
	Зниження викидів NO_x при низькій швидкості Потенційно низький рівень шуму		Рис. 2 [13]
Гібридний ДЕПК	Низькі втрати при розрахунковій потужності	Постійність частоти обертання СОДГ	[14]
	Перевантажувальна спроможність		[15, 16]
	Узгодження навантаження і ГЕД на низькій потужності	Складність системи	[17]
	Потенційно низький рівень шуму ГЕД		[18, 19]
Гібридний ДЕПК із альтернативними джерелами енергії (АДЕ)	Незалежність від стану повітря	Лімітована потужність	[20, 21]
	Зниження викидів у повітря	Небезпечність	[22]
	Висока ефективність і низький рівень шуму	Неможливість модернізації	[23]
Гібридна суднова електроенергетична система (СЕЕС)	Незалежність від стану повітря	Лімітована потужність	[24, 25]
	Зниження викидів у повітря і низький рівень шуму	Небезпечність	
ДЕПК з гібридною СЕЕС	Вирівнювання навантаження	Постійність частоти обертання СОДГ	[26, 27]
	Нульовий рівень шуму і шкідливих викидів	Складність системи	[28]
	Зберігання регенованої енергії	Небезпечність обслуговування батарей	[29]
	Ефективність резервного живлення	Вартість батарей	[30]
	Можливість включення імпульсної потужності	Необхідність контролю за станом кожної з батарей	[31]
	Зниження витрати палива і викидів у атмосферу	Можливість виходу з ладу батарей у наслідок перезаряджання	[32, 33]
	Відсутність збільшення NO_x під час збільшення навантаження	Складність моніторингу за станом батарей	Рис. 3 [34, 35]
ДЕПК з гібридною СЕЕС постійного струму із системою накопичення енергії (СНЕ)	Змінна швидкість обертання ГЕД і навантаження	Складність системи	[36]
	Оптимальне навантаження ГЕД	Вартість і втрати у силовій електроніці	[37]
	Зниження рівня шуму і вібрації двигуна	Збільшення NO_x у зв'язку зі змінною потужністю	[38]
	Зниження витрати палива і викидів CO_2	Необхідність впровадження енергозбереження при зменшенні потужності	[39]
	Можливість включення імпульсної потужності	Складність управління	[40]

Зміна технічної складової традиційного підходу до побудови гібридних СЕЕС СЕУ КПК, придатних до застосування для багатьох типів суден, засновано

на принципі видозміни структури СЕЕС для багатьох практичних випадків експлуатаційних режимів, у яких робота основного СОДГ може здійснюватися

при навантаженнях аж до 80 % номінального значення, а динамічний резерв енергії здійснюється від додаткового статичного АДЕ.

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

Пропонується використання у гібридній СЕЕС СЕУ КПК додаткового АДЕ, котрий складається з двошарових електрохімічних конденсаторів (англ. *Electric double-layer capacitor – EDLC*).

Блок-схема класичної стратегії управління гібридною СЕУ КПК на базі представленої на рис. 2 із використанням *EDLC* за критерієм мінімуму споживання електроенергії показано на рис. 3.

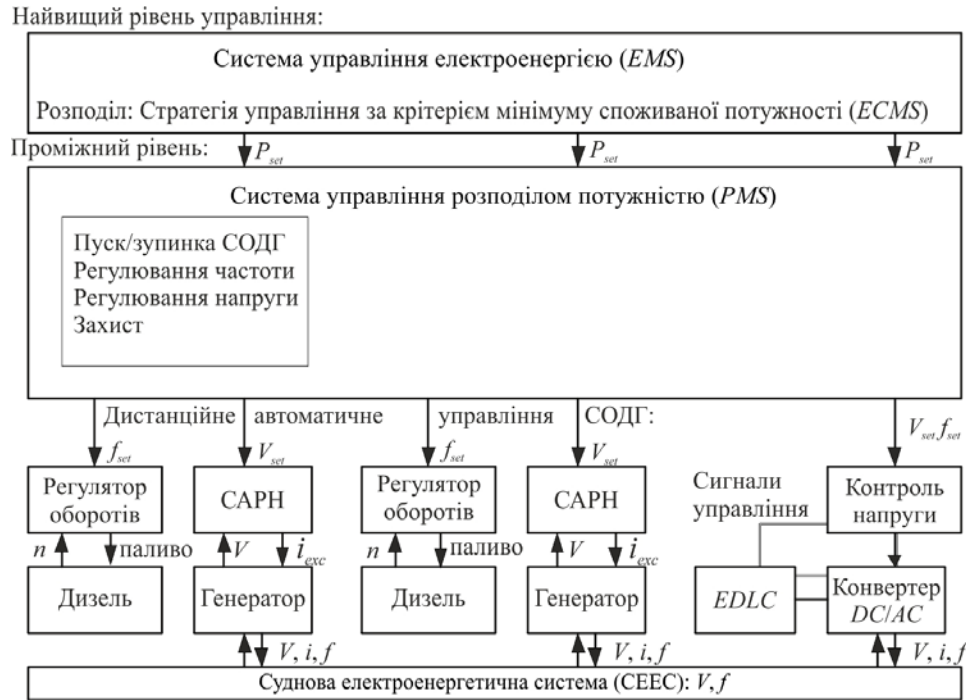


Рис. 3. Блок-схема управління гібридною СЕУ КПК за критерієм мінімуму споживання електроенергії: САРН – система автоматичного регулювання напруги (англ. *Automatic Voltage Regulator – AVR*); X_{set} – уставка; P – потужність; f – частота напруги; V – напруга; n – частота обертання СОДГ; i_{exc} – струм збудження генераторів; I – струм СОДГ

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

Енергія розряду конденсаторних модулів у СЕУ КПК для характеристик збуджуючих сил, параметризація дій яких визначаються рівняннями (1), (2), за умови знаходження усіх підрулюючих пристроїв (ПП) у координатній площині безпосереднього регулювання моменту задається рівнянням (3) за оцінкою інтеграції загальної площі поверхні усіх модулів *EDLC* під гальванічну криву розряду або заряду:

$$\begin{cases} U_S(t) = I_S(t) \cdot Z_{SE} + t_{EM} \cdot \bar{v}_S(t), \\ F_S(t) = I_S(t) \cdot t_{ME} + Z_{SM} \cdot \bar{v}_S(t), \end{cases} \quad (1)$$

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

$$\begin{cases} \bar{U}_S(\mathbf{Z}) = \bar{I}_S(t) \cdot \mathbf{Z}_{SE} + t_{EM} \cdot \bar{v}_S(t), \\ \bar{F}_S(\mathbf{Z}) = \bar{I}_S(t) \cdot t_{ME} + \mathbf{Z}_{SM} \cdot \bar{v}_S(t), \\ (m_{eS} + m_{ncS}) \cdot \frac{d\bar{v}_S(t)}{dt} + \mu_S \bar{v}_S(t) + \mu_R \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon} \bar{v}_S(t) dt = \bar{F}_S(\mathbf{Z}), \end{cases} \quad (2)$$

де $F_S(\mathbf{Z}) = (F_{S1}(\mathbf{Z}^1), F_{S2}(\mathbf{Z}^2), F_{S3}(\mathbf{Z}^3), F_{S4}(\mathbf{Z}^4), \dots, F_{Si}(\mathbf{Z}^m))^{T_{matrix(i)}}$; комплексний імпеданс визначається матрицями активної та індуктивної складових схеми заміщення комплексного навантаження $\mathbf{Z}^m = \mathbf{R}^m + p j \mathbf{L}^m$; $T_{matrix(i)}$ – матриця конфігураційних параметрів підрулюючих пристроїв, де $(i = 0 \dots k)$ – номер відповідної конфігурації відповідно до табл. 1. і вибраної технології СЕУ КПК [43, 44].

$$E_{int/SOC}(t) = I_{EDLC} \int_{U_{EDLC_max}}^{U_{EDLC_min}} U_S(t) dt \quad (3)$$

Формула (3) дозволяє розрахувати потужність зарядного пристрою, необхідного для забезпечення необхідного ступеню заряду *EDLC* для певного експлуатаційного режиму СЕУ КПК під час динамічних навантажень. Звідкіля ємність усіх конденсаторних модулів будемо визначати за формулою:

$$C_{int/EDLC} = \frac{2E_{int/SOC}}{(U_{EDLC_max})^2}. \quad (4)$$

Силові конденсатори *EDLC* гібридних ДЕПК формуються у модулі за рахунок визначення необхідної енергії заряду/розряду у потужності розрахованих зарядних пристроїв. Беручи до уваги велику кількість силових пристроїв, високовольтних і потужних ліній електропостачання між модулями і СЕЕС СЕУ КПК, електромагнітне середовище є складним. Програма функціонування моніторингової системи повинна складатися з двох частин: система керування (СК) і інтегрований блок управління моніторингом ємності. Інтегрований блок управління буде нести відповідальність за відстежування та обробку сигналів від модулів *EDLC*, наприклад: загальну напругу ємності, рівень зарядного і розрядного струмів, інформацію про температуру навколишнього середовища тощо. СК відслідковуватиме алгоритми і зберігання даних у модулях *EDLC*, стан системи моніторингу та управління, силових пристроїв і управління схеми інтерфейсу людина–машина.

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

Для вибору кількості і ємності *EDLC* відповідно до типу СЕУ КПК і особливостей експлуатаційного режиму, на початку згідно із складовими комплексного імпедансу визначаємо параметри матриць активної та індуктивної складових схеми заміщення комплексного навантаження $Z^m = R^m + pjL^m$ (рис. 4). А для значення величини упору для режиму безпосереднього управління моментом розраховуємо коефіцієнти матриці конфігураційних параметрів підрулюючих пристроїв $T_{matrix(i)}$, де $(i = 0 \dots k)$ – номер відповідної конфігурації.

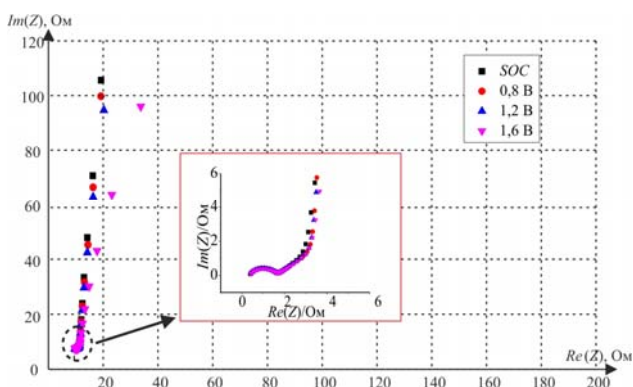


Рис. 4. Параметри комплексного навантаження для визначення ємності *EDLC* для певного експлуатаційного режиму СЕУ КПК: ступеню заряду *EDLC* (англ. *State-of-Charge – SOC*)

Наприклад, для схеми СЕУ КПК (рис. 2) [45, 46] на судні встановлено два головних класичних гвинта лівого та правого бортів у кормовій частині

судна; два кормових тунельних ПП; один азимутальний ПП, що висувається з корпусу судна у носовій частині судна, який може повертатися на будь-який кут α_A (рис. 8) відносно діаметральної площини судна; два носових тунельних ПП ($u_{T1,2}$ – упори головних класичних гвинтів; $u_{T3,4}$ – упори кормових тунельних ПП; u_{T5} – упор допоміжного азимутального ПП, $u_{T6,7}$ – упори носових ПП):

$$T_{matrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & \cos\alpha_{A5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & \sin\alpha_{A5} & 1 & 1 \\ l_{T1} & -l_{T2} & -l_{T3} & -l_{T4} & l_{T5}\sin\alpha_{A5} & l_{T6} & l_{T7} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

де l_{Ti} ($i = 1 \dots 7$) – плече сили, або відстань від місця прикладення упору даного ПП до проекції вектору зусилля τ_T на площину руху судна.

Потім, у відповідності до типу *EDLC* розраховуємо амплітудно–частотну характеристику (АЧХ) (рис. 5) і початкові параметри заряду/розряду у заданих межах *SOC* (рис. 6).

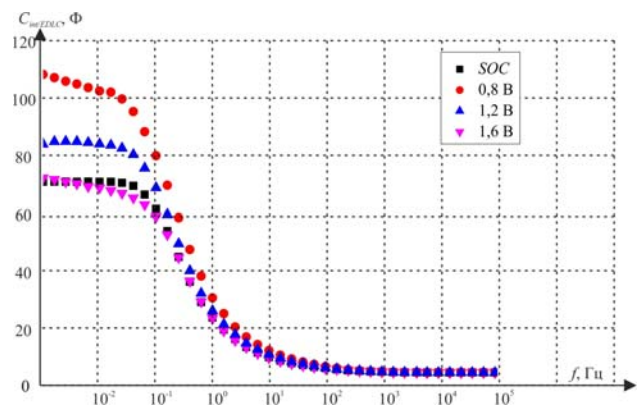


Рис. 5. Амплітудно–частотна характеристика обраних *EDLC*

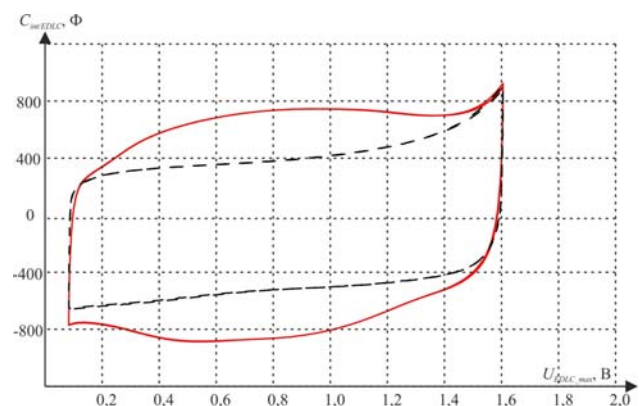


Рис. 6. Параметри заряду/розряду обраних *EDLC* у заданих межах *SOC*

І нарешті, розраховується ефективність запропонованої комплектації СЕУ КПК динамічними джерелами живлення типу *EDLC* для певного експлуатаційного режиму (рис. 7) з урахуванням множини ситуаційних чинників експлуатаційного режиму СЕУ КПК конкретного судна, однолінійну схему якого представлено на (рис. 2). Зазначені чинники враховуються у завданні вирішення локальної задачі ідентифікації експлуатаційного режиму, кожному з яких відповідає свій склад ефективних змінних [47, 48].

Результати досліджень. На підставі розробленого методу було удосконалено стратегію управління

СЕУ КПК за критерієм мінімуму споживання електроенергії шляхом введення критерію отримання максимуму альтернативної енергії та регулювання ступеню заряду батарей СНЕ із використанням АДЕ, щоб звести до мінімуму споживання палива.

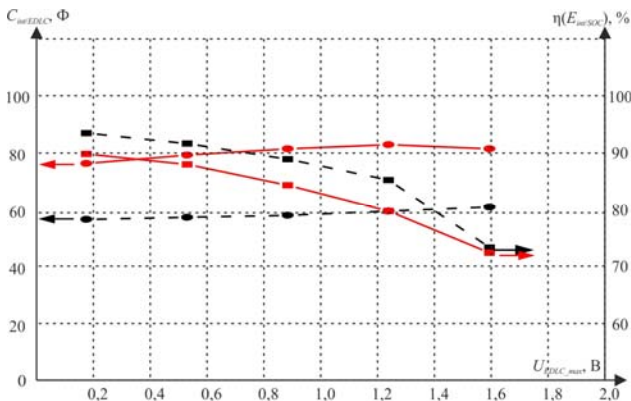


Рис. 7. Порівняльні характеристики ефективності циклів заряду/розряду EDLC запропонованої комплектації СЕУ КПК динамічними джерелами живлення для двох експлуатаційних режимів: повна комплектація – 4 СОДГ (червона суцільна лінія); часткова комплектація – 3 СОДГ (чорна пунктирна лінія)

Дотримання інших критеріїв, таких як шум, вібрація, викиди у довкілля або технічне обслуговування СОДГ (див. табл. 1) в першу чергу залежить від робочої точки СОДГ (рис. 1) і АДЕ (рис. 7) і визначається настроюванням системи керування розподіленням електроенергії (рис. 3).

Таким чином, аналогічні функції витрат в залежності від режиму роботи СОДГ можуть бути отримані за цими критеріями, а також і загальна оптимальна потужність СЕУ КПК може бути визначена з виваженою функцією витрат за кількома критеріями.

Удосконалення стратегії за критерієм отримання максимуму альтернативної енергії та регулювання ступеню заряду батарей СНЕ із використанням АДЕ стає перспективним підходом для підвищення ефективності СЕУ КПК в порівнянні з безліччю функцій для майбутніх розробок [49].

У кінцевому рахунку подальші дослідження повинні рухатися шляхом об'єднання стратегій управління з точки зору комплексного підходу. Блок-схема одного із варіантів удосконаленої стратегії управління інтегрованою системою з гібридним ДЕПК і єдиною СЕЕС на рис. 8.



Рис. 8. Блок-схема стратегії управління СЕУ КПК за критерієм максимуму альтернативної енергії та регулювання ступеню заряду батарей СНЕ: САРН – система автоматичного регулювання напруги; ГРК – гвинт регульованого кроку; ГФК – гвинт фіксованого кроку; X_{set} – уставка; T – упор (момент); F – сила поштовху гвинта; f – частота напруги; V – напруга; n – частота обертання СОДГ; i_{exc} – струм збудження генераторів; i – струм; τ_T – результуюча проекція вектору зусилля на площину руху судна; α_A – кут повороту ПШ відносно діаметральної площини судна

На рис. 9 – 12 приведені отримані залежності моделювання процесів передачі потужності у гібридному ДЕПК. Моделювання проводилося *Mat-*

Lab/Simulink. С початку перехідного процесу ($t = 0$ с), навантаження отримує живлення від основних СОДГ. СНЕ гібридного ДЕПК підключається для заряджання

акумуляторів і відбувається підготовка до можливого знеструмлення судна.

На 40-вій секунді судно знеструмлюється і система управління електроенергією перемикає живлення з СОДГ на АДЕ. При цьому надлишковий запит потужності забезпечується від ланки постійного струму, де здійснювалася рекуперация енергії від споживачів, що працювали у генераторному режимі, тому що потужність *EDLC* зростає повільно.

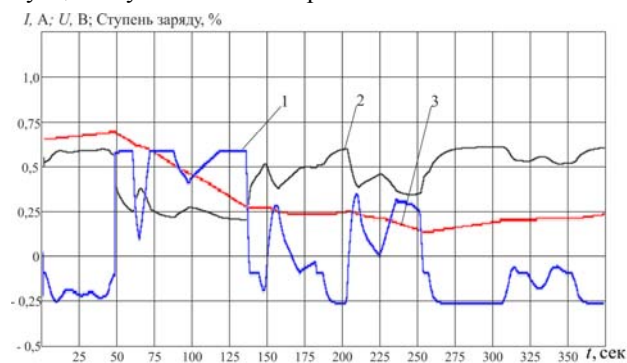


Рис. 9. Енергетичні характеристики СНЕ: 1 – максимальному струму відповідає значення 400 А; 2 – максимальній напрузі відповідає значення 48 В; 3 – максимальному ступеню заряду відповідає значення 100 %

При $t = 45$ с, напруга на ланці постійного струму досягла нижчого рівня (280 В) і СНЕ підключається до її шини і підживлює до 450 В, напруга на якій на 47 секунді зростає до необхідного рівня і СНЕ обмежує потужність поступово до нульового значення. *EDLC* забезпечують необхідну потужність власних потреб і продовжує підживлювати шину ланки постійного струму, до якої на 55 секунді підключаються споживачі, що працюють у аварійному режимі. На 62 секунді вмикається СНЕ, яка підтримує напругу на шині постійного струму до 450 В і допомагає *EDLC* забезпечувати недостачу додаткової потужності навантаження.

На 80 секунді потужність *EDLC* досягає максимального значення, що обмежується уставкою 10 кВт максимальною потужністю конвертера напруги *DC/AC*. Тому необхідна потужність навантаження власних потреб забезпечується СНЕ, максимальна потужність якої досягається при $t = 120$ с (20 кВт) і навантаження забезпечується живленням через шину ланки постійного струму.

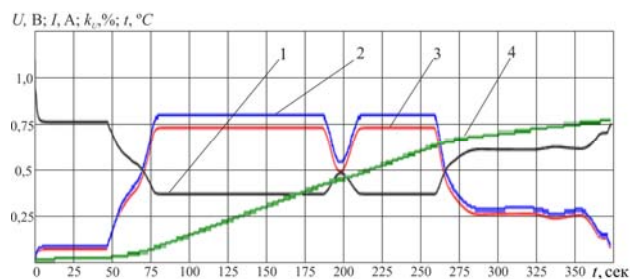


Рис. 10. Енергетичні характеристики *EDLC*: 1 – максимальній напрузі відповідає значення 180 В; 2 – максимальному струму відповідає значення 270 А; 3 – максимальному значенню відношення напруги на *EDLC* до напруги холостого ходу відповідає значення 1; 4 – максимальній температурі *EDLC* відповідає значення 50 °С

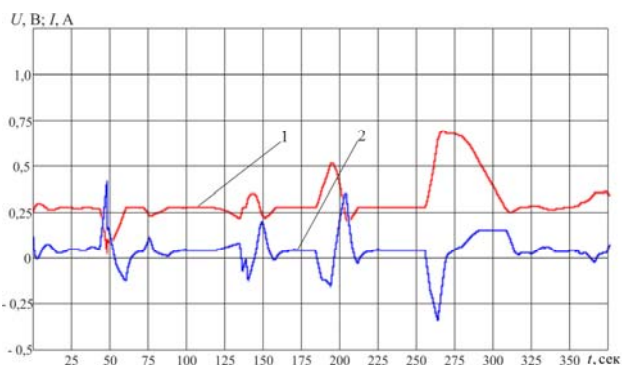


Рис. 11. Залежності напруги і струму на ланці постійного струму: 1 – максимальній напрузі відповідає значення 450 В; 2 – максимальному струму відповідає значення 1150 А

На 130 секунді запит потужності навантаження знижується нижче потужності, на яку розраховані *EDLC*. У зв'язку з тим, що *EDLC* властиві низькі динамічні характеристики, під час перехідних процесів додаткове живлення споживачів з них перемикається до ланки постійного струму.

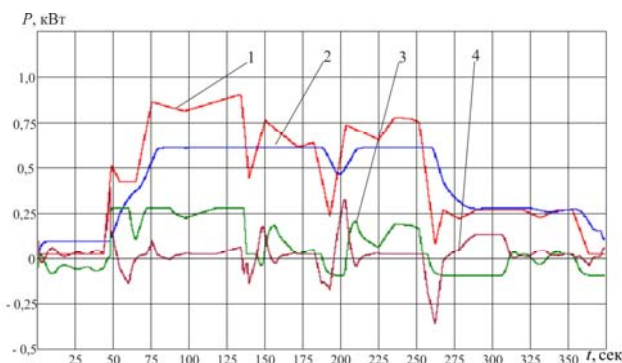


Рис. 12. Енергетичні характеристики гібридного ДЕПК: 1 – максимальній потужності навантаження відповідає значення 1000 кВт; 2 – максимальній потужності на СГЕ відповідає значення 10 кВт; 3 – максимальній потужності на СНЕ відповідає значення 20 кВт; 4 – максимальній потужності на *DC-Link* відповідає значення 300 кВт

Результати досліджень процесів передачі потужності у гібридній СЕУ КПК дають підстави вважати, що вирішення проблеми підвищення ефективності останніх можливо шляхом поєднання класичної стратегії управління розподілом потужності зі стратегією контролю ступеню заряду альтернативних джерел живлення. Сукупність запропонованих стратегій дозволяє проектувати гнучкі багатofункціональні електроенергетичні системи, які інтегруються у гібридні СЕУ КПК в якості невід'ємної складової.

Враховуючи те, що ступень регулювання заряду *EDLC* несуттєвий по відношенню до споживаної реактивної потужності, а живлення конверторів напругою із низьким коефіцієнтом гармонік створює проблему рекуперации електроенергії, можна констатувати, що компенсація реактивної потужності в основному відбувається за рахунок переведення СОДГ в режим компенсаторів відповідним налаштуванням ПД-регуляторів.

Висновки. У статті вирішено науково-прикладну проблему удосконалення СЕУ КПК за рахунок розро-

бки тривірневої багатокритеріальної інтегрованої стратегії управління розподілом енергії.

Запропонований метод задовольняє сучасні вимоги до енергозбереження, рівням вібрацій, шуму і деградаційних ефектів, що пред'являються до СЕУ КПК, на всіх ділянках енергетичного процесу передачі потужності від джерел енергії до гребних гвинтів. Це дозволяє проводити параметризацію пропульсивних і енергетичних характеристик СЕУ КПК в залежності від зміни експлуатаційних режимів, гідродинамічних характеристик і умов довкілля.

Важливим є можливість ітераційної оптимізації параметрів СЕУ КПК, що дозволяє використовувати розроблений метод як засіб інтелектуального проектування, результатом застосування якого є вдосконалені експлуатаційні характеристики СЕУ КПК.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Geertsma R.D., Negenborn R.R., Visser K., Hopm J.J. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments // *Applied Energy*. – 2017. – v.194. – pp. 30-54. doi: [10.1016/j.apenergy.2017.02.060](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.060).
2. Kim D.H., Paik J.K. Ultimate limit state-based multi-objective optimum design technology for hull structural scantlings of merchant cargo ships // *Ocean Engineering*. – 2017. – v.129. – pp. 318-334. doi: [10.1016/j.oceaneng.2016.11.033](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.11.033).
3. Gonca G., Sahin B., Parlak A., Ust Y., Ayhan V., Cesur İ., Boru B. Theoretical and experimental investigation of the Miller cycle diesel engine in terms of performance and emission parameters // *Applied Energy*. – 2015. – v.138. – pp. 11-20. doi: [10.1016/j.apenergy.2014.10.043](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.043).
4. Ko J., Jin D., Jang W., Myung C.-L., Kwon S., Park S. Comparative investigation of NOx emission characteristics from a Euro 6-compliant diesel passenger car over the NEDC and WLTC at various ambient temperatures // *Applied Energy*. – 2017. – v.187. – pp. 652-662. doi: [10.1016/j.apenergy.2016.11.105](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.105).
5. Baldi F., Johnson H., Gabriellii C., Andersson K. Energy Analysis of Ship Energy Systems – The Case of a Chemical Tanker // *Energy Procedia*. – 2014. – v.61. – pp. 1732-1735. doi: [10.1016/j.egypro.2014.12.200](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.200).
6. Vrijdag A., Stapersma D., van Terwisga T. Control of propeller cavitation in operational conditions // *Journal of Marine Engineering & Technology*. – 2010. – v.9. – pp. 15-26. doi: [10.1080/20464177.2010.11020228](https://doi.org/10.1080/20464177.2010.11020228).
7. Natale F.D., Carotenuto C. Particulate matter in marine diesel engines exhausts: Emissions and control strategies // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. – 2015. – v.40. – pp. 166-191. doi: [10.1016/j.trd.2015.08.011](https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.08.011).
8. Zhao F., Yang W., Tan W.W., Yu W., Yang J., Chou S.K. Power management of vessel propulsion system for thrust efficiency and emissions mitigation // *Applied Energy*. – 2016. – v.161. – pp. 124-132. doi: [10.1016/j.apenergy.2015.10.022](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.022).
9. Bassam A.M., Phillips A.B., Turnock S.R., Wilson P.A. An improved energy management strategy for a hybrid fuel cell/battery passenger vessel // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2016. – v.41. – iss.47. – pp. 22453-22464. doi: [10.1016/j.ijhydene.2016.08.049](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.049).
10. Symington W.P., Belle A., Nguyen H.D., Binns J.R. Emerging technologies in marine electric propulsion // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. – 2014. – v.230. – iss.1. – pp. 187-198. doi: [10.1177/1475090214558470](https://doi.org/10.1177/1475090214558470).
11. Kwatny H.G., Bajpai G., Miu K., Yasar M. Fuel Optimal Control With Service Reliability Constraints for Ship Power Systems // *IFAC Proceedings Volumes*. – 2014. – v.47. – iss.3. – pp. 6386-6391. doi: [10.3182/20140824-6-ZA-1003.01773](https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01773).
12. Chuang S.-J., Hong C.-M., Chen C.-H. Improvement of integrated transmission line transfer index for power system voltage stability // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2016. – v.78. – pp. 830-836. doi: [10.1016/j.ijepes.2015.11.111](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.111).
13. Vernengo G., Gaggero T., Rizzuto E. Simulation based design of a fleet of ships under power and capacity variations // *Applied Ocean Research*. – 2016. – v.61. – pp. 1-15. doi: [10.1016/j.apor.2016.09.003](https://doi.org/10.1016/j.apor.2016.09.003).
14. Lützen M., Mikkelsen L.L., Jensen S., Rasmussen H.B. Energy efficiency of working vessels – A framework // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – v.143. – pp. 90-99. doi: [10.1016/j.jclepro.2016.12.146](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.146).
15. McCoy T.J. Trends in ship electric propulsion // *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*. – 2002. – v.1. – pp. 243-346. doi: [10.1109/PESS.2002.1043247](https://doi.org/10.1109/PESS.2002.1043247).
16. Zivi E. Design of robust shipboard power automation systems // *Annual Reviews in Control*. – 2005. – v.29. – iss.2. – pp. 261-272. doi: [10.1016/j.arcontrol.2005.08.004](https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2005.08.004).
17. Castles G., Reed G., Bendre A., Pitsch R. Economic benefits of hybrid drive propulsion for naval ships // *IEEE Electric Ship Technologies Symposium*. – 2009. doi: [10.1109/ESTS.2009.4906560](https://doi.org/10.1109/ESTS.2009.4906560).
18. Baldi F., Ahlgren F., Melino F., Gabriellii C., Andersson K. Optimal load allocation of complex ship power plants // *Energy Conversion and Management*. – 2016. – v.124. – pp. 344-356. doi: [10.1016/j.enconman.2016.07.009](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.009).
19. Sulligoi G., Castellan S., Aizza M., Bosich D., Piva L., Lipardi G. Active front-end for shaft power generation and voltage control in FREMM frigates integrated power system: Modeling and validation // *International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*. – 2012. – pp. 452-457. doi: [10.1109/SPEEDAM.2012.6264570](https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2012.6264570).
20. Bigdeli N. Optimal management of hybrid PV/fuel cell/battery power system: a comparison of optimal hybrid approaches // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – v.42. – pp. 377-393. doi: [10.1016/j.rser.2014.10.032](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.032).
21. Choi C.H., Yu S., Han I.-S., Kho B.-K., Kang D.-G., Lee H.Y., Seo M.-S., Kong J.-W., Kim G., Ahn J.-W., Park S.-K., Jang D.-W., Lee J.H., Kim M. Development and demonstration of PEM fuel-cell-battery hybrid system for propulsion of tourist boat // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2016. – v.41. – iss.5. – pp. 3591-3599. doi: [10.1016/j.ijhydene.2015.12.186](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.186).
22. José J. de-Troya, Álvarez C., Fernández-Garrido C., Carral L. Analysing the possibilities of using fuel cells in ships // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2016. – v.41. – iss.4. – pp. 2853-2866. doi: [10.1016/j.ijhydene.2015.11.145](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.145).
23. Nelson D.B., Nehrir M.H., Wang C. Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems // *Renewable Energy*. – 2006. – v.31. – iss.10. – pp. 1641-1656. doi: [10.1016/j.renene.2005.08.031](https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.08.031).
24. Ramli M., Hiendro A., Twaha S. Economic analysis of PV/diesel hybrid system with flywheel energy storage // *Renewable Energy*. – 2015. – v.78. – pp. 398-405. doi: [10.1016/j.renene.2015.01.026](https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.026).
25. Rezzouk H., Mellit A. Feasibility study and sensitivity analysis of a stand-alone photovoltaic-diesel-battery hybrid energy system in the north of Algeria // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – v.43. – pp. 1134-1150. doi: [10.1016/j.rser.2014.11.103](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.103).
26. Vetter M., Lux S. Rechargeable Batteries with Special Reference to Lithium-Ion Batteries // *Storing Energy*. – 2016. – pp. 205-225. doi: [10.1016/B978-0-12-803440-8.00011-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803440-8.00011-7).
27. Zahedi B., Norum L.E., Ludvigsen K.B. Optimized efficiency of all-electric ships by DC hybrid power systems // *Journal of Marine Engineering and Technology*. – 2010. – v.9. – pp. 15-26. doi: [10.1080/20464177.2010.11020228](https://doi.org/10.1080/20464177.2010.11020228).

- nal of Power Sources. – 2014. – v.255. – pp. 341-354. doi: [10.1016/j.jpowsour.2014.01.031](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.031).
28. Wang L., Lee D.J., Lee W.J., Chen Z. Analysis of a novel autonomous marine hybrid power generation/energy storage system with a high-voltage direct current link // *Journal of Power Sources*. – 2008. – v.185. – iss.2. – pp. 1284-1292. doi: [10.1016/j.jpowsour.2008.08.037](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.08.037).
29. Ovrum E., Bergh T.F. Modelling lithium-ion battery hybrid ship crane operation // *Applied Energy*. – 2015. – v.152. – pp. 162-172. doi: [10.1016/j.apenergy.2015.01.066](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.066).
30. Haseltalab A., Negenborn R.R., Lodewijks G. Multi-Level Predictive Control for Energy Management of Hybrid Ships in the Presence of Uncertainty and Environmental Disturbances // *IFAC-Papers On Line*. – 2016. – v.49. – iss.3. – pp. 90-95. doi: [10.1016/j.ifacol.2016.07.016](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.016).
31. Lashway C.R., Elsayed A.T., Mohammed O.A. Hybrid energy storage management in ship power systems with multiple pulsed loads // *Electric Power Systems Research*. – 2016. – v.141. – pp. 50-62. doi: [10.1016/j.epsr.2016.06.031](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.06.031).
32. Giannoutsos S.V., Manias S.N. Energy management and D/G fuel consumption optimization in the power system of marine vessels through VFD-based process flow control // *IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*. – 2015. – pp. 842-850. doi: [10.1109/EEEIC.2015.7165274](https://doi.org/10.1109/EEEIC.2015.7165274).
33. Zhao F., Yang W., Tan W.W., Yu W., Yang J., Chou S.K. Power management of vessel propulsion system for thrust efficiency and emissions mitigation // *Applied Energy*. – 2016. – v.161. – pp. 124-132. doi: [10.1016/j.apenergy.2015.10.022](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.022).
34. Papalambrou G., Karlis E., Kyrtatos N. Robust Control of Manifold Air Injection in a Marine Diesel Engine // *IFAC-Papers On Line*. – 2015. – v.48. – iss.14. – pp. 438-443. doi: [10.1016/j.ifacol.2015.09.496](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.496).
35. Papalambrou G., Kyrtatos N. Controlled Injection of Compressed Air in Marine Diesel Engine Intake for Improved Load Acceptance // *IFAC Proceedings Volumes*. – 2009. – v.42. – iss.26. – pp. 140-147. doi: [10.3182/20091130-3-FR-4008.00019](https://doi.org/10.3182/20091130-3-FR-4008.00019).
36. Shih N.-C., Weng B.-J., Lee J.-Y., Hsiao Y.-C. Development of a 20kW generic hybrid fuel cell power system for small ships and underwater vehicles // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2014. – v.39. – iss.25. – pp. 13894-13901. doi: [10.1016/j.ijhydene.2014.01.113](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.01.113).
37. Zhang S., Xiong R., Sun F. Model predictive control for power management in a plug-in hybrid electric vehicle with a hybrid energy storage system // *Applied Energy*. – 2017. – v.185. – pp. 1654-1662. doi: [10.1016/j.apenergy.2015.12.035](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.035).
38. Butcher M., Maltby R., Parvin P.S. Compact DC power and propulsion systems – the definitive solution? // *IEEE Electric Ship Technologies Symposium*. – 2009. – pp. 521-528. doi: [10.1109/ESTS.2009.4906561](https://doi.org/10.1109/ESTS.2009.4906561).
39. Hodge C.G., Mattick D.J. The electric warship then, now and later // *Proceedings of the 9th international naval engineering conference*. – 2008. – pp. 556-565.
40. Indragandhi V., Subramaniaswamy V., Logesh R. Resources, configurations, and soft computing techniques for power management and control of PV/wind hybrid system // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – v.69. – pp. 129-143. doi: [10.1016/j.rser.2016.11.209](https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.209).
41. Budashko V., Nikolskyi V., Onishchenko O., Khniunin S. Physical model of degradation effect by interaction azimuthal flow with hull of ship // *Proceeding Book of International Conference on Engine Room Simulators (ICERS12)*. – Istanbul: Istanbul Technical University, Maritime Faculty, 2015. – pp. 49-53. – ISBN 978-605-01-0782-1.
42. Nikolskyi V., Budashko V., Khniunin S. The monitoring system of the Coanda effect for the tension-leg platform's // *Proceeding Book of International Conference on Engine Room Simulators (ICERS12)*. – Istanbul: Istanbul Technical University, Maritime Faculty, 2015. – pp. 45-49. – ISBN 978-605-01-0782-1.
43. Будашко В.В., Онищенко О.А. Удосконалення системи управління підрулюючим пристроєм комбінованого пропульсивного комплексу // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – 2014. – №38(1081). – С. 45-51.
44. Будашко В.В. Имплементарный подход при моделировании энергетических процессов динамически позиционирующего судна // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2015. – №6. – С. 14-19. doi: [10.20998/2074-272X.2015.6.02](https://doi.org/10.20998/2074-272X.2015.6.02).
45. Будашко В.В., Онищенко О.А., Юшков Е.А. Физическое моделирование многофункционального пропульсивного комплекса // *Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса)*. – 2014. – №2. – С. 88-92.
46. Патент України № 100819. Суднова система моніторингу для попередження ефекту Команда / Будашко В.В., Нікольський В.В., Хніунін С.Г. – Заявл. 02.03.2015; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 15.
47. Патент України № 108074. Система імпульсно-фазового управління електроприводом суднової гвинто-кермової установки / Будашко В.В., Юшков С.О. – Заявл. 18.02.2016; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12.
48. Патент України № 107006. Суднова система моніторингу для попередження ефекту Коанда / Хніунін С.Г., Нікольський В.В., Будашко В.В. – Заявл. 28.12.2015; опубл. 10.05.2016, Бюл. № 9.
49. Budashko V., Nikolskyi V., Onishchenko O., Khniunin S. Decision support system's concept for design of combined propulsion complexes // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – v.3. – no.8(81). – pp. 10-21. doi: [10.15587/1729-4061.2016.72543](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72543).

REFERENCES

- Geertsma R.D., Negenborn R.R., Visser K., Hopm J.J. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments. *Applied Energy*, 2017, v.194, pp. 30-54. doi: [10.1016/j.apenergy.2017.02.060](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.060).
- Kim D.H., Paik J.K. Ultimate limit state-based multi-objective optimum design technology for hull structural scantlings of merchant cargo ships. *Ocean Engineering*, 2017, v.129, pp. 318-334. doi: [10.1016/j.oceaneng.2016.11.033](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.11.033).
- Gonca G., Sahin B., Parlak A., Ust Y., Ayhan V., Cesur İ., Boru B. Theoretical and experimental investigation of the Miller cycle diesel engine in terms of performance and emission parameters. *Applied Energy*, 2015, v.138, pp. 11-20. doi: [10.1016/j.apenergy.2014.10.043](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.043).
- Ko J., Jin D., Jang W., Myung C.-L., Kwon S., Park S. Comparative investigation of NOx emission characteristics from a Euro 6-compliant diesel passenger car over the NEDC and WLTC at various ambient temperatures. *Applied Energy*, 2017, v.187, pp. 652-662. doi: [10.1016/j.apenergy.2016.11.105](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.105).
- Baldi F., Johnson H., Gabriellii C., Andersson K. Energy Analysis of Ship Energy Systems – The Case of a Chemical Tanker. *Energy Procedia*, 2014, v.61, pp. 1732-1735. doi: [10.1016/j.egypro.2014.12.200](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.200).
- Vrijdag A., Stapersma D., van Terwisga T. Control of propeller cavitation in operational conditions. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 2010, v.9, pp. 15-26. doi: [10.1080/20464177.2010.11020228](https://doi.org/10.1080/20464177.2010.11020228).
- Natale F.D., Carotenuto C. Particulate matter in marine diesel engines exhausts: Emissions and control strategies. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2015, v.40, pp. 166-191. doi: [10.1016/j.trd.2015.08.011](https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.08.011).
- Zhao F., Yang W., Tan W.W., Yu W., Yang J., Chou S.K. Power management of vessel propulsion system for thrust efficiency and emissions mitigation. *Applied Energy*, 2016, v.161, pp. 124-132. doi: [10.1016/j.apenergy.2015.10.022](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.022).
- Bassam A.M., Phillips A.B., Turnock S.R., Wilson P.A. An improved energy management strategy for a hybrid fuel

- cell/battery passenger vessel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, v.41, iss.47, pp. 22453-22464. doi: **10.1016/j.ijhydene.2016.08.049**.
10. Symington W.P., Belle A., Nguyen H.D., Binns J.R. Emerging technologies in marine electric propulsion. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2014, v.230, iss.1, pp. 187-198. doi: **10.1177/1475090214558470**.
11. Kwatny H.G., Bajpai G., Miu K., Yasar M. Fuel Optimal Control With Service Reliability Constraints for Ship Power Systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 2014, v.47, iss.3, pp. 6386-6391. doi: **10.3182/20140824-6-ZA-1003.01773**.
12. Chuang S.-J., Hong C.-M., Chen C.-H. Improvement of integrated transmission line transfer index for power system voltage stability. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2016, v.78, pp. 830-836. doi: **10.1016/j.ijepes.2015.11.111**.
13. Vernengo G., Gaggero T., Rizzuto E. Simulation based design of a fleet of ships under power and capacity variations. *Applied Ocean Research*, 2016, v.61, pp. 1-15. doi: **10.1016/j.apor.2016.09.003**.
14. Lützen M., Mikkelsen L.L., Jensen S., Rasmussen H.B. Energy efficiency of working vessels – A framework. *Journal of Cleaner Production*, 2017, v.143, pp. 90-99. doi: **10.1016/j.jclepro.2016.12.146**.
15. McCoy T.J. Trends in ship electric propulsion. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 2002, v.1, pp. 243-346. doi: **10.1109/PSS.2002.1043247**.
16. Zivi E. Design of robust shipboard power automation systems. *Annual Reviews in Control*, 2005, v.29, iss.2, pp. 261-272. doi: **10.1016/j.arcontrol.2005.08.004**.
17. Castles G., Reed G., Bendre A., Pitsch R. Economic benefits of hybrid drive propulsion for naval ships. *IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, 2009. doi: **10.1109/ESTS.2009.4906560**.
18. Baldi F., Ahlgren F., Melino F., Gabriellii C., Andersson K. Optimal load allocation of complex ship power plants. *Energy Conversion and Management*, 2016, v.124, pp. 344-356. doi: **10.1016/j.enconman.2016.07.009**.
19. Sulligoi G., Castellan S., Aizza M., Bosich D., Piva L., Lipardi G. Active front-end for shaft power generation and voltage control in FREMM frigates integrated power system: Modeling and validation. *International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 2012, pp. 452-457. doi: **10.1109/SPEEDAM.2012.6264570**.
20. Bigdeli N. Optimal management of hybrid PV/fuel cell/battery power system: a comparison of optimal hybrid approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, v.42, pp. 377-393. doi: **10.1016/j.rser.2014.10.032**.
21. Choi C.H., Yu S., Han I.-S., Kho B.-K., Kang D.-G., Lee H.Y., Seo M.-S., Kong J.-W., Kim G., Ahn J.-W., Park S.-K., Jang D.-W., Lee J.H., Kim M. Development and demonstration of PEM fuel-cell-battery hybrid system for propulsion of tourist boat. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, v.41, iss.5, pp. 3591-3599. doi: **10.1016/j.ijhydene.2015.12.186**.
22. José J. de-Troya, Álvarez C., Fernández-Garrido C., Carral L. Analysing the possibilities of using fuel cells in ships. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, v.41, iss.4, pp. 2853-2866. doi: **10.1016/j.ijhydene.2015.11.145**.
23. Nelson D.B., Nehrir M.H., Wang C. Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems. *Renewable Energy*, 2006, v.31, iss.10, pp. 1641-1656. doi: **10.1016/j.renene.2005.08.031**.
24. Ramli M., Hiendro A., Twaha S. Economic analysis of PV/diesel hybrid system with flywheel energy storage. *Renewable Energy*, 2015, v.78, pp. 398-405. doi: **10.1016/j.renene.2015.01.026**.
25. Rezzouk H., Mellit A. Feasibility study and sensitivity analysis of a stand-alone photovoltaic-diesel-battery hybrid energy system in the north of Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, v.43, pp. 1134-1150. doi: **10.1016/j.rser.2014.11.103**.
26. Vetter M., Lux S. Rechargeable Batteries with Special Reference to Lithium-Ion Batteries. *Storing Energy*, 2016, pp. 205-225. doi: **10.1016/B978-0-12-803440-8.00011-7**.
27. Zahedi B., Norum L.E., Ludvigsen K.B. Optimized efficiency of all-electric ships by DC hybrid power systems. *Journal of Power Sources*, 2014, v.255, pp. 341-354. doi: **10.1016/j.jpowsour.2014.01.031**.
28. Wang L., Lee D.J., Lee W.J., Chen Z. Analysis of a novel autonomous marine hybrid power generation/energy storage system with a high-voltage direct current link. *Journal of Power Sources*, 2008, v.185, iss.2, pp. 1284-1292. doi: **10.1016/j.jpowsour.2008.08.037**.
29. Ovrum E., Bergh T.F. Modelling lithium-ion battery hybrid ship crane operation. *Applied Energy*, 2015, v.152, pp. 162-172. doi: **10.1016/j.apenergy.2015.01.066**.
30. Haseltalab A., Negenborn R.R., Lodewijks G. Multi-Level Predictive Control for Energy Management of Hybrid Ships in the Presence of Uncertainty and Environmental Disturbances. *IFAC-Papers On Line*, 2016, v.49, iss.3, pp. 90-95. doi: **10.1016/j.ifacol.2016.07.016**.
31. Lashway C.R., Elsayed A.T., Mohammed O.A. Hybrid energy storage management in ship power systems with multiple pulsed loads. *Electric Power Systems Research*, 2016, v.141, pp. 50-62. doi: **10.1016/j.epr.2016.06.031**.
32. Giannoutsos S.V., Manias S.N. Energy management and D/G fuel consumption optimization in the power system of marine vessels through VFD-based process flow control. *IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 2015, pp. 842-850. doi: **10.1109/EEEIC.2015.7165274**.
33. Zhao F., Yang W., Tan W.W., Yu W., Yang J., Chou S.K. Power management of vessel propulsion system for thrust efficiency and emissions mitigation. *Applied Energy*, 2016, v.161, pp. 124-132. doi: **10.1016/j.apenergy.2015.10.022**.
34. Papalambrou G., Karlis E., Kyrtatos N. Robust Control of Manifold Air Injection in a Marine Diesel Engine. *IFAC-Papers On Line*, 2015, v.48, iss.14, pp. 438-443. doi: **10.1016/j.ifacol.2015.09.496**.
35. Papalambrou G., Kyrtatos N. Controlled Injection of Compressed Air in Marine Diesel Engine Intake for Improved Load Acceptance. *IFAC Proceedings Volumes*, 2009, v.42, iss.26, pp. 140-147. doi: **10.3182/20091130-3-FR-4008.00019**.
36. Shih N.-C., Weng B.-J., Lee J.-Y., Hsiao Y.-C. Development of a 20kW generic hybrid fuel cell power system for small ships and underwater vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, v.39, iss.25, pp. 13894-13901. doi: **10.1016/j.ijhydene.2014.01.113**.
37. Zhang S., Xiong R., Sun F. Model predictive control for power management in a plug-in hybrid electric vehicle with a hybrid energy storage system. *Applied Energy*, 2017, v.185, pp. 1654-1662. doi: **10.1016/j.apenergy.2015.12.035**.
38. Butcher M., Maltby R., Parvin P.S. Compact DC power and propulsion systems – the definitive solution? *IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, 2009, pp. 521-528. doi: **10.1109/ESTS.2009.4906561**.
39. Hodge C.G., Mattick D.J. The electric warship then, now and later. *Proceedings of the 9th international naval engineering conference*, 2008, pp. 556-565.
40. Indragandhi V., Subramaniaswamy V., Logesh R. Resources, configurations, and soft computing techniques for power management and control of PV/wind hybrid system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, v.69, pp. 129-143. doi: **10.1016/j.rser.2016.11.209**.

41. Budashko V., Nikolskyi V., Onishchenko O., Khniunin S. Physical model of degradation effect by interaction azimuthal flow with hull of ship. *Proceeding Book of International Conference on Engine Room Simulators (ICERS12)*. Istanbul: Istanbul Technical University, Maritime Faculty, 2015. pp. 49-53. ISBN 978-605-01-0782-1.
42. Nikolskyi V., Budashko V., Khniunin S. The monitoring system of the Coanda effect for the tension-leg platform's. *Proceeding Book of International Conference on Engine Room Simulators (ICERS12)*. Istanbul: Istanbul Technical University, Maritime Faculty, 2015. pp. 45-49. ISBN 978-605-01-0782-1.
43. Budashko V.V., Onishchenko O.A. Improving management system combined thruster propulsion systems. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2014, no.38(1081), pp. 45-51. (Ukr).
44. Budashko V.V. Implementation approaches during simulation of energy processes for a dynamically positioned ship. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2015, no.6, pp. 14-19. doi: 10.20998/2074-272X.2015.6.02. (Rus).
45. Budashko V.V., Onishchenko O.A., Yushkov E.A. Physical modeling of multi-propulsion complex. *Collection of scientific works of the Military Academy (Odessa City)*, 2014, no.2, pp. 88-92. (Rus).
46. Budashko V.V., Nikolskyi V.V., Khniunin S.H. *Sudova systema monitorynhu dlya poperedzhennya efektu Koanda* [Ship monitoring system for the prevention of Coanda effect]. Patent UA, no.100819, 2015. (Ukr).
47. Budashko V.V., Yushkov E.A. *Systema impul'sno-fazovoho upravlinnya elektropryvodom sudnovoyi hynto-kermovoyi ustanovky* [The pulse-phase control system of electric ship propeller-steering plant]. Patent UA, no.108074, 2016. (Ukr).
48. Khniunin S.H., Budashko V.V., Nikolskyi V.V. *Sudova systema monitorynhu dlya poperedzhennya efektu Koanda* [Ship system for monitoring for preventing the Coanda effect]. Patent UA, no.107006, 2016. (Ukr).
49. Budashko V., Nikolskyi V., Onishchenko O., Khniunin S. Decision support system's concept for design of combined propulsion complexes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, v.3, no.8(81), pp. 10-21. doi: 10.15587/1729-4061.2016.72543.

Поступила (received) 24.03.2017

Будашко Виталій Витальєвич, к.т.н., доц.,
Одеська національна морська академія,
65029, Одеса, ул. Дидрихсона, 8,
тел/phone +380 48 7332367, e-mail: bvv@te.net.ua

V.V. Budashko

Odessa National Maritime Academy,
8, Didrikhson Str., Odessa, 65029.

Design of the three-level multicriterial strategy of hybrid marine power plant control for a combined propulsion complex.

Purpose. Efficiency of hybrid ships power plants (SPP) combined propulsion complexes (CPC) by various criteria for energy management systems strategies. **Methodology.** Based on the classification system topologies SPP CPC for mechanical, electrical and hybrid types of motors schematic diagrams of management strategies for the criterion of minimum power consumption are defined. Changing the technical component of the traditional approach to building hybrid ships electric power systems (SEPS) SPP CPC the principle of modifying the structure of SEPS is applied with the integration of additional static alternative power source as dynamic reserve, which allowed to meet modern requirements for energy efficiency, levels of vibration, noise and degradation effects produced to SPP CPC, in all areas of the energy for the transfer of power from energy to propellers. Modeling of power transmission of energy to propellers in MatLab/Simulink is conducted, using blocks of optimization library and definition of identity markers. **Results.** Major advantages and disadvantages SPP CPC depending on the topology of energy distribution systems are determined. According to the chosen structure system electricity characteristics were obtained in the process of power transmission SPP CPC and power systems and their control strategies in terms of increased efficiency and eliminate these drawbacks. And finally, mathematical apparatus for research in terms of the development of methods for designing and managing SPP hybrid CPC to reduced fuel consumption, emissions into the environment and improving maintainability, flexibility and comfort level are improved. **Originality.** The methodology for improving SPP CPC implementation by developing methods of identification markers mutually influencing processes in SPP CPC and the development of implementing these methods of settlement and information systems. **Practical value.** The method enables iterative optimization parameters SPP CPC, it can be used as a means of intelligent design, which is the result of the application of improved performance SPP CPC. References 49, table 1, figures 12.

Key words: ship power plants, combined propulsion complexes, energy management system, control strategy.