

Budashko V. V.*D.Sc., Associate Professor,**Dean of Electrical Engineering and Radio-electronics Faculty**National University "Odessa Maritime Academy"***INCREASING THE EFFICIENCY OF HYBRID PROPULSION COMPLEXES FOR MULTIPURPOSE VESSELS BY DIFFERENT CRITERIA OF THE ENERGY MANAGEMENT STRATEGIES****Будашко Віталій Віталійович***д.т.н., доцент, декан Факультету електромеханіки і радіоелектроніки**Національний університет «Одеська морська академія»***ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГІБРИДНИХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИХ СУДЕ ЗА РІЗНИМИ КРИТЕРІЯМИ СТРАТЕГІЙ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ**

Summary: On the basis of classification of topologies of circuit solutions of ship power plants (SPP) of combined propulsion complexes (CPC), for mechanical, electrical and hybrid engine types, block diagrams of control strategies for the criterion of minimum energy consumption have been determined. Changing the technical component of the traditional approach to the construction of power plants for hybrid CPCs applies the principle of modification of the SPP structure with the integration of an additional static power source as a dynamic reserve, which allowed to meet the modern requirements for energy efficiency, vibration levels, noise and degradation effects for the shafts, areas of energy to transfer energy to the propellers. Simulation of energy transfer of energy to screws in MatLab/Simulink is performed by means of optimization units and identification markers. The result is the identification of the main advantages and disadvantages of the SPP CPC's, depending on the topology of the energy distribution systems. In accordance with the chosen structure of the electricity distribution system, the principles of electricity transmission in CPCs and power systems and their management strategies have been obtained in terms of increasing efficiency and eliminating these shortcomings. Finally, the mathematical apparatus for researching energy transfer processes from the point of view of developing methods for designing and managing hybrid CPCs to reduce fuel consumption, environmental emissions, and improve maintainability, flexibility and comfort. The originality of the proposed methodology is to improve the implementation of the SPP CPC by developing methods for identifying degradation effect markers that affect the processes in the SPP CPC, and implementing these methods in the calculation and information systems. The method assumes iterative parameters of the SPP CPC, it can be used as a means of intellectual design, which is the result of the use of improved performance of the SPP CPC.

Анотація: На основі класифікації топологій схемних рішень суднових енергетичних установок (СЕУ) комбінованих пропульсивних комплексів (КПК), для механічних, електричних та гібридних типів двигунів визначено блок-схеми стратегій управління для критерію мінімального споживання енергії. Зміна технічної складової традиційного підходу до побудови систем електропостачання гібридних КПК застосовується принцип модифікації структури СЕУ з інтеграцією додаткового статичного джерела живлення як динамічного резерву, що дозволило відповідати сучасним вимогам щодо енергоефективності, рівнів вібрації, шуму та ефектів деградації, що виробляються для СЕУ КПК, у всіх областях енергії для передачі енергії до гвинтів. Моделювання енергетичної передачі енергії до гвинтів у MatLab/Simulink здійснюється за допомогою блоків оптимізації та визначення ідентифікаційних маркерів. Результатом є визначення основних переваг та недоліків СЕУ КПК залежно від топології систем розподілу енергії. Відповідно до обраної структури системи розподілу електроенергії були отримані принципи передачі електроенергії у СЕУ КПК та енергетичних системах та їх стратегій управління з точки зору підвищення ефективності та усунення цих недоліків. І, нарешті, було поліпшено математичний апарат для досліджень процесів передачі енергії з точки зору розробки методів проектування та управління гібридними СЕУ КПК з метою зменшення споживання палива, викидів у навколишнє середовище та підвищення рівня ремонтпридатності, гнучкості та рівня комфорту. Оригінальність запропонованої методології полягає у вдосконаленні впровадження СЕУ КПК шляхом розробки методів ідентифікації маркерів деградаційних ефектів, які впливають на процеси в СЕУ КПК, та у реалізації цих методів у розрахункових та інформаційних системах. Метод передбачає ітеративні параметри оптимізації СЕУ КПК, він може бути використаний як засіб інтелектуального дизайну, який є результатом застосування покращеної продуктивності СЕУ КПК.

Keywords: *ship power plants, combined propulsion complex, degradation effects, effectiveness, functionality, decision support system.*

Ключові слова: *суднова електроенергетична система, комбінований пропульсивний комплекс, деградаційний ефект, ефективність, функціональність, система підтримки прийняття рішень.*

Постановка проблеми. Розробка прибережного шельфу (добуток природних копалин, будівництво вітряних та приливних електростанцій, пелагічне рибальство тощо) передбачає розвиток високотехнологічних наукомістких галузей морської індустрії, які передбачають будівництво та експлуатацію суден для забезпечення розвідувально-бурих, підйомно-транспортних та вантажно-розвантажувальних робіт в різних експлуатаційних умовах (так званий офшорний флот). Подібні судна обладнаються інноваційними комбінованими пропульсивними комплексами (КПК) із судновими енергетичними установками (СЕУ), які будуються за принципом єдиних електроенергетичних систем.

Проблеми підвищення енергоефективності, викликані дефіцитом енергоресурсів і прагненням до поліпшення екологічних показників СЕУ КПК, лежать в основі вимог, встановлених Міжнародною морською організацією (International Maritime Organization) в Додатку VI до Міжнародної конвенції по запобіганню забруднення з суден (МАРПОЛ) щодо конструктивного коефіцієнту енергоефективності (ККЕЕ) (англ. *Energy Efficiency Design Index – EEDI*) та експлуатаційного коефіцієнту енергоефективності (ЕКЕЕ) (англ. *Energy Efficiency Operational Index – EEOI*) у рамках розробки і виконання плану управління енергоефективністю судна (ПУЕЕС) (англ. *Ship Energy Efficiency Management Plan – SEEMP*) в процесі підвищення ефективності функціонування та експлуатації.

Таким чином, можна сформулювати актуальну науково-технічну проблему у галузі розвитку транспорту, транспортних технологій і відповідної інфраструктури: дослідження, розробка і прогнозування методів удосконалення експлуатаційних характеристик СЕУ КПК, які б забезпечували підвищення ефективності їх функціонування неможливо без встановлення закономірностей змінювання параметрів та впровадження методів і засобів діагностування та прогнозування технічного стану СЕУ КПК в процесі експлуатації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Гібридні СЕУ КПК з альтернативними джерелами енергії (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 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 валогенератору. Типові архітектури СЕУ КПК показані у [1]: суден для установки якорів (*Anchor Handling Vessel*) – Рис. Б.1; багатоцільових офшорних суден (*Multipurpose Offshore Vessel*) – Рис. Б.2; суден для заведення якорів та офшорного будівництва (*Construction anchor handling vessel*) –

Рис. Б.3, Рис. Б.4; резервних, рятівних та охоронних суден (*Stand-by and Guard Vessels*) – Рис. Б.5; суден для офшорного будівництва (*Offshore Construction Vessel*) – Рис. Б.6; Рис. Б.7; океанографічних дослідницьких суден (*Oceanographic Research Vessels*) – Рис. Б.8; риболовецьких дослідницьких суден (*Fisheries research vessel*) – Рис. Б.9; дизель-електричних пасажирських суден (*Diesel-electric Passenger Vessels*) – Рис. Б.10; риболовецьких траулерів (*Live Fish Carrier*) – Рис. Б.11; Рис. Б.13; пелагічних сейнер-траулерів (*Purse Seiner/Pelagic Trawler*) – Рис. Б.12; продуктових суден/танкерів хімовозів (*Product/Chemical Tankers*) – Рис. Б.14; Рис. Б.15; подвійних морських підйомників (*Twin Marine Lifter*) – Рис. Б.16; патрульних суден побудованих за технологією *SWATH* (*Small Waterplane Area Twin Hull*) – Рис. Б.17; днопоглиблювальних суден (*Cutter Suction Dredger*) – Рис. Б.18; суден для дослідження морського дна (*Seabed Logging Ship*) – Рис. Б.19; багатофункціональних геотехнічних дослідницьких суден (*Multipurpose Geotechnical & Soil Investigation Vessel*) – Рис. Б.20; офшорних суден для дослідження морського дна (*Offshore Subsea Construction Vessel*) – Рис. Б.21; багатоцільових суден із дистанційно-керованими підводними апаратами (англ. *Remotely operated underwater vehicle – ROV*) (*Multipurpose field & ROV Support Vessel*) – Рис. Б.22; суден для прокладання кабелів (*Cable laying vessel*) – Рис. Б.23; сейсмічних дослідницьких суден (*Seismic Research Vessel*) – Рис. Б.24; газових автомобільних поромів (*LNG Car Ferry*) – Рис. Б.25; різноманітних типів поромів (*Roll-on/Roll-off ships*) – Рис. Б.26.

В залежності від типу КПК використовується той чи інший з трьох відомих способів його динамічного утримання над точкою буріння, в залежності від чого застосовується та чи інша система управління розподілу потужності (*PMS*). СЕУ КПК зазвичай складається з 6÷10 потужних двигунів ПП різноманітних конструкцій в залежності від розташування на судні для позиціонування, які живляться від 4÷6 високовольтних СОДГ.

СОДГ розподіляються поміж шин як найменш двох головних розподільних щитів (ГРЩ), з'єднаних між собою за допомогою інтегрального вимикача. Функції *PMS* реалізовані в трьох незалежних системах управління, а саме: система динамічного позиціонування (англ. *Dynamic Positioning – DP*), свердління постійного струму (англ. *drilling DC power*) і системи управління даними (англ. *Data Management Systems – DMS*).

У таких проєктах функції управління живленням кожної системи працюють самостійно і мають спеціальні входи для датчиків з основних електричних мереж [2-4].

Системи розраховують загальну потужність, враховуючі загальне навантаження. Якщо загальне навантаження системи перевищує певні межі, встановлені заздалегідь, вони зменшуються. Система також знизить навантаження, якщо

навантаження на будь-який окремий СОДГ перевищить попередньо встановлену межу. Така структура дозволяє не перевищувати навантаження на окремий СОДГ навіть під час впливу зворотної потужності від будь-якого СОДГ або відмови компонента датчика.

У разі перевантаження, системи *DP* будуть зменшувати потребу потужності в заздалегідь визначених межах, знижуючи тим самим навантаження на ГРЩ, а система *DMS* видає сигнал на запуск резерву, щоб збільшити основну пропускну здатність ГРЩ.

На сучасному етапі технічної експлуатації подібних систем стоять наступні проблеми:

- дотримання систем *DP* вимогам менеджменту якості (англ. *Failure modes and effects analysis – FMEA*), з якими стикаються на етапі експлуатації [5-7];

- уніфікація *PMS* у комбінації функцій по відношенню до інших подібних [8, 9];

- незалежність складових систем *PMS* одна від одної навіть до рівня датчиків [10-12];

- не тільки зменшення потужності в розрахунку на загальне розрахункове навантаження, але також і навантаження окремого СОДГ [13, 14];

- відповідність системи умовам збільшення навантаження з точки зору достатності для забезпечення нормальної роботи в залежності від

будь-якої ненормального режиму і не перевантажування судової електроенергетичної системи (СЕЕС) взагалі [15, 16].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Система керування (СК) гібридним ДЕПК розподіляє потужність між СГЕ, СЧЕ і СЕЕС відповідно до обраної стратегії управління енергоспоживанням:

- із контролем за станом СОДГ (англ. *State machine control strategy – SMCS*);

- з *PI* управлінням (класична) та регулюванням ступеню заряду батарей (англ. *State-of-Charge – SOC*) СЧЕ (англ. *Classical PI control strategy with SOC's regulation – CPICS*);

- із контролем частоти і стану СОДГ та регулюванням ступеню заряду батарей СЧЕ (англ. *Frequency decoupling and state machine control strategy with SOC's regulation – FDSMCS*);

- за критерієм мінімуму споживання електроенергії (англ. *Equivalent consumption minimization strategy – ECMS*);

- за критерієм отримання максимуму альтернативної енергії та регулюванням ступеню заряду батарей СЧЕ (англ. *External energy maximization strategy with SOC's regulation – EEMS*).

Зведені дані аналізу переваг та недоліків застосування різних типів СЕУ КПК приведені у таблиці 1 [17].

ПЕРЕВАГИ І НЕДОЛІКИ ДВИГУНІВ І ТЕХНОЛОГІЙ ЖИВЛЕННЯ СЕУ КПК

Технологія	Переваги	Недоліки
Електро-механічний КПК	Низькі втрати при розрахунковій потужності	Низька ефективність при часткових і пікових навантаженнях
	Низькі викиди CO_2 та NO_x при розрахунковій потужності	Високі викиди NO_x при зниженні навантаження
	Низькі втрати перетворення енергії	Низьке резервування
		Підвищений рівень шуму
ДЕПК	Перевантажувальна спроможність	Постійність частоти обертання СОДГ
	Узгодженість навантаження із СОДГ	Втрати при розрахунковій потужності
	Висока перспективність	Ризик постійної нестабільності потужності навантаження
	Зниження викидів NO_x при низькій швидкості	
Потенційно низький рівень шуму		
Гібридний ДЕПК	Низькі втрати при розрахунковій потужності	Постійність частоти обертання СОДГ
	Перевантажувальна спроможність	
	Узгодження навантаження і ГЕД на низькій потужності	Складність системи
	Потенційно низький рівень шуму ГЕД	
Гібридний ДЕПК з АДЕ	Незалежність від стану повітря	Лімітована потужність
	Зниження викидів у повітря	Небезпечність
	Висока ефективність і низький рівень шуму	Можливість модернізації
Енерго-заощаджувальні гібридні СЕЕС	Незалежність від стану повітря	Лімітована потужність
	Зниження викидів у повітря і низький рівень шуму	Небезпечність
ДЕПК з гібридного СЕЕС	Вирівнювання навантаження	Постійність частоти обертання СОДГ
	Нульовий рівень шуму і шкідливих викидів	Складність системи
	Зберігання регенованої енергії	Небезпечність обслуговування батарей
	Ефективність резервного живлення	Вартість батарей
	Можливість включення імпульсної потужності	Необхідність контролю за станом кожної з батарей
	Зниження витрати палива і викидів у атмосферу	Можливість виходу з ладу батарей у наслідок перезаряджання
	Відсутність збільшення NO_x під час збільшення навантаження	Складність моніторингу за станом батарей
ДЕПК з гібридного СЕЕС постійного струму	Змінна швидкість обертання ГЕД і навантаження	Складність системи
	Оптимальне навантаження ГЕД	Вартість і втрати у силовій електроніці
	Зниження рівня шуму і вібрації двигуна	Збільшення NO_x у зв'язку зі змінною потужністю
	Зниження витрати палива і викидів CO_2	Необхідність впровадження енергозбереження при зменшенні потужності
	Можливість включення імпульсної потужності	Складність управління

Основним критерієм щодо визначення ефективності настроювання всережимних регуляторів СОДГ і ПЧ, що живлять ГЕД ПП, остається дотримання відповідного рівня питомої витрати палива (ПВП) (англ. *Specific fuel consumption* – *SFC*) у необхідних межах в залежності від навантаження на гребні гвинти і СОДГ (**Błąd! Nie można odnaleźć źródła o dwolania.**).

Основне призначення СГЕ як АДЕ у наведеному на рис. 1 гібридному ДЕПК – ввід в дію

СЕЕС після знеструмлення і підтримка потужності у маневрових режимах роботи судна, одним з яких є режим *DP*. В залежності від обраної стратегії управління енергоспоживанням, СК регулює потужність кожного джерела енергії у відповідності до заданих вихідної напруги і максимального струму СГЕ, СЧЕ і силових перетворювачів (ППН, ІН) [18].

Аналіз рис. 1 дозволяє зробити висновок, що управління гібридним ДЕПК є дуже складним процесом, який потребує урахування великої

кількості чинників енергетичних та застосуванні літій-іонних акумуляторних батарей експлуатаційних складових. Наприклад, такий компонент гібридного ДЕПК, як СНЕ, базується на (ЛІАБ, англ. *Lithium-ion batteries – LIB*) [19].

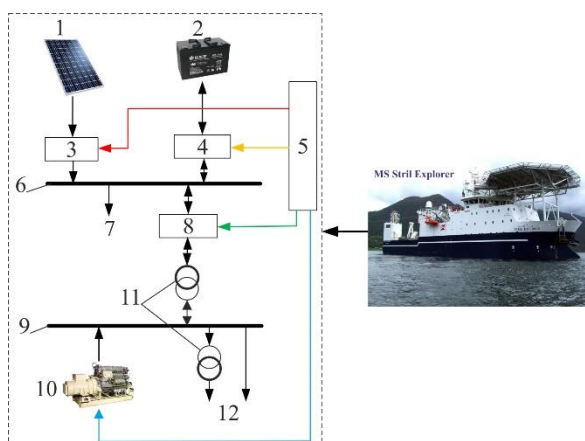


Рис. 1 Структурна функціональна схема гібридного ДЕПК: 1 – сонячні генеруючі елементи (СГЕ, англ. *photovoltaic (PV) generation system – PVGS*); 2 – система накопичення енергії (СНЕ, англ. *ESS*); 3, 4 – перетворювач (конвертер) постійної напруги (ППН, англ. *DC/DC converter*); 5 – система керування (СК) гібридним ДЕПК; 6 – ланка постійного струму (ЛПС, англ. *DC-link*); 7 – до споживачів постійного струму, наприклад – гальмівних опорів (англ. *resistor back unit – RBU*); 8 – інвертор напруги (ІН, англ. *voltage source inverter – VSI* або струму (ІС, англ. *current source inverter – CSI*), 9 – головний розподільний щит високої напруги (ГРЩ ВН, англ. *high voltage switchboard – HVSB*); 10 – суднова електроенергетична система (СЕЕС, англ. *ships power plant – SPP*) з середньо-обертковими дизель-генераторами (СОДГ, англ. *medium speed engine – MSE*); 11 – трансформатори напруги, 12 – до споживачів змінного струму, зокрема – гребних електродвигунів (ГЕД, англ. *propulsion electric motor – PEM*), підрулюючих пристроїв (ПП, англ. *thruster – THR*), головного розподільного щиту низької напруги (ГРЩ НН, англ. *low voltage switchboard – LVSB*).

Різноманіття режимів СЕУ КПК при застосуванні ЛІАБ визначає не тільки більшу номенклатуру вироблених ємностей і типорозмірів акумуляторів, а й широкі діапазони напруг (від семи до декількох сотень вольт) батарей на їх основі, необхідних для реалізації певних потужних, енергетичних і експлуатаційних характеристик СНЕ [20].

При наявності небезпечних зовнішніх впливів на СНЕ їх конструктивне виконання ускладнюється, також як і в разі потужних батарей (особливо для гібридних ДЕПК), які потребують додаткового повітряного або рідинного охолодження [21].

При проектуванні гібридних ДЕПК загальними вимогами для всіх ЛІАБ є забезпечення безпеки і зручності експлуатації, а також досягнення при циклічному режимі роботи повного розряду всіх АБ, а не робота за графіком найбільш слабкого елемента. Це досягається введенням до складу СНЕ селективної СК (англ. *Battery Management System – BMS*) акумуляторними модульними збірками (АМЗ), що здійснює моніторинг стану і захист батареї від виникнення небезпечних режимів роботи і надає інформацію про її основні параметри [22].

Захист від виникнення небезпечних режимів роботи здійснюється шляхом нівелювання розбалансу напруг ЛІАБ і формування керуючих сигналів (КС) для зміни режиму роботи зовнішніх пристроїв або для відключення АБ від зовнішніх

силових ланцюгів за допомогою комутаційної апаратури, яка конструктивно розміщується як у складі АБ, так і поза ними [23].

З огляду на вищесказане, можна зробити висновок, що розвиток ДЕПК потребує додаткових досліджень в області удосконалення енергетичних процесів, пов'язаних із застосуванням у ДЕПК альтернативних джерел енергії. Останні потребують розробки сучасних локальних СК с точки зору їх інтеграції у СК гібридними ДЕПК.

Ціль статті. Метою роботи є розвиток теорії, методології та технології у галузі підвищення ефективності функціонування суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів.

Для досягнення визначеної мети необхідно буде розв'язати проблему підвищення ефективності гібридних СЕУ КПК методом поєднання критеріїв стратегій управління розподілом енергії.

Виклад основного матеріалу. Залежно від точки підключення, просторовий вектор споживаного ГЕД (АД або СД) струму буде обертатися в d, q -координатах з частотою, що визначається фазою навантаження, яка в свою чергу, залежить від різниці імпедансу в точці підключення і найближчої високовольтної шини СОДГ.

Рівняння моделі одного СОДГ, підключеного до шин, можна описати системою рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{\Psi}}{dt} = (W(n) + FX^{-1})\bar{\Psi} + Nu_g + gu_f \\ \frac{dn}{dt} = \frac{1}{t}(t_{m_СОДГ} - \bar{\Psi}^t(M^tKM)X^{-1}\bar{\Psi}) \\ \Delta \frac{d\delta_{СОДГ}}{dt} = \omega_N(n - n_1), \end{cases} \quad (1)$$

де: $\bar{\Psi}$ – вектор потокозчеплення обмотки статору;

– u_f – напруга збудження, в. о.;

– n – частота обертання, [с⁻¹] валу генератору, в. о.;

– ω_N – номінальна частота обертання, [рад/с];

– r_{ss} – опір обмотки статору АД, в. о.;

– r_{lk} – опір шини між точками lk , в. о.;

– t_d, t_q – повздовжня і поперечна складові постійної часу демпферної обмотки СОДГ, с;

– t_f – постійна часу обмотки збудження, с;

– x_d, x_q – повздовжня і поперечна складові значення реактивного опору розсіяння обмоток статору, в. о.;

– $k_{\mu d}, k_{\mu q}, k_{\mu f}$ – повздовжня і поперечна складові значення коефіцієнту насичення демпферної і статорної обмоток СОДГ і обмотки збудження;

– μ_d, μ_f – коефіцієнти взаємодукції між обмоткою статору і демпферною, між обмоткою збудження и демпферною.

$$W(n) = \begin{bmatrix} 0 & \omega_N n & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_N n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad N = \begin{bmatrix} \omega_N & 0 \\ 0 & \omega_N \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$F = \begin{bmatrix} \omega_N(r_{ss} + r_{kl}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_N(r_{ss} + r_{kl}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/t_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/t_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/t_f \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$X = \begin{bmatrix} -x_d & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -x_q & 0 & 1 & 0 \\ -(1 - k_{\mu d})x_d & 0 & 1 & 0 & \mu_d \\ 0 & -(1 - k_{\mu q})x_d & 0 & 1 & 0 \\ -(1 - k_{\mu f})x_d & 0 & \mu_f & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad g = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{t_f} \end{bmatrix}^t. \quad (4)$$

Тоді, із виразу (1), вектор потокозчеплення $\bar{\Psi}$ СОДГ зв'язаний з величинами, що характеризують обмотку статору виразом:

$$h(\bar{\Psi}) = \bar{\Psi}_s^t K i_s = \bar{\Psi}^t (M^t K M) X^{-1} \bar{\Psi}, \quad (5)$$

$$\text{де } K = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}; \quad M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad M^t K M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Спільне рішення виразів (1), (2), (3), (4) дозволяє визначити постійну інтегрування, що характеризують уставки ПД-регуляторів СОДГ при їх паралельній роботі. Регулятори налаштовуються так, що один з регуляторів контролює частоту і напругу, а інший на постачання активної і реактивної потужностей з уставками, взятими щодо потужності першого генератора. Таким способом досягається рівномірний розподіл навантаження:

$$c = x_d(\mu_f(\mu_d + k_{\mu d} - 1) - \mu_d + 1 - k_{\mu d} + k_{\mu f}(k_{\mu q} - 1)).$$

Значення струму статору i_s , активної (P) і реактивної (Q) потужностей знаходяться із рівняння:

$$\begin{cases} i_s = M X^{-1} \bar{\Psi} \\ P = u_g^t i_s = u_g^t M X^{-1} \bar{\Psi} \\ Q = -u_g^t K i_s = -u_g^t K M X^{-1} \bar{\Psi}. \end{cases} \quad (6)$$

У разі збільшення загального навантаження, підключений на паралельну роботу генератор в початковий момент, сумірний з постійними часу СОДГ, може автоматично «взяти на себе» весь надлишок затребуваної споживачами потужності. Це пов'язано з тим, що, решта генераторів, що

працюють в сталому режимі, будуть поставляти постійні потужності в залежності від уставок, що може привести до несподіваної неузгодженості навантаження між генераторами.

Для захисту СНЕ від перезарядження і перерозрядження локальна СК здійснює вимір

напруги кожного елемента в ЛАБ. При цьому вимірювальні ланцюги усіх акумуляторів повинні бути гальванічно розв'язані і розраховані на роботу при напрузі, відповідній максимальній напрузі СНЕ (**Błąd! Nie można odnaleźć źródła odwołania.**). Для більшості застосувань точність вимірювання напруги ЛАБ повинна бути не гірше ± 20 мВ. При формуванні СК за рівнем напруги ЛАБ необхідно враховувати падіння напруги на їхньому внутрішньому опорі і температуру.

Для збереження працездатності СНЕ при відмові одного з ЛАБ при їх послідовному з'єднанні необхідно вивести його з силового ланцюга, одночасно зберігаючи її цілісність. Для цього використовуються електромеханічні або електронні байпасні пристрої, які управляються локальною СК, які встановлюються безпосередньо на ЛАБ для відводу через них тепла, що виділяється [24].

Апаратні методи нівелювання розбалансу напруг, що є складовими СППР при проектуванні СЕУ КПК, можна розділити на наступні:

- найбільш простий в реалізації пасивний метод, коли ЛАБ з підвищеною напругою розряджається за допомогою резистора, що підключається паралельно їй;
- активні методи, що забезпечують вирівнювання напруг АБ шляхом перерозподілу енергії між ними;
- системні методи, що забезпечують індивідуальний (незалежний) режим заряду для кожній ЛАБ.

Найбільш простим, але досить ефективним системним методом нівелювання розбалансу в ЛАБ великої та надвеликої ємності є їх заряд багатоканальними автоматичними зарядними пристроями (АЗП, англ. *charger, AC/DC converter*).

Для низьковольтних портативних ЛАБ добре зарекомендували себе схемотехнічні рішення, що забезпечують автоматичну перекомутацію ЛАБ з послідовної схеми на паралельну при підключенні до неї спеціалізованого АЗП [25].

При побудові потужних СНЕ для гібридних ДЕПК на перший план виходять вимоги безпеки при їх монтажі, експлуатації, технічного обслуговування і ремонту. Високо-енерго-ємнісні АБ можуть бути побудовані по послідовно-паралельній або паралельно-послідовній схемах [26].

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 і АДЕ [27] і визначається настроюванням системи керування розподіленням електроенергії. 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.



Рис. 2 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.

Таким чином, удосконалення стратегії за критерієм отримання максимуму альтернативної енергії та регулювання ступеню заряду батарей СНЕ (англ. *External energy maximization strategy with SOC's regulation – EEMS*) із використанням АДЕ стає перспективним підходом для підвищення

ефективності СЕУ КПК в порівнянні з безліччю функцій для майбутніх розробок. 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. 3.



Рис. 3 Блок-схема стратегії управління СЕУ КПК за критерієм максимуму альтернативної енергії та регулювання ступеню заряду батарей СНЕ: САРН – система автоматичного регулювання напруги (англ. Automatic Voltage Regulator – AVR); 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 проекції вектору зусилля на площину руху судна; α_A – кут повороту ПЦ відносно діаметральної площини судна

Висновки і пропозиції. У рамках вирішення головної задачі отримали подальший розвиток ресурсозберігаючі екологічно чисті технології експлуатації СЕУ КПК за рахунок застосування альтернативних генеруючих елементів (АГЕ) при проектуванні джерел живлення і підвищення їх швидкодії при зміні експлуатаційних режимів, що дозволило удосконалити стратегії керування гібридними СЕУ КПК з точки зору розподілу потужності між АГЕ, СНЕ, судновою електроенергетичною системою (СЕЕС) та іншими складовими СЕУ відповідно до обраної стратегії управління енергоспоживанням. А саме: у стратегії із контролем за станом СОДГ (англ. *State machine control strategy – SMCS*); із *PI* управлінням та регулюванням ступеню заряду батарей (англ. *State-of-Charge – SOC*) СНЕ (англ. *Classical PI control strategy with SOC's regulation – CPICS*); із контролем частоти і стану СОДГ та регулюванням ступеню заряду батарей СНЕ (англ. *Frequency decoupling and state machine control strategy with SOC's regulation – FDSMCS*); за критерієм мінімуму споживання електроенергії (англ. *Equivalent consumption minimization strategy – ECMS*); за критерієм отримання максимуму альтернативної енергії та регулюванням ступеню заряду батарей СНЕ (англ. *External energy maximization strategy with SOC's regulation – EEMS*). Вперше синтезовано тривірневу багатокритеріальну стратегію

управління розподілом енергії у гібридній СЕУ КПК, шляхом поєднання класичної стратегії управління розподілом потужності зі стратегією контролю за станом СОДГ і ступенем заряду АГЕ СНЕ, що дозволяє проектувати гнучкі багатофункціональні електроенергетичні системи, які інтегруються у гібридні СЕУ КПК в якості невід'ємної складової, а також проводити параметризацію пропульсивних і енергетичних характеристик СЕУ КПК в залежності від зміни експлуатаційних режимів, гідродинамічних характеристик і умов довкілля.

Можна зробити висновок, що контроль частоти і стан СОДГ з регулюванням ступеню заряду батарей СНЕ, при усіх інших рівних умовах для експлуатаційного режиму, дозволяє зменшити кількість, або потужність модулів СГЕ на 7÷10 %, а управління за критерієм отримання максимуму альтернативної енергії та регулюванням ступеню заряду батарей СНЕ використовувати акумуляторні батареї меншої ємності у межах 6÷8 %. Дослідження впливу параметрів основних регуляторів системи керування на енергетичні процеси в СЕУ КПК, підтвердило широкі можливості розробки та застосування різних ефективних стратегій функціонування систем стабілізації напруги СОДГ. СППР [28] розроблялася за технологією *Open System*, що означає його можливість реорганізуватися,

перенастроюватися і інтегруватися під технологічні процеси управління СЕУбудь-якої складності з перспективою на завершення у формі універсальної структури.

Список літератури:

1. Будашко, В. В. Підвищення ефективності функціонування суднових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту (0701 – транспорт і транспортна інфраструктура). – Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, 2017, 422 с. Режим доступу: http://www.onma.edu.ua/wp-content/uploads/2016/09/Thesis_Budashko_END-1.pdf. – 5.9.2018 р. – Загол. з екрану.
2. Benetazzo, F. Advanced control for fault-tolerant dynamic positioning of an offshore supply vessel [Text] / F. Benetazzo, G. Ippoliti, S. Longhi, P. Raspa // *Ocean Engineering*. – 2015. – V. 106. – P. 472–484. Doi:10.1016/j.oceaneng.2015.07.001.
3. Chen, H. Effect of DGPS failures on dynamic positioning of mobile drilling units in the North Sea [Text] / H. Chen, T. Moan, H. Verhoeven // *Accident Analysis & Prevention*. – 2009. – V. 41, I. 6 – P. 1164–1171. Doi:10.1016/j.aap.2008.06.010.
4. Du, J. Robust dynamic positioning of ships with disturbances under input saturation [Text] / J. Du, X. Hu, M. Krstić, Y. Sun // *Automatica*. – 2016. – V. 73. – P. 207–214. Doi:10.1016/j.automatica.2016.06.020.
5. Zahedi, B. Optimized efficiency of all-electric ships by dc hybrid power systems [Text] / B. Zahedi, L. E. Norum, K. B. Ludvigsen // *Journal of Power Sources*. – 2014. – V. 255. – P.341–354. Doi:10.1016/j.jpowsour.2014.01.031.
6. Budashko, V. Theoretical-applied aspects of the composition of regression models for combined propulsion complexes based on data of experimental research [Text] / V. Budashko, V. Golikov // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2017. – V. 4. – № 3(88). – P. 11 – 20. Doi:10.15587/1729-4061.2017.107244.
7. Kiran, D. R. Chapter 26 – Failure Modes and Effects Analysis [Text] / D. R. Kiran // *In Total Quality Management, Butterworth–Heinemann* – 2017. – P. 373–389. Doi:10.1016/B978-0-12-811035-5.00026-X.
8. Kritzinger, D. Failure Modes and Effects Analysis [Text] / D. Kritzinger // *In Aircraft System Safety, Woodhead Publishing*. – 2017. – P. 101–132. Doi:10.1016/B978-0-08-100889-8.00005-2.
9. Jaguemont, J. A comprehensive review of *Lithium-ion batteries* used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures [Text] / J. Jaguemont, L. Boulon, Y. Dubé // *Applied Energy*. – 2016. – V. 164. – P. 99–114. Doi:10.1016/j.apenergy.2015.11.034.
10. Zhang, Y. Energy conversion mechanism and regenerative potential of vehicle suspensions [Text] /

Y. Zhang, K. Guo, D. Wang, C. Chen, X. Li // *Energy*. – 2017. – V. 119. – P. 961–970. Doi:10.1016/j.energy.2016.11.045.

11. Budashko, V. Synthesis of the Management Strategy of the Ship Power Plant for the Combined Propulsion Complex [Text] / V. Budashko, V. Shevchenko // 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), Kyiv, 16-18 Oct. 2018, Ukraine: IEEE. – P. 106-108. Doi: 10.1109/MSNMC.2018.8576266. Режим доступу: <http://www/ieeexplore.ieee.org/document/8576266>. – 5.1.2019 р. – Загол. з екрану.

12. Zhang, S. Model predictive control for power management in a plug-in hybrid electric vehicle with a hybrid *Energy Storage System* [Text] / S. Zhang, R. Xiong, F. Sun // *Applied Energy*. – 2017. – V. 185 (2). – P. 1654–1662. Doi:10.1016/j.apenergy.2015.12.035.

13. Nikolskyi, V. The monitoring system of the Coanda effect for the tension-leg platform's [Text] / V. Nikolskyi, V. Budashko, S. Khniunin // *Proceeding Book of International conference on engine room simulators (ICERS12)*. – Istanbul, Istanbul Technical University, Maritime Faculty, 2015. – P. 45–49. ISBN: 978-605-01-0782-1. Available at: <http://www.maritime.itu.edu.tr/icers12/program.htm>.

14. Ling-Chin, J. Investigating the implications of a new-build hybrid power system for Roll-on/Roll-off cargo ships from a sustainability perspective – A life cycle assessment case study [Text] / J. Ling-Chin, A. P. Roskilly // *Applied Energy*. – 2016. – V. 181. – P. 416–434. Doi:10.1016/j.apenergy.2016.08.065.

15. Budashko, V. Formalization of design for physical model of the azimuth thruster with two degrees of freedom by computational fluid dynamics methods [Text] / V., Budashko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2017. – V. 3. – № 7(87). – P. 40–49. Doi:10.15587/1729-4061.2017.101298.

16. Bentin, M. A New Routing Optimization Tool-influence of Wind and Waves on Fuel Consumption of Ships with and without Wind Assisted Ship Propulsion Systems [Text] / M. Bentin, D. Zastrau, M. Schlaak, D. Freye, R. Elsner, S. Kotzur // *Transportation Research Procedia*. – 2016. – V. 14. – P. 153–162. Doi:10.1016/j.trpro.2016.05.051.

17. Shih, N.-C. Development of a 20 kW generic hybrid fuel cell power system for small ships and underwater vehicles [Text] / N.-C. Shih, B.-J. Weng, J.-Y. Lee, Y.-C. Hsiao // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2014. – V. 39, I. 25. – P. 13894–13901. Doi:10.1016/j.ijhydene.2014.01.113.

18. Ko, J. Comparative investigation of NOx emission characteristics from a Euro 6-compliant diesel passenger car over the NEDC and WLTC at various ambient temperatures [Text] / J. Ko, D. Jin, W. Jang, C.-L. Myung, S. Kwon, S. Park // *Applied Energy*. – 2017. – V. 187. – P. 652–662. Doi:10.1016/j.apenergy.2016.11.105.

19. Jeyaprabha, S. B. Optimal sizing of photovoltaic/battery/diesel based hybrid system and optimal tilting of solar array using the artificial intelligence for remote houses in India [Text] / S. B. Jeyaprabha, A. L. Selvakumar // *Energy and Buildings*. – 2015. – V. 96. – P. 40–52. Doi:10.1016/j.enbuild.2015.03.012
20. Li, C.-Z. Fundamentals of renewable energy processes, 2nd ed. [Text] / C.-Z. Li // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2006. – V. 84. – I. 6. – P. 476. Doi:10.1205/psep.br.0606.
21. Budashko, V. V. Physical model of degradation effect by interaction azimuthal flow with hull of ship [Text] / V. V. Budashko, V. V. Nikolskyi, O. A. Onishchenko, S. N. Khniunin // *Proceeding Book of International conference on engine room simulators (ICERS12)*. – Istanbul, Istanbul Technical University, Maritime Faculty, 2015. – P. 49–53. ISBN: 978–605–01–0782–1. Available at: \www/ URL: <http://www.maritime.itu.edu.tr/icers12/program.htm>.
22. Zhou, Y. A novel health indicator for on-line *Lithium-ion batteries* remaining useful life prediction [Text] / Y. Zhou, M. Huang, Y. Chen, Y. Tao // *Journal of Power Sources*. – 2016. – V. 321. – P. 1–10. Doi:10.1016/j.jpowsour.2016.04.119.
23. Delucchi, M. A. Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part II: Reliability, system and transmission costs, and policies [Text] / M. A. Delucchi, M. Z. Jacobson // *Energy Policy*. – 2011. – V. 39. – I. 3. – P. 1170–1190. Doi:10.1016/j.enpol.2010.11.045.
24. Ordoñez, J. Processes and technologies for the recycling and recovery of spent *Lithium-ion batteries* [Text] / J. Ordoñez, E.J. Gago, A. Girard // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – V. 60. – P. 195–205. Doi:10.1016/j.rser.2015.12.363.
25. Hussein, A. A. Design considerations and performance evaluation of outdoor PV battery chargers [Text] / A. A. Hussein, A. A. Fardoun // *Renewable Energy*. – 2015. – V. 82. – P. 85–91. Doi:10.1016/j.renene.2014.08.063.
26. Vetter, M. Chapter 11 – Rechargeable Batteries with Special Reference to Lithium–Ion Batteries [Text] / M. Vetter, S. Lux // *Storing Energy*. – 2016. – P. 205–225. Doi:10.1016/B978-0-12-803440-8.00011-7.
27. Budashko, V. V. Design of the three-level multicriterial strategy of hybrid marine power plant control for a combined propulsion complex [Text] / V. V. Budashko // *Electrical engineering & electromechanics*. – 2017. – №2. – P. 62 – 72. Doi:10.20998/2074-272X.2017.2.10.
28. Budashko, V. Decision support system's concept for design of combined propulsion complexes [Text] / V. Budashko, V. Nikolskyi, O. Onishchenko, S. Khniunin // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – V. 3. – № 8(81). – P. 10 – 21. Doi:10.15587/1729-4061.2016.72543.