

Збруцький О.В.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Надточий А.В.

Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ ГІБРИДНОЮ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЮ СИСТЕМОЮ БЕЗЕКІПАЖНОГО НАДВОДНОГО СУДНА

Безекіпажні надводні судна належать до перспективних засобів морської робототехніки, що активно розвиваються. Для таких суден, особливо гібридні електроенергетичні системи з поєднанням акумуляторних батарей та дизель-генераторів відіграють важливу роль. Такі системи дозволяють досягти не лише високої ефективності в енергоспоживанні, але й мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище. Тому розробка систем автоматичного керування такими системами є актуальним прикладним науковим завданням. Аналіз основних режимів роботи гібридної електроенергетичної системи безекіпажного надводного судна, до складу якої входять акумуляторна батарея та дизель-генератор постійного струму, та розробка складу й алгоритмічного забезпечення системи автоматичного керування такою системою. Використано методологію аналізу науково-технічної літератури та принцип системного підходу. Об'єктом дослідження є процес функціонування гібридної електроенергетичної системи безекіпажного надводного судна. Предметом дослідження є обґрунтування основних експлуатаційних режимів роботи безекіпажного надводного судна та розробка узагальненого алгоритму роботи системи автоматичного керування його гібридною електроенергетичною системою. З позицій системного підходу сформовано перелік основних режимів експлуатації гібридної електроенергетичної системи та запропоновано склад системи автоматичного керування нею. До основних складових системи керування віднесено програмно-технічні засоби керування енергосистемою, система збору, обробки, відображення та архівування інформації, а також система забезпечення безпеки функціонування енергосистеми безекіпажного надводного судна. Запропоновано програмно-технічні засоби керування енергосистемою будувати у складі підсистеми оперативного вибору джерела енергії для поточного режиму роботи судна, підсистеми оптимізації енергоспоживання гібридної енергосистеми, підсистеми заряджання акумуляторів та підсистеми керування піковими навантаженнями енергосистеми при екстремальних режимах роботи судна. Розроблено множину задач, які мають реалізувати запропоновані підсистеми автоматичного керування гібридною електроенергетичною системою та множина задач, які мають реалізувати запропоновані підсистеми системи автоматичного керування гібридною енергосистемою утворюють науково-методологічне підґрунтя для інженерної розробки автоматичної електроенергетичної системи як важливої складової процесу створення безекіпажних надводних суден. Наукові результати дослідження дають змогу організувати процес концептуального проектування системи автоматичного керування гібридною електроенергетичною системою безекіпажного надводного судна.

Ключові слова: безекіпажне надводне судно, система автоматичного керування, гібридна електроенергетична система.

Постановка проблеми. Безекіпажні надводні судна (БНС, в англійській літературі – unpowered surface vessels, USV) є одними з найбільш перспективних напрямків розвитку судноплавної техніки. Їхнє застосування дозволяє зменшити витрати на екіпаж, підвищити безпеку, а також ефективніше використовувати ресурси суден [1, 2].

Сьогодні технології автономного судноплавства постійно розвиваються, і одним з важливих аспектів цього напрямку є електроенергетична система БНС, зокрема, гібридні енергетичні системи (ГЕЕС, в англійській літературі – Hybrid Power System, HPS) з поєднанням акумуляторних батарей та дизель-генераторів або відновлюваль-

них джерел енергії. Такі системи забезпечують високу ефективність використання енергії та мінімізацію негативного впливу БНС на навколишнє середовище [3, 4].

Однією з ключових складових БНС з ГЕЕС є система керування такою електроенергетичною системою, оскільки автоматизація процесу її функціонування має критичне значення для забезпечення надійності роботи судна, його енергетичної ефективності та зниження ризиків поломок.

У статті розглядаються принципи автоматизації керування ГЕЕС безекіпажного судна, яка складається з акумуляторних батарей та дизель-генератора постійного струму.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Незважаючи на відносну новизну постановки задачі створення ГЕЕС для БНС, наукові дослідження щодо побудови, функціонування та автоматизації керування для таких об'єктів досить активно досліджуються вже більше 15 років [5-10].

Так, у роботі [5] розглядаються питання математичного моделювання та оптимізації ГЕЕС, що складається з кількох різних джерел живлення, пропонується інструмент для визначення розміру окремих компонентів енергосистеми та оптимізації змінних керування енергосистемою. Але питання керування такою системою у роботі не розглядається.

У статті [6] розглянуто ГЕЕС лоцманського човна і пропонується заснована на правилах стратегія енергоменеджменту, яка приймає рішення щодо розподілу електроенергії досліджуваними компонентами електростанції. Авторами також розроблено динамічну байєсовську мережу для контролю надійності компонентів енергосистеми з урахуванням робочого режиму електростанції. Однак питання розробки системи автоматичного керування (САК) ГЕЕС авторами не розглядається.

У статті [7] розроблено інструментарій моделювання для морських гібридних силових установок, обладнаних паливними елементами та батареями з полімерно-обмінною мембраною. Віртуальна модель, завдяки поєднанню операційних даних і динамічно змодельованих підсистем, може імітувати електростанції різних розмірів і конфігурацій, щоб проаналізувати реакцію різних стратегій управління енергією. Проте, створений інструментарій не дає змогу досліджувати ГЕЕС з акумуляторними та дизель-генераторними джерелами бортової енергії.

Важливий з позицій практичної експлуатації БНС результат отримано у роботі [8], де пропо-

нується онлайн-планування одночасного руху та керування ГННС БНК з кількома практичними обмеженнями. У роботі для значного скорочення споживання енергії розроблено систему інтегрованого планування та контролю на основі онлайн-економічної моделі прогнозного керування. Однак структуру САК ГЕЕС автори не наводять.

Стаття [9] присвячена синтезу системи керування енергосистемою БНС в умовах, коли на судно активно діють зовнішні збурення – вітер та морська течія. Авторами досліджують глобальну проблему енергоефективного планування шляху для БНС, мета якої полягає в тому, щоб отримати оптимальний шлях під впливом зовнішніх збурень та керувати судном так, щоб уникнути статичних перешкод. Авторами пропонують новий алгоритм оптимізації шляху для зменшення кількості точок шляху та згладжування шляху. Однак наведений алгоритм мінімізує загальні витрати бортової енергії судна без аналізу процесу її отримання від різних джерел ГЕЕС.

У роботі [10] представлено результати проекту «Розумна система управління енергією для безпілотних надводних суден», який фінансується програмою дослідницьких грантів для європейських університетів. Ключовим результатом проекту є розробка повністю електричного прототипу електроенергетичної системи безекіпажного судна, яка включає фотоелектричні панелі та вдосконалену систему інтелектуального керування таким об'єктом. Проте конкретні технічні рішення щодо побудови САК електроенергетичною системою судна автори не наводять.

Розглянуті публікації свідчать про актуальність розробки системи автоматичного керування ГЕЕС, яка б забезпечувала ефективну та надійну експлуатацію бортових джерел енергії БНС з урахуванням особливостей експлуатації судна і, зокрема, його режимів роботи.

Мета дослідження. Метою дослідження є аналіз основних режимів роботи гібридної електроенергетичної системи безекіпажного надводного судна, до складу якої входять акумуляторна батарея та дизель-генератор постійного струму, та розробка складу й алгоритмічного забезпечення системи автоматичного керування такою системою.

При дослідженні використано методологію аналізу науково-технічної літератури та принцип системного підходу. Об'єктом дослідження є процес функціонування гібридної електроенергетичної системи безекіпажного надводного судна. Предметом дослідження є обґрунтування основних експлуатаційних режимів роботи безе-

кіпажного надводного судна та розробка узагальненого алгоритму роботи системи автоматичного керування його гібридною електроенергетичною системою.

Виклад основного матеріалу. Гібридна електроенергетична система БНС – це головний енергетичний комплекс судна, що поєднує два або більше джерела енергії для забезпечення енергетичних потреб судна. У подальшому розглядається ГЕЕС, яка об'єднує акумуляторні батареї (АкБ), які є джерелом електричної енергії, та дизель-генератор (ДГ), що забезпечує додаткову потужність у разі необхідності. При цьому АкБ забезпечують зберігання енергії і використовуються для живлення електричних систем судна під час маневрування або в умовах низької навантаженості, коли дизель-генератор може бути неефективним. Вони також служать для компенсації короточасних пікових навантажень, знижуючи необхідність у постійному використанні дизельного двигуна. ДГ зазвичай використовуються для забезпечення енергопостачання при великих навантаженнях або на довгих відстанях, коли акумуляторів не вистачає для підтримки необхідної потужності. Дизельний двигун дає змогу забезпечити високу надійність ГЕЕС, оскільки він може працювати практично в будь-яких умовах і за короткий час забезпечити заряджання акумуляторних батарей. Розглянемо тепер основні режими роботи ГЕЕС. Виходячи з принципів системного підходу до аналізу технічних систем [11] режими роботи ГЕЕС БНС доцільно умовно поділити на наступні основні режими, які достатньо повно враховують характер електричного навантаження енергосистеми та вимоги до енергоспоживання судна:

режим базового навантаження (енергоживлення БНС від АкБ) R_N – це найбільш ефективний режим з точки зору енергоспоживання та екології, оскільки ДГ не працює і, відповідно, не відбуваються викиди забруднюючих речовин; зазвичай цей режим застосовується на коротких відстанях, коли необхідна лише невелика потужність для маневрування або стабільного руху БНС;

режим заряду (підзарядка АкБ) R_C – у цьому режимі ДГ працює для підзарядки АкБ, коли запас енергії в акумуляторах починає знижуватися; дизельний двигун ДГ працює в оптимальному режимі для максимального економічного споживання палива; при цьому забезпечується можливість БНС продовжувати автономний рух протягом тривалого часу; крім того, забезпечу-

ється ефективно заряджання АкБ без перегріву акумуляторів і зниження витрат палива;

режим підвищеного навантаження R_1 – у цьому режимі БНС потребує більшої потужності, ніж може надати лише АкБ; у цьому випадку ДГ підключається до загальних шин ГЕЕС і разом з АкБ забезпечує необхідну потужність; завдання САК ГЕЕС при цьому полягає в оптимізації співвідношення між потужностями, які відбираються від АкБ і ДГ з метою збереження енергії акумуляторів для подальшого використання в менш енерговитратних режимах;

режим пікових навантажень R_p – виникає при різкому збільшенні навантаження, наприклад, у разі різкої зміни умов навігації (шторм, швидкісні маневри тощо), при спробі швидкого виходу з небезпечної ситуації; у цьому режимі АкБ можуть забезпечити додаткову потужність на короткий час (до кількох хвилин), що дає змогу знизити навантаження на ДГ і забезпечити стабільність роботи ГЕЕС безекіпажного судна у цілому.

Таким чином, множину RHPS основних режимів роботи ГЕЕС можна записати у наступному вигляді:

$$R_{HPS} = \{R_N; R_C; R_1; R_p\}. \quad (1)$$

Розглянемо тепер особливості побудови САК ГЕЕС для кожного режиму роботи множини (1). Зазначимо, що автоматизація керування ГЕЕС полягає в інтеграції сучасних технологій для забезпечення безперервного моніторингу та регулювання енергоспоживання на всіх етапах експлуатації БНС.

До основних завдань автоматизації T_A віднесемо:

завдання моніторингу стану енергетичного обладнання T_{A-M} – контроль працездатності ДГ, АкБ, інверторів та зарядних пристроїв, систем розподілу енергії, релейно-захисної апаратури та кабелів, контроль стану електричної ізоляції тощо;

завдання оптимізації енергоспоживання T_{A-O} – зменшення витрат енергії при збереженні високої ефективності роботи дизеля та інших систем;

завдання автоматичного регулювання напруги та струму T_{A-C} – підтримка стабільних значень цих параметрів для забезпечення безпеки та стабільної роботи БНС.

Автоматична система керування ГЕЕС має включати наступні основні технічні складові S_C :

програмно-технічні засоби для оперативного керування роботою ГЕЕС, прогнозування наван-

таження та оптимізації процесів генерування електричної енергії та процесів енергоспоживання S_{C-A} [12];

системи збору, обробки, відображення та архівування інформації про технічний стан обладнання ГЕЕС в реальному часі S_{C-I} ; такі системи доцільно будувати на принципах SCADA [13];

системи забезпечення безпеки функціонування ГЕЕС S_{C-S} – автоматичного відключення джерел живлення, автоматичної реконфігурації структури бортової електричної мережі в разі виникнення аварійної ситуації [14].

Очевидно, що найбільшу складність має процес розробки програмно-технічних засобів складової S_{C-A} . Тому у подальшому розглянемо роботу основних підсистем саме цієї системи. Попередній аналіз свідчить, що складову S_{C-A} системи автоматичного керування ГЕЕС доцільно синтезувати у вигляді чотирьох підсистем, які мають враховувати змінні навантаження судна, потреби в енергії для виконання різних операцій у відповідності до режимів роботи (1) БНС, а також забезпечувати ефективне використання бортових енергетичних ресурсів. До основних підсистем складової S_{C-A} системи автоматичного керування ГЕЕС пропонується віднести наступні:

підсистему вибору джерела енергії S_{C-A-Q} , основним завданням якої є визначення та підключення до бортової електричної мережі конкретного джерела енергії (АкБ чи ДГ), яке має бути використано в поточний момент часу для забезпечення енергетичних потреб судна;

підсистему оптимізації енергоспоживання S_{C-A-O} , яка призначена для оптимізації процесів використання енергії з АкБ і ДГ з метою мінімізації витрат палива ДГ і подовження терміну служби акумуляторів;

підсистему заряджання акумуляторів S_{C-A-C} , яка забезпечує керування процесом зарядки акумуляторів, щоб уникнути їх перевантаження і продовжити термін служби;

підсистему керування піковими навантаженнями в ГЕЕС S_{C-A-P} , яка забезпечує ефективний розподіл електричного навантаження між АкБ і ДГ під час різкого збільшення навантаження (наприклад, при необхідності різкого збільшення швидкості чи інтенсивному маневруванні БНС).

Таким чином, можна сформулювати наступні множини завдань системи автоматичного керування ГЕЕС БНС та її підсистем:

$$T_A = \{T_{A-M}; T_{A-O}; T_{A-C}\}; \quad (2)$$

$$S_C = \{S_{C-A}; S_{C-I}; S_{C-S}\}; \quad (3)$$

$$S_{C-A} = \{S_{C-A-Q}; S_{C-A-O}; S_{C-A-C}; S_{C-A-P}\}. \quad (4)$$

Система множин (1)-(4) утворює базовий перелік завдань автоматизації ГЕЕС БНС. Розглянемо тепер структури алгоритмів, за якими функціонують підсистем (4). Алгоритм функціонування підсистеми вибору джерела енергії S_{C-A-Q} працює наступним чином:

якщо поточний рівень заряду акумуляторної батареї $V_{CL}(t)$ (у відсотках чи в ампер-годинах) достатній для забезпечення необхідною енергією V_{CL-USV} споживачів БНС (режим R_N згідно (1)), система автоматичного керування ГЕЕС підключає до судової електромережі лише АкБ (операція включення $J_{АкБ}$);

якщо поточний рівень заряду акумуляторної батареї $V_{CL}(t)$ низький (режим R_C згідно (1)), система автоматичного керування ГЕЕС запускає ДГ (операція включення $J_{ДГ}$) для підзарядки акумуляторів і забезпечення електроенергією споживачів БНС;

якщо режим роботи БНС вимагає тривалого підвищеного енергоспоживання (режим R_I згідно (1), коли $V_{CL-USV}=V_{CL-USV-max}$), система автоматичного керування ГЕЕС запускає та підключає ДГ (операція включення $J_{ДГ}$), який працює разом з АкБ (операція включення $J_{АкБ}$) для забезпечення необхідної потужності;

якщо режим роботи БНС вимагає короткочасових пікових навантажень на ГЕЕС (режим R_P згідно (1), коли $V_{CL-USV}=V_{CL-USV-P}>V_{CL-USV-max}$), підсистема вибору джерела енергії S_{C-A-Q} також одночасно використовує АкБ і ДГ (операції включення $J_{АкБ}$ і $J_{ДГ}$), однак при цьому акумулятори використовуються для миттєвого забезпечення споживачів БНС енергією, оскільки вони можуть дуже швидко забезпечити необхідну потужність на короткий період часу та знизити навантаження на дизель-генератор, а ДГ працює паралельно з АкБ і забезпечує додаткову потужність на більш тривалий період, зберігаючи акумуляторним батареям свою ємність для наступних маневрів або періодів зниженого навантаження.

Звичайно, до складу ГЕЕС БНС, у загальному випадку, окрім АкБ та ДГ, входять також системи та прилади перетворення електричної енергії, необхідні для живлення бортових споживачів з різними потужностями та номіналами напруги живлення. Особливості їх роботи у режимах роботи згідно (1) у даній статті не розглядаються, оскільки становлять тему додаткового дослідження. Отриманий алгоритм роботи підсистеми вибору джерела енергії S_{C-A-Q} САК ГЕЕС можна представити наступним чином:

$$S_{C-A-Q} = \begin{cases} \text{при режимі } R_N, \text{ якщо } B_{CL} \geq B_{CL-USV} \text{ то } J_{AKB}; \\ \text{при режимі } R_C, \text{ якщо } B_{CL} < B_{CL-USV} \text{ то } J_{DG}; \\ \text{при режимі } R_I, \text{ якщо } B_{CL} = B_{CL-USV-Max} \text{ то } J_{DG} \cap J_{AKB}; \\ \text{при режимі } R_P, \text{ якщо } B_{CL-USV} = B_{CL-USV-P} > B_{CL-USV-max} \text{ то } J_{DG} \cap J_{AKB}. \end{cases} \quad (5)$$

Алгоритм функціонування підсистеми оптимізації енергоспоживання S_{C-A-O} виконує наступні операції:

забезпечує оптимальний режим зарядки акумуляторів $S_{C-A-O-C}$, контролюючи зарядний струм АКБ з метою недопущення її перезарядки та підвищення температури в акумуляторному відділенні БНС;

оптимізує роботу ДГ з метою дотримання найбільш економічного діапазону потужності $S_{C-A-O-E}$ (режим роботи з максимальним ККД дизеля та мінімальними питомими витратами пального);

забезпечує режим перепідключення $S_{C-A-O-R}$ електричного навантаження БНС між двома бортовими джерелами енергії в залежності від швидкості судна, навантаження і стану АКБ.

Алгоритм функціонування підсистеми заряджання акумуляторів S_{C-A-C} забезпечує підтримку АКБ у робочому стані та контролює наступні параметри:

стан заряду акумуляторів $S_{C-A-C-AKB}$ (якщо рівень заряду АКБ низький, запускається ДГ і підключається до АКБ для їх зарядки);

поточне навантаження на ГЕЕС БНС $S_{C-A-C-L}$ (якщо судно потребує більшої потужності, включається ДГ);

оптимальний рівень зарядженості АКБ $S_{C-A-C-AKB-O}$ який забезпечує ефективність і довговічність АКБ.

Алгоритм функціонування підсистеми керування піковими навантаженнями в ГЕЕС S_{C-A-P} визначає потребу в додатковій потужності для виконання короткочасних та енерговитратних маневрів БНС або подолання великих навантажень. При цьому вирішуються наступні завдання:

забезпечення необхідної потужності система керування $S_{C-A-P-N}$ – коли БНС потребує більше енергії, ніж може забезпечити одне джерело, система керування забезпечує відповідний рівень потужності, поєднуючи енергію з декількох джерел;

попередження перевантажень $S_{C-A-P-OI}$ – керування піковими навантаженнями повинно запобігти ситуаціям, коли одна з енергетичних систем (наприклад, АКБ або ДГ) перевантажується, що може призвести до її поломки або зниження ефективності;

оптимізація витрат палива та енергії $S_{C-A-P-OE}$ – під час пікових навантажень система керування повинна мінімізувати витрати палива, надаючи пріоритет використанню акумуляторних батарей, що дозволяє скоротити час роботи ДГ;

збереження ресурсу АКБ $S_{C-A-P-R-AKB}$ – акумулятори мають обмежену кількість циклів зарядки/розрядки, тому система керування має забезпечити недопущення надмірного розряду, особливо під час пікових навантажень.

Таким чином, можна сформулювати множину задач, які мають реалізувати підсистеми S_{C-A-O} , S_{C-A-C} та S_{C-A-P} системи автоматичного керування ГЕЕС:

$$S_{C-A-O} = \{S_{C-A-O-C}; S_{C-A-O-E}; S_{C-A-O-R}\}; \quad (6)$$

$$S_{C-A-C} = \{S_{C-A-C-AKB}; S_{C-A-C-L}; S_{C-A-C-AKB-O}\}; \quad (7)$$

$$S_{C-A-P} = \{S_{C-A-P-N}; S_{C-A-P-OI}; S_{C-A-P-OE}; S_{C-A-P-R-AKB}\}. \quad (8)$$

Таким чином, розроблені алгоритми автоматичного керування гібридною енергетичною системою (5)-(8) є важливим аспектом розвитку такого виду морської робототехніки, оскільки вони дають змогу забезпечити максимальну ефективність використання енергії, мінімізацію витрат палива та продовження терміну служби акумуляторних батарей БНС.

Автоматизація керування електроенергетичною системою безкіпажного надводного судна є важливою складовою для забезпечення ефективної та надійної роботи таких суден. Одним з перших кроків на шляху до повної автоматизації керування ГЕЕС є аналіз основних режимів її роботи, формування переліку основних завдань автоматизації ГЕЕС та розробка складу системи автоматичного керування ГЕЕС. Важливою складовою робіт щодо автоматизації функціонування ГЕЕС БНС є розробка алгоритмів керування основними складовими її системи керування. Отримані у результаті дослідження множини задач автоматизації ГЕЕС утворюють науково-методологічне підґрунтя для розгортання інженерних робіт по проектуванню автоматизованої ГЕЕС як важливої складової процесу створення безкіпажних надводних суден.

Висновки.

1. У результаті аналізу сучасних публікацій щодо побудови систем автоматичного керування гібридними електроенергетичними системами

безекіпажних надводних суден сформовано перелік основних режимів їх експлуатації та сформульовано перелік основних завдань автоматизації таких систем.

2. Запропоновано склад системи автоматичного керування гібридною електроенергетичною системою безекіпажного судна, до складу енергетичного обладнання якого входять акумуляторна батарея та дизель-генератор. Як основні складові такої системи керування розглядаються програмно-технічні засоби керування енергосистемою, система збору, обробки, відображення та архівування інформації, а також система забезпечення безпеки функціонування енергосистеми безекіпажного надводного судна.

3. Запропоновано програмно-технічні засоби керування енергосистемою будувати у складі підсистеми оперативного вибору джерела енергії

для поточного режиму роботи судна, підсистеми оптимізації енергоспоживання гібридної енергосистеми, підсистеми заряджання акумуляторів та підсистеми керування піковими навантаженнями енергосистеми при екстремальних режимах роботи судна.

4. Розроблено множину задач, які мають реалізувати запропоновані підсистеми системи автоматичного керування гібридною енергосистемою, що утворює науково-методологічне підґрунтя для інженерної розробки автоматичної електроенергетичної системи як важливої складової процесу створення безекіпажних надводних суден.

5. Подальші дослідження планується проводити у напрямку розробки узагальненого алгоритму функціонування системи автоматичного керування гібридною енергосистемою безекіпажного надводного судна.

Список літератури:

1. Yanchin I., Petrov O. Towards Autonomous Shipping: Benefits and Challenges in the Field of Information Technology and Telecommunication. *The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Volume 14, Number 3, September 2020. Papers 611-619. DOI: 10.12716/1001.14.03.12
2. Peilin Xie; Josep M. Guerrero; Sen Tan; Najmeh Bazmohammadi; Juan C. Vasquez; Mojtaba Mehrzadi. Optimization-Based Power and Energy Management System in Shipboard Microgrid: A Review. Published in: *IEEE Systems Journal* (Volume: 16, Issue: 1, March 2022). Page(s): 578–590. DOI: 10.1109/JSYST.2020.3047673
3. Andrea Schiffauerova. A novel standalone hybrid renewable energy systems onboard conventional and autonomous tugboats. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131948>
4. Liyong Ma, Xuewei Liu, Yong Zhang, Shuli Jia. Visual target detection for energy consumption optimization of unmanned surface vehicle. *Energy Reports*. Volume 8, Supplement 4, July 2022, Pages 363–369. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.204>
5. Neeta Khare, Pritpal Singh. Modeling and optimization of a hybrid power system for an unmanned surface vehicle. *Journal of Power Sources*, Volume 198, 15 January 2012, Pages 368–377. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.09.080>
6. Charalampos Tsoumpris, Gerasimos Theotokatos. Performance and Reliability Monitoring of Ship Hybrid Power Plants. *Journal of ETA Maritime Science* 2022;10(1):29-38. DOI: 10.4274/jems.2022.82621
7. Lorenzo Balestra, Ingrid Schjøberg. Modelling and simulation of a zero-emission hybrid power plant for a domestic ferry. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 46, Issue 18, 11 March 2021, Pages 10924-10938. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.187>
8. Haojiao Liang; Huiping Li; Yang Shi; Daniela Constantinescu; Demin Xu, All Authors. Energy-Efficient Integrated Motion Planning and Control for Unmanned Surface Vessels. Published in: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* (Volume: 32, Issue: 1, January 2024). Page(s): 250–257. Date of Publication: 18 July 2023.
9. Dynamic Energy-Efficient Path Planning of Unmanned Surface Vehicle under Time-Varying Current and Wind. by Yifan Zhang, Guoyou Shi and Jiao Liu. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10(6), 759; <https://doi.org/10.3390/jmse10060759>
10. “Smart Energy Management System for Unmanned Surface Vehicles” – A Frontex Research Initiative. 2024-09-10. <https://www.frontex.europa.eu/innovation/eu-research/news-and-events/-smart-energy-management-system-for-unmanned-surface-vehicles-a-frontex-research-initiative-aqfXzC>
11. Pahl G., Beitz W., Feldhusen J., Grote K.H. (2007). *Engineering Design: A Systematic Approach*. Third Edition. Springer-Verlag London Limited, 2007. 294 Pages. file:///C:/Users/SLpro/Downloads/Engineering%20Design%20-%20Parte%201-2.pdf
12. Nikolaos Planakis, George Papalambrou. Ship energy management system development and experimental evaluation utilizing marine loading cycles based on machine learning techniques. *Applied Energy*. Volume 307, 1 February 2022, 118085. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118085>.

13. Marine SCADA Systems. <https://www.vtscada.com/marine-systems-overview/>
14. Yuxin Yang, Zheming Jin. (2020). Fault and safety protection of ship power station. IOP Conference Series Earth and Environmental Science. March 2020. 446(4):042056. DOI:10.1088/1755-1315/446/4/042056

Zbrutsky A.V., Nadtochiy A.V. AUTOMATION OF CONTROL OF THE HYBRID ELECTRIC POWER SYSTEM OF AN UNMANNED SURFACE VESSEL

Safe surface vessels are in line with the promising capabilities of marine robotics, which are actively developing. For such vessels, especially hybrid electrical power systems combining batteries and diesel generators play an important role. Such systems allow achieving high efficiency in energy consumption, while minimizing the negative impact on the core. Therefore, the development of automatic care systems with such systems is relevant to current applied scientific research.

Purpose. Analysis of the main operating modes of the hybrid electric power system of an unmanned surface vessel, which includes a storage battery and a diesel generator for a stationary jet, and the development of a warehouse and algorithmic security system for automatic heating of such a system.

Methodology. The methodology for analyzing scientific and technical literature and the principle of a systematic approach are discussed. The object of investigation is the process of functioning of the hybrid electric power system of an unmanned surface vessel. The subject of investigation is the design of the main operating modes of the robot of an unmanned surface vessel and the development of an automatic heating system based on the algorithm of the robot with a hybrid electric power system.

Results. Based on the systemic approach, a list of the main operating modes of the hybrid electric power system has been formed and the warehouse of the automatic heating system has been stored with it. The main storage systems of the energy system include software and technical components for the energy system, a system for collecting, processing, displaying and archiving information, as well as a system for ensuring the safety of the functioning of the energy system unmanned surface vessel. The software and technical features of the energy system will be at the warehouse, the operational selection subsystem of the energy source for the flow mode of the vessel's operation, the energy optimization subsystem of the hybrid energy system, Subsystems for charging batteries and subsystems for supplying peak current to the power system under extreme operating conditions of the vessel. A number of tasks have been broken down that can be implemented by the subsystems of the automatic heating system using a hybrid energy system.

Scientific novelty. The main warehouse systems of automatic storage with a hybrid power system and the many tasks that can be implemented by the subsystems of the automatic storage system with a hybrid power system create a scientific and methodological basis for engineering development of an automatic electrical power system as an important warehouse process for the creation of unmanned surface vessels.

Practical significance. The scientific results of the investigation will allow us to organize the process of conceptual design of an automatic caravan system with a hybrid electric power system for an unmanned surface vessel.

Key words: *unmanned surface vessel, automatic control system, hybrid electrical power system.*