

Голубєва С.М., Юрченко Є.М.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВАРІАНТІВ ПОБУДОВИ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИЛОВИХ УСТАНОВОК НА ВОДНОМУ ТРАНСПОРТІ

Метою статті є аналіз технологічних альтернатив для електричних суден та електричних рушійних систем у сфері водного транспорту. Мета роботи досягається шляхом виконання аналізу технологічних альтернатив для суден із застосуванням електричних силових установок. Наведена чітка класифікація технологічних альтернативних джерел енергії для експлуатації електричних суден. В якості таких альтернативних варіантів силових установок розглянуті були акумулятори, відновлювані джерела енергії, виробництво паливних елементів, а також електричні системи з виробництвом енергії від двигунів внутрішнього згоряння та акумуляторів. Огляд номенклатури існуючих і діючих суден дозволив виявити основні характеристики різних суден. Більшість комерційних суден, пропонує промисловістю, призначені для експлуатації в морі. Доведено, що у сучасних умовах впровадження невеликих електричних суден на судноплавних водних шляхах з відстанню між акумуляторною інфраструктурою понад 50 миль може бути важко реалізовуваним завданням. Силові установки, які повністю залежать від акумуляторів, складні в реалізації, оскільки автономність обмежена, а відстані між доками перевищують їх запас ходу. Деякі судноплавні водні шляхи розташовані в районах з ускладненим доступом до електроенергії через географічні умови. Основним науковим результатом, одержаним у статті, є висновок, що гібридна система при теперішньому рівні розвитку транспортної галузі й інфраструктури є найкращою технологічною альтернативою для електричних суден. Ця система підвищує ефективність за рахунок впровадження електричних силових установок та акумуляторів, зменшує викиди за рахунок використання відновлюваної енергії та підтримує автономію за рахунок використання викопних ресурсів. Дана альтернатива є короткостроковим рішенням енергетичного переходу у водному транспорті.

Ключові слова: енергоефективність, екологічність, електротранспорт, силова електроніка, морський та річковий транспорт, судові енергетичні установки, діагностування, ефективна потужність, передача потужності, судовий дизель.

Вступ. На долю морського та внутрішнього водного транспорту припадає приблизно 90% перевезень вантажів у світі [1]. Проте, використання судових рушіїв на викопному паливі призводить до виникнення екологічних проблем з викидами, які необхідно вирішувати [2]. Дані викиди спричиняють місцеве забруднення води та повітря [3], залежність від невідновлюваних ресурсів, в першу чергу, нафти [4, 5] та створюють бар'єр для енергетичного зеленого переходу [6].

Нові технології розповсюджуються на судна з електродвигунами, джерела енергії та системи накопичення енергії [7-9]. Впровадження даних систем призводить до значного скорочення викидів парникових газів та забруднення повітря порівняно з традиційними суднами, що застосовують двигуни внутрішнього згоряння [10]. Однак застосування електродвигунів пов'язане з низкою проблем, основними з яких є інфраструктура зарядки, обмежена автономність судна, початкова вартість, доступність технології життєвого циклу акумуляторів, вплив та доступність на виробництво електроенергії [11-13]. Крім того, перехід від традиційних систем до електричних технологій може передбачати значні інвестиції та необхідність навчання персоналу новим методам і технологіям. Занепокоєння також викликає питання належного поведіння з відпрацьованими

електричними елементами живлення, забезпечення їхньої переробки та мінімізації впливу на довкілля [14, 15].

Таким чином, необхідно дослідити переваги та недоліки різних технологічних альтернатив у електричних системах суднових пропульсивних комплексів.

Метою статті є аналіз технологічних альтернатив для електричних суден та електричних рушійних систем у сфері водного транспорту.

Аналіз літературних джерел. У роботах [16, 17] наведено порівняльний аналіз альтернативних суднових рушіїв. У статтях [9, 18, 19] досліджена низка електроенергетичних суднових систем, починаючи від систем з виключно акумуляторними батареями, до використання електродвигунів, гібридів з генерацією на викопному паливі. У роботах [20, 21] запропоновано використовувати на судах відновлювані джерела енергії (ВДЕ), а у роботах [22, 23] – паливні елементи (ПЕ). Низка дослідників розробляють технології електромобільності суден шляхом пошуку різних конфігурацій між джерелом живлення (акумулятори, ВДЕ, водень та гідрокарбід) й рушійною системою (електродвигуни та двигуни внутрішнього згоряння). В якості результату отримується порівняльна таблиця технологій, що демонструє переваги та недоліки підходів. Аналіз літературних джерел доводить, що існує значна кількість досліджень, пов'язаних з використанням новітніх електричних технологій на судноплавних водних шляхах і судах. Однак для електричних рушійних систем кількість публікацій є незначною, саме тому ці дослідження набувають важливого значення.

Огляд міжнародного досвіду та найкращих практик дозволив виявити закономірності та успішні стратегії впровадження електричних двигунів на річкових судах та судах прибережного плавання. Такі країни, як Норвегія [24], Нідерланди [25], Бразилія [26], Канада [27], США [28], Латвія, Естонія [8] та Китай [29], досягли прогресу в електрифікації. Їхній досвід пропонує цінні приклади вирішення конкретних проблем. Міжнародна співпраця та обмін знаннями можуть сприяти розвитку електромобільності в усьому світі

Існує незначний зв'язок із судноплавними внутрішніми водними шляхами і відсутній зв'язок з питаннями, пов'язаними зі скороченням викидів внаслідок використання викопного палива, що підтверджує актуальність мети статті.

Проведемо дослідження технологічних рішень для суден з електроприводом. На теперішній час існує лінійка суден з електроприводом. Наприклад, EELEX 8000 – це човен, який був розроблений і виготовлений у Швеції компанією Xshore (рис. 1).



Рисунок 1 – Загальний вигляд човна EELEX 8000
[Джерело – [24]]

Він має 100% електричну силову установку і корпус, побудований з матеріалів з низьким впливом на навколишнє середовище. EELEX 8000 представляє початок більш стійкої морської традиції, використовуючи електричну енергію від акумулятора на 126 кВт-год на додаток до електродвигуна потужністю 170 кВт. Він має мінімальний вуглецевий слід у порівнянні з двигунами на викопному паливі, допомагаючи боротися зі зміною клімату [24].

Інший приклад – човен Q30, який був виготовлений та спроектований у Фінляндії компанією Q-Yachts [29]. Він має 100% електричну силову установку з двох електродвигунів по 10 кВт кожен, літієву батарею на 30 кВт-год з можливістю додавання ще 10 кВт-год – загалом 40 кВт-год, використовує найсучасніші технології, а завдяки оптимізованому гідродинамічному корпусу є достатньо ефективним (рис. 2).

Даний ефект досягається завдяки інноваційній електричній силовій установці Hynova 40.



Рисунок 2 – Загальний вигляд човна Q30
[Джерело – [28]]

Інший варіант – судно Silent 60, яке спроектувала і виготовила в Австрії компанія Silent Yachts (рис. 3).



Рисунок 3 – Загальний вигляд судна Silent 60
[Джерело – [29]]

Судно має два електродвигуни потужністю 340 кВт, які дозволяють комфортно рухатися. Сонячно-електрична силова установка з сонячною системою потужністю Вт, дизель-генератором потужністю 148 кВт та літієвою батареєю ємністю 286 кВт-год забезпечує надійність та безпеку.

Судно Volt 180 було розроблене й виготовлене в Канаді компанією Vision Marine [27]. Воно складається зі 100% електричної силової установки та корпусу зі склопластику. Volt 180 використовує підвісний двигун потужністю 5 к.с. та має місткість 11 пасажирів, досягаючи швидкості 6 вузлів і дальності ходу 6,5 год, а також можливість встановлення літієвої батареї від 1 × 5 кВт-год до 3 × 5 кВт-год [27].

SAY 29E RUNABOUT був розроблений і виготовлений в Іспанії компанією Sayachting. Він має 100% електричну силову установку потужністю 170 кВт, літієву батарею на 126 кВт-год і корпус з вуглецевого волокна. SAY 29E використовує вбудований двигун, що дозволяє йому розвивати максимальну швидкість 50 вузлів, вміщує вісім пасажирів і має запас ходу 6,5 год [28].

Candela C-8 був розроблений і виготовлений у Швеції компанією Candela. Він має 100% електричну силову установку з електродвигуном потужністю 50 кВт і літій-іонною акумуляторною батареєю ємністю 45 кВт-год, а також корпус на підводних крилах. Він оснащений найсучаснішою сенсорною системою, яка автоматично регулює крила, щоб тримати човен рівним і стабільним [26].

Інший варіант – Soelcat 12, катамаран, розроблений і виготовлений компанією Premium Catamarans [26], орієнтований на «денний чартер», який працює виключно на електриці, генеруючи достатньо енергії за наявності сонячного світла, що дозволяє йому долати великі відстані. Весь дах являє собою велику сонячну батарею, що складається з 36 панелей, здатних виробляти майже 10 кВт для живлення двох двигунів потужністю 30 кВт і акумуляторної батареї ємністю 260 кВт-год [26].

У табл. 1 наведено порівняльний аналіз електричних суден.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз характеристик електричних (гібридних) суден
[Джерело – розроблено автором]

Назва	Пропульсивний комплекс	Довжина (м)	Ширина (м)	Максимальна швидкість (вуз.)	Крейсерська швидкість (вуз.)	Країна	Тип судна	Автоматична генерація
EELEX 8000	Батареї	8,00	2,50	30,0	20,0	Швейцарія	Морське	-
Q-Yachts	Батареї	9,30	2,20	15,0	9,0	Фінляндія	Морське	-
Hynova 40	Водневі паливні елементи	12,00	3,80	25,0	15,0	Франція	Морське	+
Silent 60	Гібрид	18,00	9,00	20,0	15,0	Австрія	Морське	+
Volt 180	Батареї	5,40	2,13	5,6	3,4	Канада	Морське/річкове	-
Say 29E	Батареї	8,86	2,76	52,0	40,0	Іспанія	Морське	-
Candela C-8	Батареї	8,50	2,45	30,0	25,0	Швейцарія	Морське	-

У літературних джерелах [15, 17, 21] визначено шість альтернатив, застосовних до суден у межах електромобільності, які використовують акумулятори, відновлювальну енергетику (ВДЕ), двигун на водневих паливних елементах (ВПЕ) та дизельні генератори. Ці системи утворені об'єднанням кількох компонентів, таких як двигун, вал силової передачі та гребний гвинт, які разом складають силову установку.

Інтеграція різних типів технологій робить системи більш економічними, універсальними, конкурентоспроможними та екологічними.

Розглянемо види силових установок.

1. Силова установка з акумуляторним живленням

Дана силова установка характеризується своєю рушійною потужністю [6], яка генерується електродвигуном, що отримує енергію для своєї роботи від акумуляторної батареї, яка заряджається системою підзарядки від джерела живлення на суші. Цей тип системи реалізований у невеликих суднах у зв'язку з низькою автономністю, оскільки вона на 100% залежить від заряду акумулятора. Збільшення кількості акумуляторів на борту судна збільшує автономність, але впливає на вантажопідйомність. Дана силова установка використовується на рибальських та прогулянкових суднах, наприклад, на озерах з невеликими підвісними електродвигунами (менше 1,1 кВт), невеликих пасажирських човнах та автомобільних поромках, оснащених літій-іонними батареями високої ємності. Акумуляторна система забезпечує набагато більшу автономність і більш тривалий термін служби, але все ще має обмеження, такі як вантажопідйомність і автономність. Таким чином,

дані системи рекомендуються в основному для невеликих човнів довжиною менше 24 м. Для інших типів суден рекомендується використання змішаних систем.

Системи накопичення енергії зазвичай розробляються з літій-іонними акумуляторами, де їх напруга в розімкненому колі може бути виражена як функція заряду. Залежно від ступеня їх заряду напруга холостого ходу в акумуляторах може змінюватися приблизно на 20%. Отже, електрична вхідна і вихідна потужність змінюється в залежності від ступеня заряду акумуляторів. Ємність акумулятора представлена в ампер-годинах, а стан заряду обчислюється шляхом вимірювання в режимі реального часу поточного значення кулонівським метром. Дані судна мають безшумні двигуни, не створюють вібрацій, оскільки для їх руху не використовуються коробки передач. Двигуни є екологічними.

2. Силова установка з відновлювальних джерел енергії

Дана силова установка характеризується наявністю електродвигуна, який отримує струм від відновлюваних джерел енергії, наприклад, фотопанелей або вітрогенератора, який зберігається в акумуляторній батареї [20]. Система може мати реалізоване допоміжне джерело на базі дизельного генератора або іншого типу генерації.

3. Силова установка генерації на водневих паливних елементах

Дана силова установка характеризується наявністю електродвигуна. Енергія надходить від водневого двигуна, в якому водень зазвичай використовується як паливо. Потім, за допомогою хімічного процесу, він виробляє енергію, яка використовується для живлення електродвигунів і допоміжних систем судна й одночасно зберігається в основній і вторинній акумуляторній системі для майбутнього використання. На річкових судах можуть використовуватися різні системи залежно від конкретного призначення судна та наявності портової інфраструктури. Найбільш поширеними є протонообмінні мембранні клітини (PEMFC), за ними йдуть розплавлені карбонатні паливні елементи (MCFC) і прямі метанольні паливні елементи (DMFC).

4. Електрична силова установка з виробленням енергії з двигунів внутрішнього згоряння та акумуляторних батарей (гібрид)

Система характеризується наявністю електродвигуна, який отримує енергію для своєї роботи від термоелектричних генераторів. Крім того, електрична енергія накопичується за допомогою акумуляторної батареї. До складу даної силової установки входять один або кілька генераторів внутрішнього згоряння, перетворювачі енергії (DC/DC–AC/DC–DC/AC), шини постійного струму, що забезпечують передачу електроенергії з меншими втратами, а також шини змінного струму для забезпечення живленням електродвигунів.

5. Електрична силова установка, що працює за рахунок генерації з двигунів внутрішнього згоряння без акумуляторних батарей

Робота цієї технології заснована на повністю електричній силовій установці. Вона отримує свою енергію за допомогою теплових генераторів з тією особливістю, що досягається баланс між генерацією та споживанням і не використовуються системи зберігання. Однак установка не має системи накопичення електричної енергії. Генерована електроенергія надходить на головні розподільні щити та розподіляється по всьому судну за допомогою проводки та перетворювачів енергії для правильної роботи силових двигунів та всіх навантажень. Оскільки електрична енергія зазвичай працює з постійною напругою та фіксованою частотою, швидкість силового двигуна регулюється приводом зі змінною швидкістю, який генерує відповідну частоту для досягнення необхідної швидкості. У порівнянні зі звичайними силовими установками, інтегрована архітектура електричних силових установок відкриває значні можливості з точки зору підвищення ефективності та конструкції корабля.

6. Гібридна силова установка з генерацією з двигунів внутрішнього згоряння

Гібридні силові установки поєднують механічну та електричну силові компоненти, що призводить до більш високої ефективності руху. Орієнтовно використання дизель-електричних силових установок дозволяє знизити витрату палива на 20% у порівнянні зі звичайними двигунами. У складі гібридних силових установок можна виділити два важливих елементів: по-перше, блок

генератора та енергетичний трансформатор, а по-друге, привід від електродвигуна і двигуна внутрішнього згоряння [4]. Дизельні генератори подають живлення на розподільні щити, які надсилають струм на трансформатори напруги, а потім на перетворювачі частоти. У цей блок зазвичай входять акумулятори, навіть якщо вони не виробляють енергію.

У момент початку руху дизельні двигуни виступають в ролі генераторів, виробляючи змінний струм, який буде подавати енергію на рушійні синхронні електродвигуни. Найважливішими деталями цього типу силових установок є частотні перетворювачі, оскільки вони адаптують струм до типу двигуна, уникаючи енергетичних втрат. Це дозволяє ефективно контролювати швидкість і обертовий момент. На даний час цей тип силової установки має систему силової електроніки, яка управляє хвостовим генератором. Таким чином, і дизельний двигун, і гребний гвинт синхронізуються на одній частоті. Значною перевагою цієї системи є саме поєднання двох двигунів. Електродвигун підтримує двигун внутрішнього згоряння при цьому останній підтримує свою оптимальну ефективність. Оскільки дизельний двигун буде працювати стабільно, то витрата палива значно знижується.

Переваги та недоліки відповідних технологій наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Переваги та недоліки аналізованих технологічних схем

№	Технологія	Переваги	Недоліки
1	Акумуляторні батареї	Відсутність забруднень в процесі експлуатації. Висока енергоефективність силової установки завдяки накопиченій енергії. Витримування перевантаження за рахунок системи зберігання енергії. Займають на судні менший об'єм, ніж в інших технологіях	Акумуляторні батареї мають значну вагу. Потрібна спеціалізована інфраструктура зарядки, а постачання силових установок орієнтоване на судна з низькими вимогами до потужності. Після закінчення терміну служби батарей їх необхідно утилізувати, що веде до екологічного навантаження на оточуюче середовище.
2	ВДЕ	Висока енергоефективність за рахунок самостійного вироблення енергії та її використання. Витримування перевантаження за рахунок системи зберігання енергії в акумуляторах.	Збільшення ваги судна. Працездатність системи залежить від умов навколишнього середовища та геопозиціонування судна. Системи самогенерації використовують палубний простір, особливо при самогенерації за допомогою фотоелектричних систем. Після закінчення терміну служби батарей їх необхідно утилізувати, що веде до екологічного навантаження на оточуюче середовище.
3	ВПЕ	Не утворює забруднень під час експлуатації. Витримування перевантаження за рахунок системи зберігання енергії. Якщо водень, який використовується як паливо, виробляється з відновлюваних джерел, то його вплив на	Видобуток водню з викопного палива створює більший вплив на навколишнє середовище, ніж видобуток дизельного палива або зрідженому природному газі (ЗПГ); однак це компенсується зменшенням викидів

		навколишнє середовище набагато нижчий, ніж у будь-якого викопного палива.	парникових газів. Зберігання водню на судах є одним з основних обмежень, оскільки це призводить до втрат, а для безпечного зберігання потрібні спеціалізовані контейнери. Для забезпечення потреб суден потрібна інфраструктура водневої заправки. Цей недолік передбачає не лише наявність джерел водню, а й наявність необхідної вантажної інфраструктури для його безпечного транспортування та/або безпечного зберігання в порту.
4	Двигуни внутрішнього згоряння з накопиченням енергії акумуляторними батареями.	Витримування перевантаження за рахунок системи зберігання енергії в акумуляторах. Забезпечення більшої автономності, ніж повністю електричні системи з самогенерацією або без неї. Можливість працювати як на дизельному паливі, так і на ЗПГ. Викиди парникових газів зменшуються при роботі на ЗПГ в порівнянні з тією ж системою, яка працює на дизельному паливі.	При використанні таких систем, як двигуни внутрішнього згоряння або турбіни для генерації, ефективність системи низька в порівнянні з паливними елементами або повністю електричними системами генерації з самогенерацією або без неї, а викиди парникових газів, що генеруються, високі. Завдяки використанню акумуляторних батарей об'єм, який займає система, більший, ніж у системи з прямою генерацією двигуном внутрішнього згоряння або турбіною. Для забезпечення потреб суден потрібна інфраструктура дозаправки. Цей недолік передбачає не тільки наявність джерел палива, але й те, що для його безпечного транспортування та зберігання в порту потрібна зарядна інфраструктура. Після закінчення терміну служби батарей їх необхідно утилізувати, що веде до екологічного навантаження на оточуюче середовище.
5	Двигуни внутрішнього згоряння без накопичення	Більша автономність навігації в порівнянні з повністю електричними системами з самогенерацією або без неї. Можливість працювати як на	При використанні таких систем, як двигуни внутрішнього згоряння або турбіни для генерації, енергетична

	енергії акумуляторними батареями	дизельному паливі, так і на ЗПГ. Викиди парникових газів зменшуються при роботі на ЗПГ в порівнянні з тією ж системою, яка працює на дизельному паливі.	ефективність системи низька в порівнянні з паливними елементами або повністю електричними системами генерації з самогенерацією або без неї, а викиди парникових газів, що генеруються, високі. Для забезпечення потреб суден потрібна інфраструктура дозаправки.
6	Гібридна силова установка	Постійна низька частота обертання дизельного двигуна в комбінованій силовій установці зменшує викиди забруднюючих газів і витрату палива. Універсальність між різними режимами роботи та гнучкість у використанні.	Для забезпечення потреб суден потрібна інфраструктура дозаправки. Це передбачає наявність доступних джерел палива та завантажувальної інфраструктури для їх безпечного транспортування та зберігання в порту.

[Джерело – узагальнено авторами]

Узагальнюючи дані, наведені у табл. 2, можна зробити висновок, що найкращою технологією в короткостроковій перспективі для досягнення енергетичного переходу в секторі річкового транспорту є гібридна система. Ця технологія може бути поєднана з існуючими системами, що підвищує ефективність енергетичної установки, зменшує викиди парникових газів і підтримує інфраструктуру в поєднанні з існуючими системами.

Висновки. У роботі наведено аналіз технологічних альтернатив для суден із застосуванням електричних силових установок. Наведені різні технологічні альтернативи джерел енергії для експлуатації суден. Альтернативними варіантами силових установок, які розглядалися в цій статті, були акумулятори, відновлювані джерела енергії, виробництво паливних елементів, а також електричні системи з виробництвом енергії від двигунів внутрішнього згоряння та акумуляторів. Огляд різних існуючих і діючих суден дозволив виявити основні характеристики різних суден. Більшість комерційних суден, пропонує промисловістю, призначені для експлуатації в морі. Впровадження невеликих електричних суден на судноплавних водних шляхах з відстанню між акумуляторною інфраструктурою понад 50 миль може бути складним завданням. Силкові установки, які повністю залежать від акумуляторів, складні в реалізації, оскільки автономність обмежена, а відстані між доками перевищують їх запас ходу. Деякі судноплавні водні шляхи розташовані в районах з ускладненим доступом до електроенергії через географічні умови.

Гібридна система є найкращою технологічною альтернативою для електросуден. Ця система підвищує ефективність за рахунок впровадження електричних силових установок і акумуляторів, зменшує викиди за рахунок використання відновлюваної енергії та підтримує автономію за рахунок використання викопних ресурсів. Дана альтернатива є короткостроковим рішенням енергетичного переходу у водному транспорті.

ЛІТЕРАТУРА

1. Rodrigue, J.P. *The Geography of Transport Systems*; Routledge: Oxfordshire, UK, 2020.
2. Kreps, B.H. The rising costs of fossil-fuel extraction: An energy crisis that will not go away. *Am. J. Econ. Sociol.* 2020, 79, 695–717.
3. Perera, F.; Nadeau, K. Climate Change, Fossil-Fuel Pollution, and Children's Health. *N. Engl. J. Med.* 2022, 386, 2303–2314.

4. Shang, Y.; Han, D.; Gozgor, G.; Mahalik, M.K.; Sahoo, B.K. The impact of climate policy uncertainty on renewable and non-renewable energy demand in the United States. *Renew. Energy* 2022, 197, 654–667.
5. Bigerna, S.; Micheli, S.; Polinori, P. Willingness to pay for electric boats in a protected area in Italy: A sustainable tourism perspective. *J. Clean. Prod.* 2019, 224, 603–613.
6. Kaśkosz, K. Analysis and Evaluation of Ferry Services in the Baltic Sea Region in the Context of Environmental Solutions. *Conf. Qual. Prod. Improv. CQPI* 2021, 3, 357–368.
7. Breucker, S.D.; De Breucker, S.; Peeters, E.; Driesen, J. Possible applications of plug-in hybrid electric ships. In Proceedings of the 2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium, Baltimore, MD, USA, 20–22 April 2009.
8. Traut, M.; Gilbert, P.; Walsh, C.; Bows, A.; Filippone, A.; Stansby, P.; Wood, R. Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes. *Appl. Energy* 2014, 113, 362–372.
9. Ihrfelt, F. Electric Leisure Boats: Enablers and Barriers: A Case Study of Leisure Boat Manufacturers. Ph.D. Thesis, KTH Royal Institute Of Technology, Stockholm, Sweden, 2023. [Google Scholar]
10. Medina, I.I.A.; Castillo, S.M.C.; Pasqualino, J.C.; Mendoza, C.D. Viabilidad de electromovilidad náutica en el distrito de Cartagena-Colombia. *Investig. Innov. Ing.* 2019, 7, 20–46. [Google Scholar] [CrossRef]
11. Janjevic, M.; Ndiaye, A.B. Inland waterways transport for city logistics: A review of experiences and the role of local public authorities. *Urban Transp. XX* 2014, 138, 279–290.
12. Ammar, N.R.; Almas, M.A.; Nahas, Q.H. Overview of the main benefits and challenges of different ship propulsion systems. *Int. J. Multidiscip. Curr. Res.* 2023, 11, 314–320.
13. Kifune, H.; Satou, M.; Oode, T. A Study on Battery System Design for Battery Ships Conforming to CHAdEMO. *Mar. Eng.* 2016, 51, 879–886.
14. Giraldo-Pérez, E.; Gaviria, G.; Betancur, E.; Osorio-Gómez, G.; Mejía-Gutiérrez, R. Influence of energy consumption on battery sizing of electric fluvial vessels: A Colombian Case Study. In Proceedings of the 2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monte Carlo, Monaco, 10–12 September 2020; pp. 1–8.
15. Geertsma, R.D.; Negenborn, R.R.; Visser, K.; Hopman, J.J. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments. *Appl. Energy* 2017, 194, 30–54.
16. Bennabi, N.; Charpentier, J.F.; Menana, H.; Billard, J.Y.; Genet, P. Hybrid Propulsion Systems for Small Ships: Context and Challenges. In Proceedings of the 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Lausanne, Switzerland, 4–7 September 2016.
17. Obaid, W.; Hamid, A.K.; Ghenai, C. Wind-Fuel-Cell-Solar Hybrid Electric Boat Power Design with MPPT System. In Proceedings of the 2019 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), Manama, Bahrain, 15–17 April 2019; pp. 1–5.
18. Madsen, R.T.; Klebanoff, L.E.; Caughlan, S.A.M.; Pratt, J.W.; Leach, T.S.; Appelgate, T.B.; Kelety, S.Z.; Wintervoll, H.C.; Haugom, G.P.; Teo, A.T.Y.; et al. Feasibility of the Zero-V: A zero-emissions hydrogen fuel-cell coastal research vessel. *Int. J. Hydrogen Energy* 2020, 45, 25328–25343.
19. Shakeri, N.; Zadeh, M.; Bremnes Nielsen, J. Hydrogen Fuel Cells for Ship Electric Propulsion: Moving Toward Greener Ships. *IEEE Electr. Mag.* 2020, 8, 27–43.
20. Xshore. Eelex 8000. 2022. Available online: <https://xshore.com/eelex-8000/> (accessed on 26 March 2023).
21. Rocha, C.H.; Silva, G.L.; Abreu, L.M.d. Analysis of the evolution of Brazilian ports' environmental performances. *Rev. Gest. Costeira Integr.* 2018, 18, 103–109.
22. Park, C.; Jeong, B.; Zhou, P.; Jang, H.; Kim, S.; Jeon, H.; Nam, D.; Rashedi, A. Live-Life cycle assessment of the electric propulsion ship using solar PV. *Appl. Energy* 2022, 309, 118477.
23. Hemez, C.; Chiu, J.; Ryan, E.C.; Sun, J.; Dubrow, R.; Pascucilla, M. Environmental and health impacts of electric service vessels in the recreational boating industry. *Water Pract. Technol.* 2020, 15, 781–796.

24. Електронний ресурс Q Yachts. 2017. Режим доступу: <https://q-yachts.com/> (доступ 24.01.2025).
25. Електронний ресурс Hynova. Hynova 40. 2022. Режим доступу: <https://www.hynova-yachts.fr/hynova-40/> (доступ 24.01.2025).
26. Електронний ресурс Silent. Silent 60. 2022. Режим доступу: <https://www.silent-yachts.com/es/silent-60/> (доступ 24.01.2025).
27. Електронний ресурс Vision—Marine Technologies. Volt 180 Electric Boat. 2021. Режим доступу: <https://visionmarinetechologies.com/volt-en/> (доступ 24.01.2025)..
28. Електронний ресурс INMEDIA. SAY E. 2023. Режим доступу: <https://www.seyachting.com/es/new-boats/say-29e-electric-silent-boat/> (доступ 24.01.2025).
29. Електронний ресурс Candela. Candela C-8. 2022. Available Режим доступу: <https://candela.com/candela-c-8/> (доступ 24.01.2025).

Golubeva S.M., Yurchenko Ye.M.

RESEARCH OF TECHNOLOGICAL OPTIONS FOR CONSTRUCTION OF ELECTRIC POWER PLANTS IN WATER TRANSPORT

The purpose of the article is to analyze technological alternatives for electric vessels and electric propulsion systems in the field of water transport. The purpose of the work is achieved by performing an analysis of technological alternatives for vessels using electric power plants. A clear classification of technological alternative energy sources for the operation of electric vessels is given. As such alternative options for power plants, batteries, renewable energy sources, fuel cell production, as well as electrical systems with energy production from internal combustion engines and batteries were considered. A review of the nomenclature of existing and operating vessels made it possible to identify the main characteristics of various vessels. Most commercial vessels offered by the industry are intended for operation at sea. It has been proven that in modern conditions, the implementation of small electric vessels on navigable waterways with a distance between battery infrastructure of more than 50 miles can be a difficult task to implement. Power plants that are completely dependent on batteries are difficult to implement, since autonomy is limited and distances between docks exceed their range. Some navigable waterways are located in areas with difficult access to electricity due to geographical conditions. The main scientific result obtained in the article is the conclusion that a hybrid system at the current level of development of the transport industry and infrastructure is the best technological alternative for electric vessels. This system increases efficiency by introducing electric power plants and batteries, reduces emissions by using renewable energy, and maintains autonomy by using fossil resources. This alternative is a short-term solution for the energy transition in water transport.

Keywords: *energy efficiency, environmental friendliness, electric transport, power electronics, marine and river transport, ship power plants, diagnostics, effective power, power transmission, marine diesel.*