

Яремчук С.О., Маслов І.З.

ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ НА СУДНІ: ФІЗИЧНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ ТА АНАЛІЗ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Вимоги Міжнародної морської організації (ІМО) щодо скорочення шкідливих викидів з суден протягом останніх років суттєво посилюються. У порівнянні з TIER I діючі вимоги TIER III є жорсткішими більш ніж у п'ять разів. Використання суднових фотоелектричних систем (photovoltaic systems, PVS) дозволить зменшити споживання палива, витрати, шкідливі викиди, та залежність від традиційних джерел енергії. Використання суднових PVS є затребуваним і перспективним напрямком, однак наразі їх впровадження залишається обмеженим. Судновласники та екіпажи морських суден не мають достатньої теоретичної і практичної підготовки щодо впровадження PVS в процес експлуатації на судах. Мета роботи – поглибити знання та підвищити фахові компетентності здобувачів вищої освіти у галузі морського транспорту щодо техніко-економічних характеристик суднових PVS шляхом проведення лабораторного дослідження, і аналізу інформації, отриманої з наукових джерел, та за допомогою системи штучного інтелекту ChatGPT. Встановлено теоретичні засади фізичного явища р-п переходу в основі фотодіодів, що застосовуються в PVS. Проведений фізичний експеримент з моделюванням вольт амперної характеристики діоду з р-п переходом. Визначено перелік суднових приладів різноманітної функціональності з використанням р-п переходу, місця встановлення PVS на судні, ККД, фактори впливу на ефективність, кількісні показники економії палива та викидів CO₂, термін повернення інвестицій, особливості та проблеми широкого впровадження, перелік рекомендацій ТО та ремонту, перелік чинників та кількісні показники зниження вартості PVS, актуальні напрямки розвитку. Розроблено багатоаспектну класифікаційну матрицю суднових PVS. За результатами роботи встановлено підвищення рівня фахових компетентностей здобувачів в області суднових PVS, сформовано практичні навички використання системи ChatGPT. Сонячна енергія наразі використовується для руху невеликих суден, і як допоміжне джерело енергії на великих судах для забезпечення освітлення, пристроїв зв'язку та навігаційної системи. Найбільш перспективний напрям розвитку – це гібридні рішення з кількох видів енергії для підвищення потужності СЕУ. Широкому впровадженню суднових PVS перешкоджають високі капітальні витрати, невисокий ККД, обмежена площа встановлення.

Ключові слова: сонячна енергія, р-п перехід, фотодіоди, сонячні панелі, фотоелектрична система, суднова енергетична установка, штучний інтелект, здобувачі освіти.

1. Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.

На даний час водний транспорт є одним із найважливіших видів транспорту для світової торгівлі. За оцінками експертів, на нього припадає приблизно 90% світової торгівлі. Галузь судноплавства стала одним із учасників глобальних викидів парникових газів (ПГ), які на даний момент становлять приблизно 3% від загального глобального обсягу[1]. Глобальна індустрія судноплавства стикається з величезним тиском щодо скорочення викидів ПГ, оскільки Міжнародна морська організація (ІМО) запровадила суворі правила щодо зменшення викидів ПГ із суден. Доповнення ІМО до Міжнародної конвенції щодо запобігання забрудненню з суден (MARPOL), стосовно викидів оксидів азоту (NO_x) і сірки (SO_x), значно впливають на експлуатацію суден протягом останніх років [2]. Порівняльний аналіз TIER I (2000 рік) та діючих вимоги TIER III (2016 рік) показав, що вимоги підвищились більше ніж в 5 разів (рис. 1).

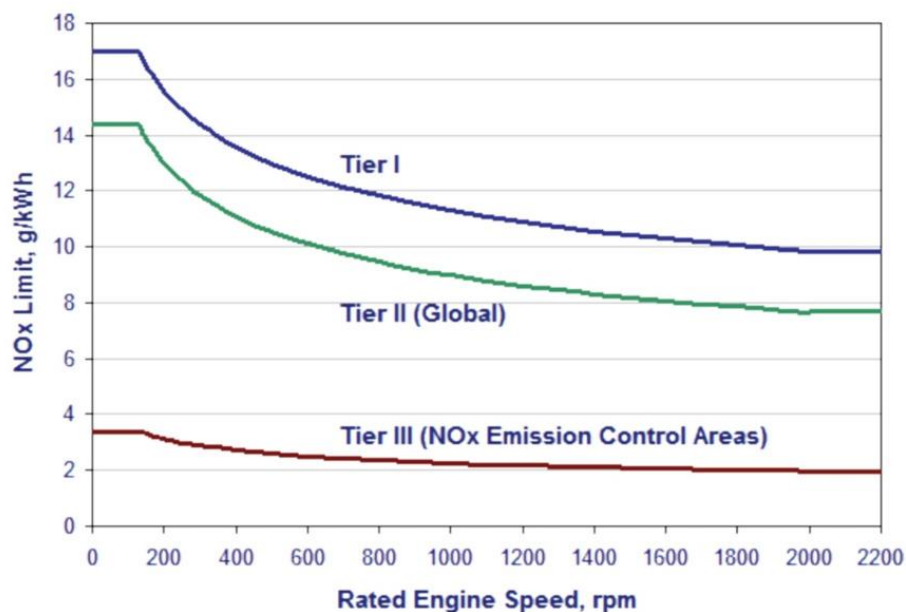


Рис. 1. Графіки обмежень викидів NOx у Додатку VI MARPOL

Енергія сонячного світлового випромінювання може стати прийнятним рішенням для екологічного морського судноплавства завдяки свої перевагам - цей ресурс є нескінченним, відновлюваним та екологічно чистим.

Одним із найпоширеніших застосувань сонячної енергетики є фотоелектричні системи (photovoltaic systems, PVS), які перетворюють сонячне світлове випромінювання на електричну чи теплову енергію. Завдяки використанню PVS на судах можливе зменшення споживання палива і залежності від традиційних джерел енергії, та скорочення ПГ з суден. Слід підкреслити, що PVS на судах все ще вважаються новітнім рішенням, і широко не використовуються. Більшість комерційних суден, в тому числі великі вантажні судна, танкери та пасажирські судна, наразі не застосовують PVS для своїх енергетичних потреб.

Необхідність зменшення ПГ є проблемою дуже актуальною, та потребує від судновласників більш активної роботи по встановленні PVS на судах для виконання посиленних вимог ІМО щодо викидів. У процесі дослідження виявлена суперечність, яка полягає в тому, що не зважаючи на те, що використання PVS на судах є затребуваним і перспективним напрямом для зменшення викидів з суден, однак впровадження PVS залишається обмеженим з причин, що судновласники та екіпажі морських суден не мають достатньої теоретичної і практичної підготовки щодо впровадження PVS в процес експлуатації на судах.

Проблему ми бачимо у розриві між невідкладною потребою встановлення PVS на судах, та незначним відсотком їх фактичного впровадження. На нашу думку, один із можливих шляхів подолання проблеми — це підвищення фахових компетентностей здобувачів вищої освіти у сфері морської інженерії шляхом здобуття більш ґрунтовних знань щодо судових PVS. Існує необхідність в проведенні дослідження, спрямованого на поглиблення знань та зростання свідомості здобувачів в галузі морського транспорту, а також екіпажів суден та судновласників, стосовно потенціалу судових PVS. Поглиблення знань можливе шляхом лабораторного дослідження здобувачами фізичного явища, що лежить в основі перетворення сонячної енергії на електричний струм, та аналітичного дослідження інформації з новітніх джерел щодо екологічних переваг, техніко-економічних характеристик та особливостей, класифікації, розробки рекомендацій з технічного обслуговування (ТО), проблем застосування та напрямів розвитку судових PVS. Такий підхід надає здобувачам можливість активно приймати участь у

дослідженні, а отримані знання сприятимуть зростанню свідомості майбутніх морських фахівців щодо переваг PVS, та поширенню використання на морському транспорті.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання даної проблеми, і на які спираються автори.

Для перетворення сонячної енергії на електричний струм PVS використовують фотодіоди з p - n переходом, який виникає в області контакту напівпровідників p - та n -типу всередині монокристала напівпровідника. В основі p - n переходу лежить фізичне явище домішкової провідності напівпровідників, докладно описане в навчальному посібнику [2].

Електропровідність напівпровідників може бути обумовлена як власними електронами атомів даної речовини (власна провідність), так і електронами домішкових атомів (домішкова провідність). Домішки діляться на донори та акцептори. Донори мають валентність більшу, ніж валентність основних атомів напівпровідника, і створюють електронну провідність (провідність n -типу) [2, с. 366]. Акцепторні домішки мають валентність на одиницю меншу, ніж атоми кристала напівпровідника, і створюють діркову провідність (провідність p -типу) [2, с. 368].

На границі контакту напівпровідників p - і n -типу виникає особлива область, що її називають p - n переходом. Потік основних носіїв струму через p - n перехід являє собою дифузійний струм I_{dif} . Одночасно з рухом основних носіїв через p - n перехід виникає рух неосновних носіїв (електрони із напівпровідника p -типу переходять в напівпровідник n -типу, а дірки переходять в протилежному напрямку). Потік неосновних носіїв через p - n перехід створює дрейфовий струм I_{dr} .

В роботі [3, с. 184] описані дифузійний струм I_{dif} , дрейфовий струм I_{dr} , та результуючий струм через p - n перехід. В умовах рівноваги результуючий струм дорівнює нулю $I = I_{dif} + I_{dr} = 0$. Зовнішня напруга, прикладена до p - n переходу, порушує цю рівновагу, результуючий струм у цьому випадку залежить від напрямку прикладеної напруги. Якщо до p - n переходу прикладена напруга U у напрямку, що збігається з контактною різницею потенціалів («+» прикладено до n -напівпровідника, «-» прикладено до p -напівпровідника – рис. 2, а), концентрація основних носіїв в області p - n переходу зменшується. Такий напрям прикладеної напруги має назву «запираючий». Це приводить до різкого зменшення дифузійного струму. При $I_{dif} \rightarrow 0$ через p - n перехід протікає тільки дрейфовий струм, який при кімнатній температурі дуже незначний, оскільки він обумовлений концентрацією неосновних носіїв струму.

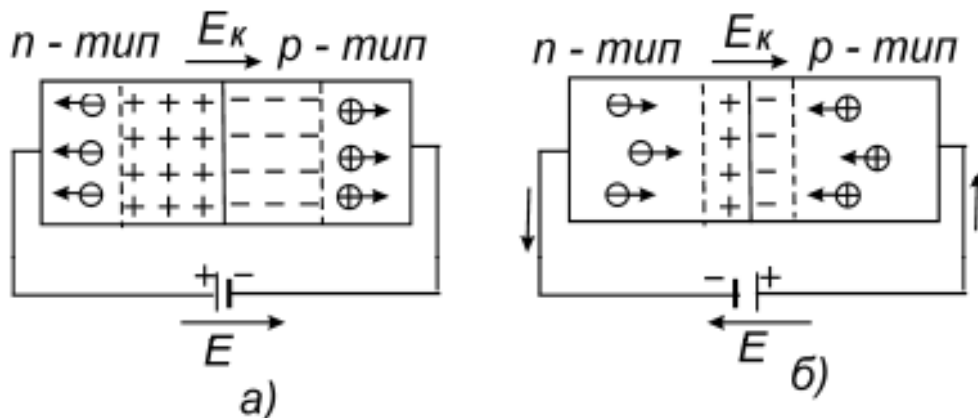


Рис. 2. Напрямок руху носіїв струму при зміні зовнішньої напруги, прикладеної до p - n переходу

Інша ситуація виникає, коли зовнішня напруга спрямована назустріч контактній різниці потенціалів (рис. 2, б). У цьому випадку концентрація основних носіїв струму в перехідному шарі зростає, і сила струму з ростом напруги буде зростати за експоненціальним законом. Залежність сили струму від прикладеної напруги через p - n перехід (вольт-амперна характеристика, ВАХ) описується формулою:

$$I = I_0 \exp (\pm eU / kT - 1) \quad (1)$$

де I_0 – значення, до якого наближається струм в запираючому напрямку при збільшенні (за абсолютною величиною) запираючої напруги. У запираючому напрямку в показнику експоненти слід вибирати знак “–” а в пропускну “+”. Таким чином, *p-n* перехід має односторонню провідність — в пропускну напрямку сила струму значно більша в порівнянні з запираючим напрямком.

Введення в чистий напівпровідник домішкових атомів дуже істотно впливає на електричні властивості напівпровідника. Так, наприклад, введення одного атома бору на 10^5 атомів силіцію збільшує провідність чистого силіцію в тисячі разів при кімнатній температурі [4, с. 346].

Фізичні явища, що виникають в умовах дії сильних електричних і магнітних полів на напівпровідники розглянуті в роботі [5]. Основні розрахункові формули зонної теорії твердих тіл та фізики напівпровідників приведені в роботі [6, с. 320]. *p-n* перехід лежить в основі будови багатьох сучасних напівпровідникових приладів для випрямлення і перетворення змінних струмів. Це стабілітрони, діоди та фотодіоди, фотоелементи, транзистори, будова яких докладно описана в [5]. Саме фотодіоди застосовують в суднових PVS, тому здобувачам необхідні ґрунтовні теоретичні знання явища *p-n* переходу, та його лабораторне дослідження.

Для автоматизації розрахунків експериментальних даних, та побудови вольт-амперної характеристики (BAX) *p-n* переходу, доцільно використати загальновідомий цифровий інструмент Google Sheets, завдяки ряду переваг цього безкоштовного табличного онлайн-редактора з потужними обчислювальними можливостями: таблиці з розрахунками автоматично зберігаються в хмарі та синхронізуються; до них можна отримати доступ з будь-якого місця з будь-якого пристрою і в будь-який час.

Крім фізичного експерименту, для розвитку фахових компетентностей здобувачам потрібна інформація з наукових джерел щодо новітніх застосувань PVS на судах світового флоту.

В роботі [1] автори розглядають досягнутий прогрес щодо інтеграції джерел сонячної енергії в судові енергетичні системи, починаючи від технічних принципів і закінчуючи подальшими розвитком. В цій роботі детально викладено основні робочі теорії нових джерел енергії, методи застосування, основні технології та приклади застосувань на судах. Сонячна енергія, як основне джерело енергії наразі використовується для руху невеликих суден, і як допоміжне джерело енергії на великих судах для забезпечення освітлення, пристроїв зв'язку та навігаційної системи. З огляду на невисоку щільність потужності сонячної енергії, дослідники вважають за необхідне комбінувати сонячну енергію, енергію вітру та паливні елементи, щоб покращити загальну вихідну потужність. На думку авторів, найбільш перспективний напрямок розвитку застосування нових джерел енергії на судні – це гібридні рішення з кількох видів енергії для підвищення потужності судової енергетичної установки (СЕУ). Гібридна суднова енергетична система заснована на традиційній судовій енергетичній системі, інтегрованої з двома або більше новими джерелами енергії, такими як сонячна енергія, енергія вітру та паливні елементи.

В роботі [7] автори розглядають основні компоненти судової PVS, та фактори впливу на її ефективність. Це наявність сонячного випромінювання в зонах експлуатації судна, достатні площі на судні для розміщення PVS, техніко-економічна ефективність системи, енергоефективність, витрати на паливо та інвестиційні витрати. В статті показаний план розміщення PVS на палубі невеликого контейнеровозу довжиною 123 м, дедвейт 6479 т, головний двигун 5400 кВт. В статті зроблено розрахунки техніко-економічних показників PVS з рухом судна між портами північної та західної Африки. Автори встановили, що для подачі 24 кВт електроенергії споживачам на борту, потрібно встановити 740 модулів SPV панелей на площі 1300 м². Освітлена зона палуби судна обмежується розмірами судна і вантажними потребами. Наявна площа палуби в модельному судні становить не більше 700 м², тому розрахунки зроблено для потужності 12 кВт. Сонячна енергія такої потужності може бути надійною альтернативою корабельному аварійному джерелу живлення для забезпечення

аварійного освітлення, приладів навігації, радіобладнання та системи сигналізації. Враховуючи 300 днів сонячного випромінювання в рік, економія може сягати 17 тон важкого палива і 172 тон CO₂. Крім екологічних переваг, економія витрат на паливо протягом року складатиме приблизно \$ 10.200. Враховуючи, що гарантійний термін PVS-модулів становить 25 років, батареї 5 років, інверторів та іншого обладнання мінімум 10 років, встановлено, що загальні інвестиції на PVS-модулі будуть повернуті протягом максимум 10 років. Однак потужність суднової PVS системи ще недостатня порівняно із загальною потребою енергії судна, і зниження витрат палива та викидів ПГ відповідно не є значним.

В роботі [8] автори встановили, що невеликі судна виключно на енергії сонця мають середні розміри 18,7 м × 6,3 м, з площею PVS-панелей близько 84,5 м² з номінальною потужністю 16,6 кВт і ємністю акумулятора 197 кВт-год. Доведено, що використання сонячної енергії на великих судах зменшує споживання палива до 8 т/добу, зменшує викиди з потенційним скороченням CO₂ до 12%, а також в глобальному масштабі зменшує витрати на паливо близько 5 млн. доларів/рік, або 100 млн. доларів за 20 років роботи. Проблеми полягають в технічних та економічних аспектах: існує потреба в сонячних батареях з високою ефективністю перетворення та широкомасштабним додатком зберігання, та більш високі капітальні витрати, ніж традиційна генерація енергії на судах. Нечасті приклади використання сонячної енергії на великих судах пояснюються також недостатньою площею поверхні на судні для розміщення PVS-панелей. Загалом будь-яка альтернативна енергія може бути включена в суднову енергетичну систему. Інтеграція системи генерації енергії з нових джерел з існуючими судновими енергосистемами є перспективним рішенням для підвищення енергоефективності, надійності електромереж та якості електроенергії на борту, і буде в центрі уваги майбутніх досліджень.

В роботі [9] автори зазначають, що через обмеження ефективності перетворення сонячної енергії, для суден, які мають відносно великі потреби в електроенергії та обмежену площу установки PVS-панелей, сонячну енергію потрібно поєднувати з дизельним двигуном або іншими джерелами енергії. Автори розробили гібридну енергетичну систему, що складається з сонячної енергії, дизель-генераторів, акумуляторів, інверторів, системи керування батареями і системи управління енергією, заснованої на енергетичній системі судна «COSCO Tengfei». Це судно має загальну довжину 182,80 м, ширину 32,20 м, глибину 14,95 м, осадку 9,40 м, швидкість 20 вузлів і дальність руху 20 000 миль. Це океанське судно, призначене для перевезення 5000 транспортних засобів, стало першим у світі великомасштабним вантажним судном, яке використовує сонячну енергію, а також має найбільшу у світі площу панелей великомасштабної PVS (пікова потужність 143 кВт).

В роботі [10] автори аналізують технічні аспекти PVS-панелей, переваги, недоліки, вартість та проблеми встановлення на судні. Найбільш технологічним рішенням у суднобудуванні вважається використання суднових комбінованих систем з поєднанням вітрогенераторів та PVS. В цьому випадку функціональні можливості системи можуть бути суттєво розширеними.

В роботі [11] автори розглядають принципи встановлення, ТО та ремонту PVS, типи пошкоджень та термін служби. Широке використання PVS у складі СЕУ має великі перспективи, оскільки забезпечує мінімізацію трудових ресурсів для обслуговування, фінансових витрат на паливо, та значне зниження забруднення повітряних та водних сфер. На даний час існує стійка тенденція до поширення застосування PVS на флоті. Однак наразі технологічний рівень не дозволяє PVS створити альтернативу традиційним джерелам енергії. PVS найближчим часом не зможуть скласти конкуренцію традиційним джерелам енергії навіть у окремих нішах судноплавства. Основними недоліками PVS слід визнати велику вартість та не завжди високу продуктивність. Разом із вдосконаленням технологій компанії – виробники мають вирішувати проблеми витоку токсичних речовин при пошкодженні PVS, та їх утилізації після закінчення терміну експлуатації.

Аналіз робіт [1, 7-11] показав, що в останні роки дослідники в усьому світі провели велику кількість досліджень PV систем, в тому числі використання систем на комерційних судах на північно-західному маршруті Чорноморського басейну. Ці результати показують, що для генерації більшої потужності на різних широтах і кліматичних умовах потрібна гнучка система регулювання оптимального куту нахилу PVS-панелей.

Після огляду наукових робіт нерозглянутими залишилися питання щодо типів та видів PVS, коефіцієнта корисної дії (ККД), особливостей, переваг, проблем встановлення та ТО, кількісних показників вартості, ефективності інвестицій та напрямів розвитку PVS-панелей. Для динамічного та ефективного пошуку актуальної інформації щодо суднових PVS здобувачам було запропоновано використати ChatGPT - системи штучного інтелекту (ШІ), яка базується на алгоритмах глибокого навчання [12]. В процесі уточнення запиту якість відповіді покращується, тому система здатна стати дієвим, швидким та ефективним помічником. Однак існує застереження - використання ChatGPT як єдиного джерела інформації в академічних умовах не рекомендується, а отриману інформацію слід перевіряти на основі більш достовірних джерел. З урахуванням застережень, можливостей ChatGPT цілком достатньо для отримання потрібної інформації. На наш погляд, для здобувачів немає кращого способу освоїти сучасний інструмент ШІ, ніж почати працювати з ним під час фахової підготовки.

Таким чином, розв'язання проблеми, що полягає у розриві між невідкладною потребою встановлення PVS на судах, та невеликим відсотком їх реального застосування, є актуальною крос-дисциплінарною задачею при підготовці фахівців сфери морської інженерії, та обумовлює мету та завдання роботи.

Мета роботи – поглибити знання та підвищити фахові компетентності здобувачів освіти у галузі морського транспорту щодо техніко-економічних характеристик суднових PVS шляхом проведення лабораторного дослідження, аналізу інформації з наукових джерел, та інформації, отриманої за допомогою ChatGPT. Для досягнення мети роботи необхідно виконати наступні завдання:

1. Провести фізичний експеримент, побудувати та аналізувати ВАХ $p-n$ переходу в фотодіодах, які застосовуються в суднових PVS;
2. За допомогою ChatGPT отримати інформацію щодо характеристик, та потенціалу суднових PVS;
3. Виконати аналіз інформації, розробити багатоаспектну класифікацію та перелік рекомендацій з технічного обслуговування суднових PVS;
4. Визначити техніко-економічні особливості, проблеми та напрями розвитку суднових PVS-панелей.

3. Основний матеріал.

Лабораторне дослідження було виконано курсантами Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія» під керівництвом викладачів на заняттях з фахових дисциплін та факультативних заняттях з науково-дослідної роботи курсантів. Фізичний експеримент був проведений в лабораторії фізики з використанням лабораторної установки, схема якої зображена на рис. 3.

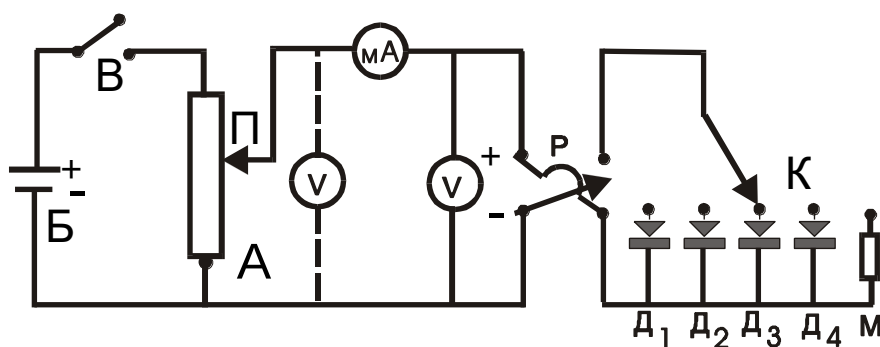


Рис. 3. Схема експериментальної лабораторної установки:

Б - джерело постійної напруги, В – вимикач, П – дільник напруги для плавного регулювання напруги, V- високоомний вольтметр, мА– міліамперметр, Р – двох полюсний перемикач для зміни напрямку струму, К – комутатор для увімкнення в ділянку одного з діодів р-п переходом Д чи металевого опору М

Лабораторний експеримент був проведений за наступною методикою:

Крок 1. Здобувачі визначили верхню межу інтервалу напруги у пропусковому напрямку, та поділили інтервал напруги $[0, U_m^{пр}]$ на п'ять значень.

Крок 2. Здобувачі визначили верхню межу інтервалу напруги у запираючому напрямку, та поділили інтервал напруги $[0, U_m^{зап}]$ на п'ять значень.

Крок 3. Для цих значень напруги здобувачі виміряли відповідні значення струмів в пропусковому та в запираючому напрямках для діода з р-п переходом (рис. 4). Результати вимірів занесли в таблицю, представлену на рис.5.



Рис. 4. Курсанти Дунайського інституту НУ «Одеська морська академія» під час виконання фізичного експерименту

Крок 4. Комутатором К здобувачі перемкнули ділянку на металевий опір М, та виміряли відповідні значень струму спочатку в пропусковому, а потім у запираючому напрямках для металу. Результати вимірів занесли в таблицю на рис.5.

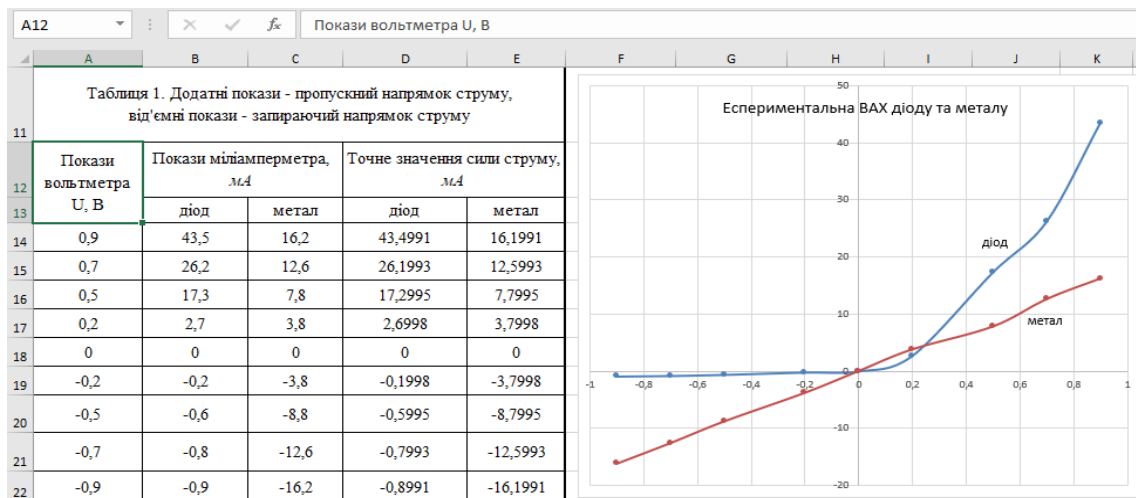


Рис. 5. Таблиця даних з розрахунками та експериментальні графіки ВАХ діоду з р-п переходом та металу, побудовані здобувачами в Google Sheets

Крок 5. Здобувачі виконали розрахунки за допомогою Google Sheets. За отриманими значеннями сили струму та напруги здобувачі побудували експериментальні графіки ВАХ діоду з p - n переходом і металу (рис. 5), вважаючи пропускний напрямок додатнім за абсцисою, а запираючий напрямок від'ємним.

Аналіз графіків показав суттєве збільшення електропровідності діоду з p - n переходом в порівнянні з металом у пропускному напрямі, та доцільність застосування p - n переходу в фотодіодах PVS-панелей.

Наступним кроком дослідження було завдання здобувачам отримати інформацію щодо застосування PVS за допомогою ChatGPT. На цьому етапі дослідження здобувачі зареєструвались на ресурсі [12], та в процесі спілкування з ІІІ отримали нову інформацію, яка була перевірена на основі навчальних посібників [2-6], наукових джерел [1, 7-11] та визнана достовірною. Результати загального обговорення та аналізу інформації показали, що елементи з p - n переходом використовуються у складі суднових приладів різноманітної функціональності, зображених в діаграмі на рис. 6.

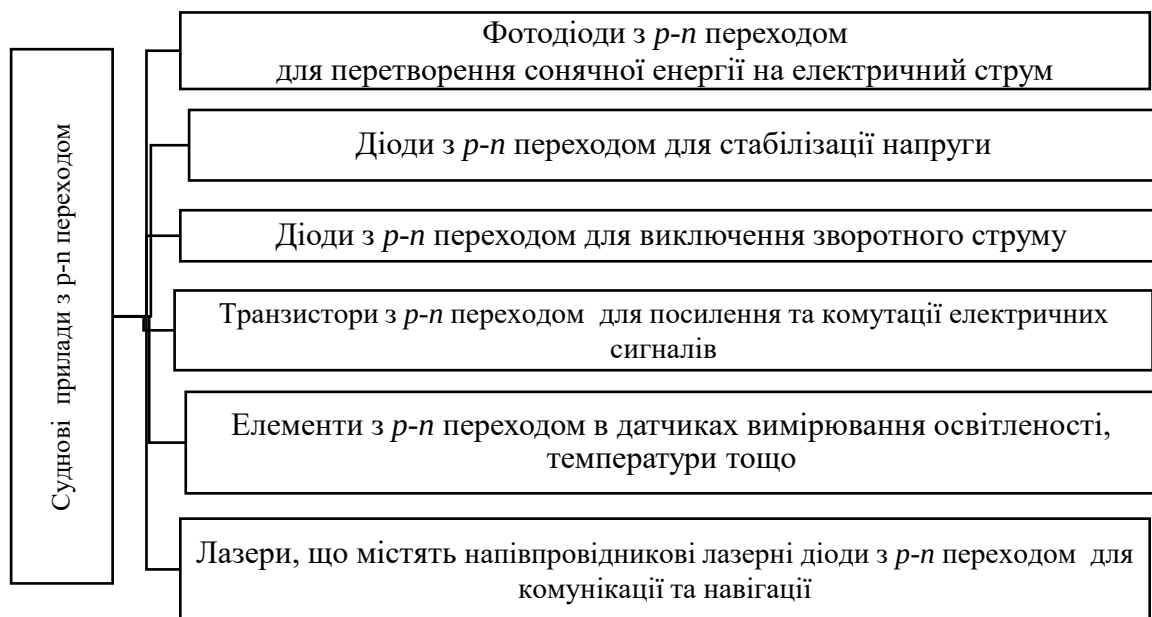


Рис.6. Діаграма суднових приладів з p - n переходом

Встановлені основні техніко-економічні характеристики суднових PVS-панелей. ККД панелей з кремнієвих фотодіодів зазвичай коливається в межах від 15% до 20%. В PVS-панелях, що використовують фотодіоди з арсеніду галію (GaAs), ККД може досягати 20% - 25%. Нові дослідження вказують на досягнення ККД > 25% для певних типів фотодіодів. В суднових PVS-панелях використовуються кристалічні силіконові монокристалічні (Monocrystalline Silicon, Mono-Si) або полікристалічні (Polycrystalline Silicon, Poly-Si) фотодіоди завдяки їх ефективності та довговічності. Місця встановлення PVS залежать від конструкції судна, розміру панелей, потреб в енергії та ергономіки судна. Це може бути палуба, надбудова, борт судна, мачта. Аналіз дозволив виділити характерні особливості суднових PVS, методи та засоби їх забезпечення, зображені в діаграмі на рис. 7.

За результатами аналізу встановлені проблеми використання суднових PVS:

- Забруднення. Панелі можуть забруднюватися внаслідок накопичення солі, пилу, пташиного посліду тощо, що призводить до зниження ефективності панелей;
- Корозія. Морська вода та повітря містять велику кількість солей, які спричиняють корозію металевих частин, електричні контактів, рам, кріплень;
- Механічні пошкодження. Удари, поштовхи, хвилі або падіння предметів на поверхню панелей може призвести до тріщини, ламання частин або пошкодження панелей, та зниження їх функціональності;

• Тіньові ефекти. На морських суднах можуть бути присутні об'єкти, які створюють тінь, що знижує вироблення електроенергії;

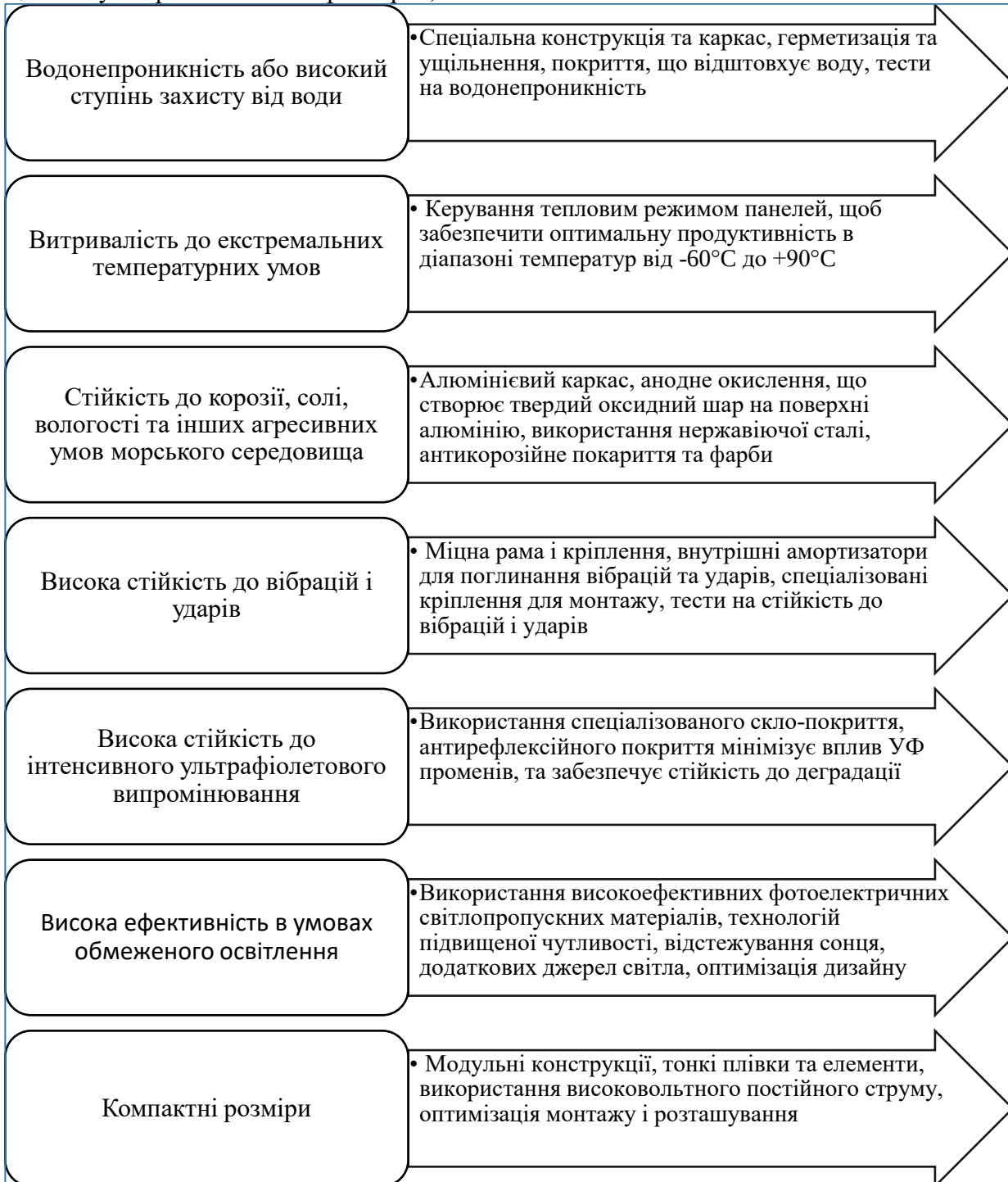


Рис. 7. Діаграма особливостей суднових PVS, методів та засобів їх забезпечення

• Втрати продуктивності внаслідок зношення. Вплив солі, води і ультрафіолетове випромінювання прискорює процес старіння панелей, та впливає на їх довговічність та продуктивність;

• Висока вартість. PVS можуть бути відносно дорогими, особливо якщо вони спеціально виготовлені для використання на морських суднах з урахуванням специфічних вимог та норм безпеки.

За результатами аналізу було розроблено багатоаспектну класифікаційну матрицю суднових PVS, представлену в табл. 1.

Таблиця 1. Класифікаційна матриця суднових PVS

Ознака класифікації	Типи та види
1. Потужність PVS	PVS з низькою потужністю використовуються для живлення невеликих електричних пристроїв або бортових систем
	PVS з високою потужністю використовуються для живлення електромоторів, систем кондиціонування повітря та інших потужних систем
2. Ефективність PVS	Висока ефективність з високим ККД $> 25\%$
	Середня ефективність з помірним $15\% < \text{ККД} < 25\%$
	Низька ефективність з низьким ККД $< 15\%$
2. Тип PVS-панелей	Монокристалічні. Виготовлені з одного кристалу кремнію, відрізняються високою ККД і ефективністю при низькій освітленості
	Полікристалічні. Виготовлені з кількох кристалів кремнію, що мають нерегулярну структуру. Вони менш ефективні, але мають нижчу вартість
	Тонкі плівкові. Виготовлені з тонких шарів напівпровідників, таких як аморфний кремній або кадмієвий телуридовий, і мають гнучку структуру
4. Місце розташування PVS-панелей	Розміщуються на верхньому покритті судна, що забезпечує максимальну експозицію до сонячного світла
	Розміщуються на бортах судна, це вигідно для суден, які часто мають бокове розташування до сонця
5. Вбудована інтеграція PVS-панелей	Структурна інтеграція. PVS є частиною структури судна, палуби або покриття. Вони виконують функцію не тільки зарядки акумуляторів та/або живлення електричних систем, але й фізично підсилюють частину судна
	Віконна інтеграція. PVS розташовуються на ілюмінаторах судна, дозволяючи одночасно фільтрувати світло та генерувати електроенергію
6. Зовнішня інтеграція PVS-панелей	Додаткове обладнання: PVS встановлюються як додаткове обладнання на зовнішній частині судна на кронштейнах. Вони не є частиною структури судна, однак забезпечують додатковий джерело енергії
	Плаваючі панелі. PVS розташовуються на спеціальних плавучих платформах або структурах, які плавають у воді біля судна. Вони пов'язані з судном за допомогою кабелів для передачі згенерованої електроенергії
7. Монтажна система PVS-панелей	Фіксовані панелі, що закріплюються на судні у фіксованому положенні
	Рухомі панелі з системою відстеження положення сонця
8. Матеріал каркасу PVS-панелей	Алюмінієвий каркас
	Каркас з нержавіючої сталі
	Каркас з композитних матеріалів

По результатам аналізу сформовано перелік рекомендацій щодо технічного обслуговування (ТО) та ремонту суднових PVS:

1. Щоденна перевірка. Необхідно регулярно перевіряти стан PVS, виявляти пошкодження, забруднення, відновлювати оптимальну експозицію до сонячного світла;

2. Перевірка кабелів і з'єднань. Необхідно перевіряти кабелі та з'єднання між панелями, контролером заряду та акумуляторами, і переконатися, що всі з'єднання щільні, немає корозії або ослаблення затяжки;

3. Моніторинг продуктивності. Необхідно слідкувати за продуктивністю PVS за допомогою моніторингової системи, та швидко виявляти проблеми або несправності;

4. Ремонт та заміна. В разі виявлення пошкоджень або несправностей слід діяти відповідно до рекомендацій виробника. Це може включати ремонт або заміну пошкоджених частин, таких як фотодіоди, кабелі, з'єднання тощо;

5. Регулярний сервіс. Залежно від вимог виробника та експлуатаційних умов, рекомендується проводити регулярний сервіс PVS на судні. Це може включати ТО, перевірку та налаштування системи;

6. Безпека. Необхідно пам'ятати про безпеку при ТО та ремонті PVS на судні, виконувати необхідні заходи безпеки, включаючи відключення електроживлення, якщо це необхідно, і застосовувати засоби захисту від ураження електричним струмом.

За результатами аналізу встановлено залежність вартості PVS від кількох ключових чинників: потужність, тип панелі, розмір та кількість панелей, виробник, необхідність додаткового обладнання, регіональні фактори. Залежність вартості від регіону може бути пов'язано з рівнем конкуренції на ринку, доступністю субсидій або безподаткових кредитів, витратами на транспортування тощо. Аналіз показав суттєве зниження вартості PVS за останні десять років завдяки факторам, показаним в діаграмі на рис. 8.

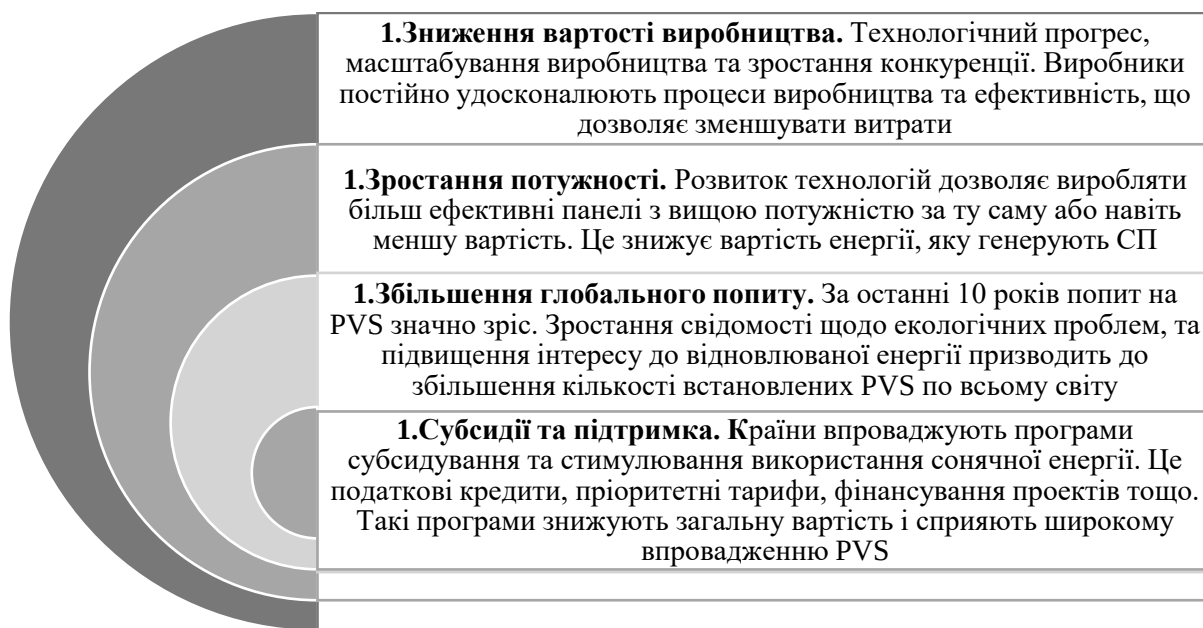


Рис. 8. Діаграма факторів зниження вартості PVS

Один з прикладів зниження вартості PVS демонструє продукт Tesla Solar Roof. У 2017 році компанія Tesla оцінила вартість Solar Roof на рівні \$21,85 за квадратний фут. У 2021 році завдяки оптимізації виробництва та впровадженню нових технологій компанія знизила вартість Solar Roof до \$8,50 тобто за чотири роки розвитку вартість зменшилась в 2,57 раз.

Компанії, які займаються дослідженнями в області суднових PVS, компанії-виробники, та компанії, що спеціалізуються на морських технологіях та енергетиці, об'єднуються з метою збільшення фінансування нових розробок.

Це компанії Норвегії, Нідерландів, Японії, США, Німеччини, де технологія PVS широко використовується, та отримує підтримку з боку уряду та приватних інвестицій. Актуальні напрямки розвитку суднових PVS зображені в діаграмі на рис. 9.

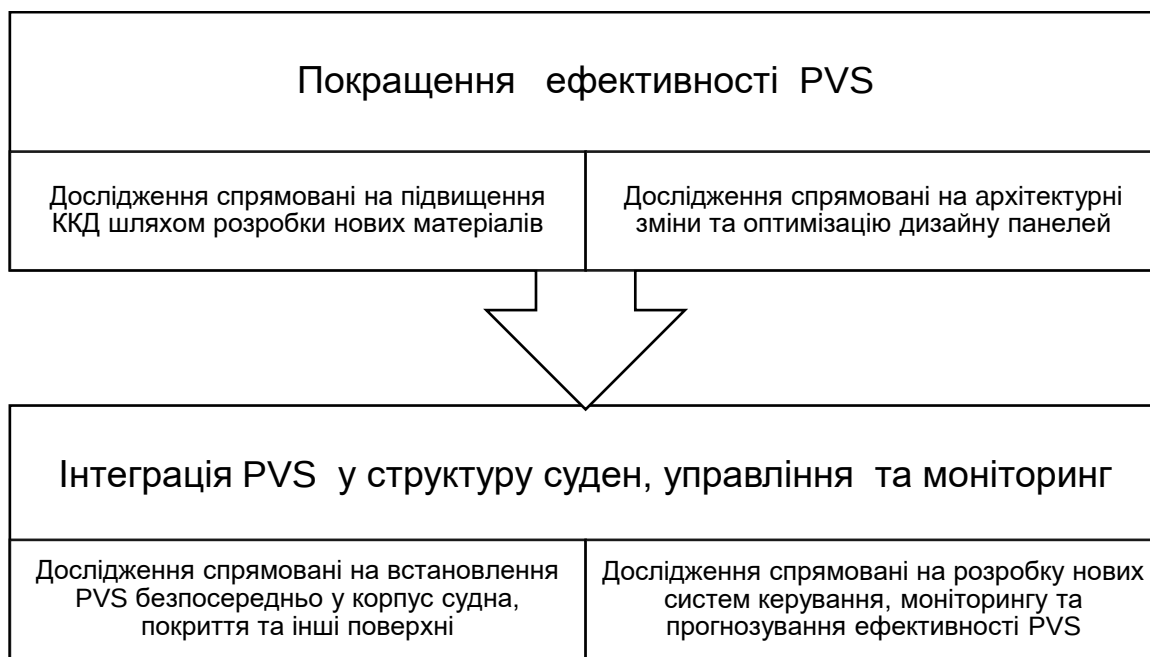


Рис. 9. Діаграма напрямів розвитку суднових PVS

За результатами тестування знань здобувачів з теми суднових PVS, проведеного після лабораторного та аналітичного дослідження, було встановлено підвищення:

- 1) абсолютної успішності (відношення кількості здобувачів, що успішно виконали тестові завдання за темою, до загальної кількості здобувачів) на 17%;
- 2) якості навчання (відношення кількості здобувачів з оцінкою «добре» та «відмінно» до загальної кількості здобувачів) на 13,8%.

Висновки. Проведений аналіз дозволив визначити теоретичні засади фізичного явища *p-n* переходу в основі фотодіодів, що застосовуються в PVS. Проведений фізичний експеримент з моделюванням ВАХ діоду з *p-n* переходом. Проведено аналіз інформації з наукових джерел та інформації, отриманої за допомогою ChatGPT та визначено:

- Перелік суднових приладів різноманітної функціональності з використанням *p-n* переходу, ККД PVS на кремнієвих фотодіодах та фотодіодах з арсеніду галію, місця встановлення PVS на судні;
- Фактори впливу на ефективність суднових PVS, кількісні показники економії палива та викидів CO₂, термін повернення інвестицій;
- Проблеми: невисокі ефективність перетворення та потужності зберігання, високі капітальні витрати, недостатня площа поверхні на судні для встановлення PVS-панелей;
- Особливості та проблеми використання PVS, перелік рекомендацій для ТО та ремонту суднових PVS;
- Перелік чинників та кількісні показники зниження вартості суднових PVS, актуальні напрямки розвитку суднових PVS.

Розроблено багатоаспектну класифікаційну матрицю суднових PVS. Норвегія, Нідерланди, Японія та США виокремлені як країни, де технології PVS стрімко розвиваються завдяки підтримці з боку уряду та приватних компаній.

Сонячна енергія, як основне джерело енергії наразі використовується для руху невеликих суден, і як допоміжне джерело енергії на великих суднах для забезпечення освітлення, пристроїв зв'язку та навігаційної системи. Найбільш перспективний напрямок розвитку

застосування нових джерел енергії на судні – це гібридні рішення з кількох видів енергії для підвищення потужності СЕУ. Наведений приклад гібридної СЕУ на судні «COSCO Tengfei», що складається з PVS, дизель-генераторів, акумуляторів, інверторів, системи керування батареями, та системи управління енергією.

Використання сонячної енергії на великих суднах зменшує споживання палива до 8 т/добу, зменшує викиди з потенційним скороченням CO₂ до 12%, а також в глобальному масштабі зменшує витрати на паливо близько 5 млн. доларів/рік, або 100 млн. доларів за 20 років роботи.

За результатами тестування знань здобувачів з теми судових PVS було встановлено підвищення рівня знань та фахових компетентностей. Під час роботи з ChatGPT у здобувачів сформовано практичні навички використання систем ШІ, та визначені його переваги та недоліки, які свідчать про неможливість використання без контролю людини в складних соціотехнічних системах.

В роботі застосований крос-дисциплінарний підхід, який поєднує теоретичні знання та практичні навички в області фізики, фахових дисциплін морської інженерії, інформаційних технологій, та системного аналізу. Подальша робота буде спрямована на дослідження та апробацію робіт в напрямку розробки системи моніторингу та прогнозування ефективності PVS.

ЛІТЕРАТУРА

1. P. Pan, Y. Sun, C. Yuan, X. Yan, and X. Tang, “Research progress on ship power systems integrated with new energy sources: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 144, April 2021, 111048, doi: 10.1016/j.rser.2021.111048.
2. Emission Standards. IMO Marine Engine Regulations. URL: <https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php> (дата звернення 01.10.2023)
3. Михайленко В.І., Білоус В.М., Поповський Ю.М. Загальна фізика: Навчальний посібник. – Друге видання, перероблене та доповнене – Одеса: ВидавІнформ ОНМА, 2012. – 475 с.
4. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: У 3 т.: навч. посіб. для студ. вищ. техн. і пед. закл. освіти. Т. 2. Електрика і магнетизм. / За ред. І.М. Кучерука. – К.: Техніка, 2001. – 452 с.
5. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: У 3 т.: навч. посіб. для студ. вищ. техн. і пед. закл. освіти. Т. 3. Оптика. Квантова фізика. / За ред. І.М. Кучерука. – К.: Техніка, 1999. – 520 с.
6. Фізика напівпровідників. (Частина I) [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка» / В. І. Ільченко, Т. Ю. Обухова.; КПІ ім. Ігоря Сікорського – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020.– 26 с. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/37599/1/Fizyka_napivprovidnykiv-1.pdf
7. A. Aijjou, L. Bahatti, and A. Raihani. Influence of Solar Energy on Ship Energy Efficiency: Feeder Container Vessel as Example. *International Journal of Electrical Energy*, Vol. 7, No. 1, 2019, p. 21-25. doi: 10.18178/ijoe.7.1.21-25
8. Tuswan Tuswan1, Saefulloh Misbahudin, Sony Junianto and others. Current research outlook on solar-assisted new energy ships: representative applications and fuel & GHG emission benefits. *The 3rd Maritime Safety International Conference (MASTIC) 2022. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 1081 (2022) 012011. doi:10.1088/1755-1315/1081/1/012011
9. Y. Yuan, J. Wang, X. Yan, Q. Li, and T. Long, “A design and experimental investigation of a large-scale solar energy/diesel generator powered hybrid ship,” *Energy*, vol. 165, pp. 965–978, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.09.085.
10. Яремчук С. О., Григорович Н. Р. Аналіз техніко-економічних аспектів застосування сонячних панелей на судні. Сучасні підходи до високоефективного використання

засобів транспорту : матеріали XIII Міжн. наук.-практ. конф. Ізмаїл, 8-9 грудня 2022 р. – Запоріжжя : АА ТанDEM, 2022. С. 172-176. DOI: 10.13140/RG.2.2.16687.41120

11. Григорович Н. Р. Технічні аспекти обслуговування та ремонту сонячних панелей на судні. Інноваційні підходи до розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення: матеріали VII Міжн.наук.-практ. конф. Ізмаїл, 21-22 квітня 2023р. - Запоріжжя: АА ТанDEM, 2023. С.111-115.

12. Welcome to ChatGPT. URL: <https://chat.openai.com/> (дата звернення 01.10.2023)

REFERENCES

1. P. Pan, Y. Sun, C. Yuan, X. Yan, and X. Tang, "Research progress on ship power systems integrated with new energy sources: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 144, April 2021, 111048, doi: 10.1016/j.rser.2021.111048 [in English].

2. Emission Standards. IMO Marine Engine Regulations (2023). Retrieved from: <https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php> [in English].

3. Mihajlenko, V.I., Bilous, V.M., Popovskij, Yu.M. (2012). General Physics: Tutorial [Zagalna fizyka: Navchalnyj posibnyk]. – Second edition, revised and supplemented – Odesa: VydavInform ONMA, 475 p. [in Ukrainian].

4. Kucheruk, I.M., Horbachuk, I.T. (2001). General physics course in 3 volumes: textbook for students of higher technical and pedagogical institutions of education. Volume 2. Electricity and magnetism. [Zahalnyi kurs fizyky u 3 tomakh: navchalnyi posibnyk dlia studentiv vyshchychk tekhnichnykh i pedahohichnykh zakladiv osvity. Tom. 2. Elektryka i mahnetyzm]. / Edited by I.M. Kucheruk. – Kyiv: Technique, 452 p. [in Ukrainian].

5. Kucheruk, I.M., Horbachuk, I.T. (1999). General physics course in 3 volumes: textbook for students of higher technical and pedagogical institutions of education. Volume 3. Optics. Quantum physics. [Zahalnyi kurs fizyky u 3 tomakh: navchalnyi posibnyk dlia studentiv vyshchychk tekhnichnykh i pedahohichnykh zakladiv osvity. Tom. 3. Optyka. Kvantova fizyka]. / Edited by I.M. Kucheruk. – Kyiv: Technique, 520 p. [in Ukrainian].

6. Ilchenko, V.I., Obukhova, T. Yu. (2020) Physics of semiconductors. (Part I) [Electronic resource]: a textbook for students of specialty 153 "Micro and nano system technology" [Fizyka napivprovidnykiv. (Chastyna I) [Elektronnyi resurs]: navchalnyi posibnyk dlia studentiv spetsialnosti 153 «Mikro ta nano systemna tekhnika»]. – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 26 p. [in Ukrainian]. https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/37599/1/Fizyka_napivprovidnykiv-1.pdf

7. A. Aijjou, L. Bahatti, and A. Raihani. Influence of Solar Energy on Ship Energy Efficiency: Feeder Container Vessel as Example. *International Journal of Electrical Energy*, Vol. 7, No. 1, 2019, p. 21-25. doi: 10.18178/ijoe.7.1.21-25 [in English].

8. Tuswan Tuswan¹, Saefulloh Misbahudin, Sony Junianto and others. Current research outlook on solar-assisted new energy ships: representative applications and fuel & GHG emission benefits. The 3rd Maritime Safety International Conference (MASTIC) 2022. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1081 (2022) 012011. doi:10.1088/1755-1315/1081/1/012011 [in English].

9. Y. Yuan, J. Wang, X. Yan, Q. Li, and T. Long, "A design and experimental investigation of a large-scale solar energy/diesel generator powered hybrid ship," *Energy*, vol. 165, pp. 965–978, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.09.085 [in English].

10. Yaremchuk, S.O., Hryhorovych, N. R. (2022). Analysis of technical and economic aspects of the application of solar panels on the ship [Analiz tekhniko-ekonomichnykh aspektiv zastosuvannia soniachnykh panelei na sudni]. Materials of the XIII International Scientific and Practical Conference "Modern approaches to high-efficiency use of transport means", Danube Institute of the National University "Odessa Maritime Academy", Izmail, December 8-9, 2022. Zaporizhzhya: АА ТанDEM, P. 172 – 176 [in Ukrainian].

11. Yaremchuk, S.O., Hryhorovych, N. R. (2023). Technical aspects of maintenance and repair of solar panels on the ship [Tekhnichni aspekty obsluhovuvannia ta remontu soniachnykh panelei na sudni]. Materials of the VII International Scientific and Practical Conference «Innovative approaches

to the development of competence of specialists in the conditions of professional formation», Danube Institute of the National University "Odessa Maritime Academy", Izmail, April 21-22, 2023. Zaporozhye: AA Tandem, P.111-115 [in Ukrainian].

12. Welcome to ChatGPT (2023). Retrieved from: <https://chat.openai.com/> [in English].

Yaremchuk S. O., Maslov I. Z.

PHOTOVOLTAIC SYSTEMS ON SHIPS: PHYSICAL EXPERIMENT AND ANALYSIS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

In recent years, the International Maritime Organization (IMO) has significantly strengthened requirements to reduce harmful emissions from ships. Compared to TIER I, the current TIER III requirements are more than five times tougher. The use of marine photovoltaic systems (PVS) will reduce fuel consumption, the costs and harmful emissions, the dependence on traditional energy sources. The use of ship PVS is a popular and promising direction. However, at present their implementation remains limited. Shipowners and crews of marine vessels do not have sufficient theoretical and practical training to implement PVS in the process of the operation on ships. The purpose of the article is to deepen the knowledge and improve the professional competence of higher education applicants in the field of maritime transport regarding the technical and economic characteristics of marine PVS by conducting laboratory research, and analyzing information obtained from scientific sources, and using the artificial intelligence system ChatGPT. The theoretical foundations of the physical phenomenon of p-n transition have been established in the basis of photodiodes used in PVS. A physical experiment was conducted with modeling volts of the ampere characteristic of the diode with a p-n transition. The list of ship instruments of various functionality using the p-n transition, the place of installation of PVS on the ship, efficiency factors, quantitative indicators of fuel economy and CO₂ emissions, the return-on-investment period, features and problems of wide implementation, the list of maintenance and repair recommendations, the list of factors and quantitative indicators of PVS cost reduction, actual directions of development are determined. A multi-aspect classification matrix of marine PVSs has been developed. According to the results of the work, an increase in the level of professional competence of applicants in the field of ship PVS was established, practical skills of using the ChatGPT system were formed. Currently, solar power is used for the movement of small vessels, and as an auxiliary source of energy on large ships to provide lighting, communication devices and a navigation system. The most promising direction of development is hybrid solutions of several types of energy to increase the capacity of the ship's power plant. High capital costs, low efficiency, limited installation area prevent the widespread introduction of marine PVS.

Keywords: solar energy, p-n transition, photodiodes, solar panels, photovoltaic system, marine power plant, artificial intelligence, applicants for education.