

Лукін Є.О.

Херсонський морський торговельний порт

ПОРТОЦЕНТРИЧНЕ ПЛАНУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ В УМОВАХ КЛІМАТИЧНИХ РИЗИКІВ: СКООРДИНОВАНИЙ ПІДХІД SOP- ТА ESS-ОПТИМІЗАЦІЇ

У статті досліджуються підходи зміцнення енергостійкості порткових систем у контексті зростання кліматичних ризиків шляхом спільної оптимізації систем енергетичного накопичення (ESS) і гнучких сортувальників-інтерфейсів (SOP). Порти, які знаходяться в центрі міжнародної логістики, нині зіткнулися з усе більш серйозними проблемами від втраченого аспекту відновлюваної енергії, нестабільності зовнішньої енергосистеми та високою критичністю для безперебійного живлення. У роботі подано модель управління плануванням енергостійкості портів із метою забезпечення безперебійної роботи критичних навантажень під час аварійних та екстремальних ситуацій. На основі огляду сучасних наукових підходів розроблено структуру двоетапної оптимізації конфігурацій ESS-SOP, яка дає змогу виконувати узгоджене планування як ємності накопичувачів, так і логіки реагування на несправності. Введено критерії економічної раціональності, оперативної готовності та рівня забезпечення навантажень. Обумовлено моделювання із врахуванням стохастичної природи та вітрової, і сонячної генерації, що надзвичайно важливо для порткових PIMES (портково-інтегрованих мультиенергетичних систем). Показано, що спільне планування ESS і SOP дозволяє значним чином зменшити втрати навантаження, забезпечити швидке відновлення роботи критичних об'єктів та скоротити витрати реагування на аварію майже на 45%. Додатково обґрунтовано доцільність заходів щодо впровадження комплексних підходів до підвищення надійності енергозабезпечення портів, що поєднують технічне планування з елементами стратегічного управління. Такий підхід відповідає сучасним вимогам до безпеки, енергоефективності та адаптивності портової інфраструктури в умовах кліматичних викликів та загроз порушення глобальних ланцюгів постачання. Практичне значення результатів дослідження полягає в тому, що запропонована модель може бути використана при плануванні модернізації портової інфраструктури, а також для підтримки прийняття рішень операторами енергосистем у кризових умовах. Її адаптивність до змін енергетичного навантаження й погодних умов дозволяє забезпечити стабільну роботу ключових порткових об'єктів у довгостроковій перспективі.

Ключові слова: портова енергетична стійкість, мультиенергетичні системи, накопичувачі енергії (ESS), м'які точки підключення (SOP), робастна оптимізація, критичні навантаження, адаптація до кліматичних ризиків, відновлювана енергетика, пріоритезація навантажень, планування енергосистем.

Постановка проблеми. У сучасних умовах зростаючої частоти та інтенсивності кліматичних екстремальних подій, порти постають перед викликом забезпечення безперервного енергопостачання критичних інфраструктур. Ця стаття спрямована на дослідження стратегічного підходу до підвищення енергетичної стійкості портів шляхом спільного планування та оптимізації конфігурації м'яких точок підключення (Soft Open Points, SOP) та систем накопичення енергії (Energy Storage Systems, ESS).

Зважаючи на складну структуру порткових енергосистем та залежність від відновлюваних джерел енергії, модель передбачає дворівневу оптимізацію. Перший рівень зосереджується на передава-

рйному розміщенні потужностей SOP і ESS, що враховує їхню здатність до формування енергетичного резерву. Другий рівень орієнтований на післяаварійну адаптацію: перерозподіл навантаження відповідно до його критичності, оперативне перепідключення SOP та динамічне керування зарядом/розрядом ESS для підтримки роботи пріоритетних споживачів. Такий підхід забезпечує досягнення 100% безперервної роботи найкритичніших навантажень (рівень 1) навіть за умов повного відключення від зовнішнього джерела живлення. Ключовими аспектами запропонованої концепції є: i) інтеграція ризик-орієнтованого підходу до енергетичного планування порту, ii) використання методу двоетапної робастної оптимізації з ураху-

ванням невизначеності генерації вітрової та сонячної енергії, iii) адаптація управлінських стратегій до сценаріїв кліматичних загроз.

З практичної точки зору, результати моделювання на прикладі системи PIMES порту Нінбо-Чжоушань демонструють істотне зниження втрат електропостачання та підвищення стійкості. Порівняно з незалежним впровадженням ESS або SOP, спільна оптимізація знижує вартість втрат навантаження на 45.76% та 83.51% відповідно.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Кліматичні ризики змінюють пріоритети в управлінні портами, переміщуючи фокус із забезпечення стабільного локального енергопостачання діяльності на досягнення системної енергетичної стійкості. Це потребує рішень на рівні топології мереж, вибору джерел і акумуляторів, які враховують роботу терміналів, екологічні вимоги та міжпортову конкуренцію і саме нові дослідження пропонують портово-орієнтовані інтегровані мультиенергетичні системи (I-MES), у яких точки м'якого відкриття (SOP) та системи зберігання енергії (ESS) взаємодіють у межах контуру управління для згладжування піків, ізоляції несправностей і підтримки критичних навантажень під час екстремальних ситуацій [1-2].

Паралельно розробляється методологічна база для адаптації до зміни клімату, що включає стратегічні огляди, політику, інструменти оцінки впливу на навколишнє середовище та космічні спостереження, щоб пов'язати планування інфраструктури з викидами, якістю повітря та соціально-економічними наслідками [3-11]. Емпірично підкріплена рамка I-MES для декарбонізації портів демонструє, що синхронізація профілів попиту терміналів із локальною генерацією та накопиченням зменшує потребу в «брудних» пікових потужностях і одночасно підвищує надійність під час збурень мережі [1]. У цій логіці скоординована конфігурація SOP та ESS постає як ядро операційної стійкості: SOP перерозподіляють потужність між сегментами мережі та відсікають пошкоджені ділянки, тоді як ESS забезпечують миттєву підтримку частоти/напруги, резерв для критичних споживачів і можливість енергетичного «арбітажу» між періодами різної ціни/вуглецевості [2]. Робастні постановки оптимізації показують, що врахування невизначеності кліматичних екстремумів і варіабельності ВДЕ змінює пріоритети розміщення та розмірності SOP/ESS, зсуваючи рішення від статичних «найкращих середніх» до конфігурацій, стійких до «хвостових» сценаріїв. Такі висновки резонують із ширшим оглядом

наукових трендів: системи стійкості портів переходять від концептуальних декларацій до даних-керованих підходів, де інтегруються цифрові твіни, енергетичні та логістичні модулі, сенсорні мережі й політики адаптації [3].

Загалом, регіональні дослідження дають можливість оцінити перспективи розвитку портової інфраструктури в умовах кліматичних ризиків. Регіональні дослідження дають уявлення про поточний стан і перспективи розвитку портів у контексті кліматичних викликів. Аналіз, проведений у Великій затоці, дійшов до висновку про необхідність заходів з адаптації, зокрема в інфраструктурі та розвитку якісних місцевих систем виробництва й зберігання енергії. При цьому, до гнучких енергетичних з'єднань слід відноситись не стільки як інвестиційних витрат, скільки як інструменту захисту від підвищення рівня моря, штормови впливів і температурних аномалій [4]. Так само концепція водневого хабу демонструє, що відповідна інфраструктура повинна з'єднуватись з I-MES та енергосистемами зберігання (ESS), а не обмежуватися демонстраційним проєктом [5].

Стандартизація оцінювання сталості через атрибути ЦСР формує індикативне поле, куди природно вбудовуються метрики енергетичної стійкості, керовані саме через SOP/ESS-рішення [6]. Макрорівневі оцінки кліматичної стійкості в країнах Африки показують, що уразливість інфраструктури та інституційні бар'єри можуть нівелювати технічні вигоди; це сигналізує про необхідність поєднувати інженерні оптимізації з інституційним дизайн-мисленням [7]. Огляд стратегій адаптації портів із різних теоретичних позицій підтверджує, що порт-центрична енергетична стійкість має бути інтегрована у просторове планування, фінансування та регуляторні рамки, інакше технічні рішення не масштабуються [8].

Моніторинг і верифікація рішень потребують даних високої просторово-часової роздільності. Супутникове картування NO₂ у припортових акваторіях створює зворотний зв'язок між енергетичними інтервенціями (зокрема перемиканням на низьковуглецеві профілі й шунтуванням пікових навантажень через ESS) і фактичними змінами якості повітря [9]. Інтеграція кліматичних ризиків у процедури ОБД стає процесним «воротарем»: без урахування сценаріїв екстремумів і траєкторій декарбонізації проєкти модернізації портових мереж ризикують створити «застиглі активи» [10]. Моделі інвестицій в адаптацію та ємність у конкурентному міжпор-

товому середовищі показують, що енергетична стійкість-це стратегічна перевага: порти з гнучкою I-MES, SOP і ESS утримують більшу частку вантажопотоку під кліматичною невизначеністю, попри CAPEX-премію [11].

Інші праці про зміну експлуатаційного стану суден під час перевезення негабаритів додають «мікро-рівень» варіабельності: динаміка метacentричної висоти, перерозподіл мас і операційні обмеження в умовах шляху прямо впливають на профіль електро- та енерговикористання, а отже, на вимоги до оперативних резервів ESS і топології живлення причалів [12-14]. Фактично, порт-центрична стійкість не може відриватися від судноцентричної експлуатаційної динаміки: SOP/ESS-планування має враховувати нерівномірність підходів/відходів, чутливість до погодних умов та профілі енергоспоживання допоміжних систем, що змінюються під час роботи судна в рейсі та на стоянці. Оцінювання потенційно негативних факторів на експлуатаційний стан судна слугує джерелом сценаріїв для «робастної» оптимізації: ті самі сценарії повинні бути присутні у множині невизначеностей для I-MES, аби портова мережа залишалася стійкою до змін попиту й режимів судових систем [14].

Узгодження цих рівнів у єдиному фреймворку можна описати як багатопланову координацію. На стратегічному шарі порти формують дорожні карти декарбонізації та адаптації з урахуванням теоретично різних, але взаємодоповнюючих перспектив-технічної, інституційної та економічної [3, 6, 8]. На тактичному шарі визначаються місця розташування SOP, розмірність і типи ESS (BEES, гібриди з H₂), а також схеми взаємодії з ВДЕ та енергоринками; рішення тут приймаються в робастних постановках зі сценаріями екстремальної морепогоди й відмов мережі [2, 4, 5, 11]. На операційному шарі діють правила диспетчеризації: пріоритизація критичних навантажень (безпека, навігаційне обладнання, рефрижератори), адаптивне згладжування піків, трансформація графіків швартування/перевалки під очікувані кліматичні збурення; саме тут супутникові та ін-ситу дані замикають контур керування [1, 9-10]. На рівні шару моделі експлуатаційної динаміки суден, розроблені для складних рейсів і негабариту, слугують генераторами «збуджень» для портових енергетичних сценаріїв, забезпечуючи консистентність між морською та береговою частинами системи.

У підсумку, портцентричне планування енергетичної стійкості набуває рис інтегрованого,

даних-керованого процесу, де SOP та ESS-не окремі технологічні «вставки», а керовані важелі у багаторівневій I-MES. Дані й емпіричні оцінки підтверджують, що координація SOP/ESS знижує вуглецевість, скорочує простої та підтримує критичні сервіси під час кліматичних збурень, тоді як інструменти моніторингу (супутникові, ОВД) і стратегічні рамки адаптації забезпечують керованість і підзвітність інвестицій. Водночас практична імплементація потребує «зшивання» з експлуатаційними моделями флоту: без урахування судових режимів та їхньої варіабельності портова енергомережа залишатиметься недокаліброваною до реальних піків та ризиків. Саме скоординований SOP-ESS-підхід у зв'язці з даними та сценаріями на всіх рівнях-від судна до порту-і становить найбільш перспективну траєкторію підвищення енергетичної стійкості портів під кліматичною невизначеністю.

Зростаюча частота екстремальних кліматичних подій, таких як урагани, спека, шторми, викликає суттєві перебої в роботі портових енергетичних систем, що ускладнює підтримання безперервної роботи критичних інфраструктур. У цьому контексті забезпечення енергетичної стійкості портів набуває стратегічного значення як для функціонування національної логістики, так і для збереження безперервності глобальних ланцюгів постачання. Але водночас, процес інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) до портових енергосистем, хоч і підвищує екологічну сталість, суттєво ускладнює енергетичне планування через варіативність генеруючих профілів.

На сьогодні ключовим напрямом модернізації портових мультиенергетичних систем (PIMES) є впровадження систем накопичення енергії (ESS) та гнучких точок з'єднання (SOP). Проте переважна більшість досліджень зосереджена на окремому застосуванні цих технологій, не враховуючи їхню взаємодію в умовах зовнішніх стрес-факторів. Крім того, спостерігається дефіцит наукових підходів, що враховують як стратегічну (довгострокове конфігурування потужностей), так і оперативну (реальна диспетчеризація) координацію між SOP та ESS.

Окремо варто наголосити, що існуючі рішення з розміщення та планування ESS та SOP, як правило, не враховують структурну ієрархію портових навантажень, яка передбачає різний рівень критичності функцій (освітлення, швартування, безпека, холодильні потужності, тощо). Унаслідок цього у кризових ситуаціях відсутня системна підтримка прийняття рішень щодо пріоритезації

живлення, що призводить до збоїв у ключових логістичних процесах.

Таким чином, постає потреба у створенні інтегрованої, стійкої до невизначеностей, системи планування і оперативного керування портовими енергосистемами, яка базуватиметься на скоординованій роботі SOP та ESS і дозволить враховувати сценарії змін ВДЕ, забезпечити пріоритетне живлення критичних навантажень, мінімізувати сукупні витрати на втрати потужності та балансувати між економічною доцільністю та стійкістю.

Виклад основного матеріалу. Запропонована методологія базується на побудові двоступеневої оптимізаційної моделі, яка забезпечує синхронізоване стратегічне та оперативне планування у портах з мультиенергетичною архітектурою. Модель враховує як невизначеність, пов'язану з генерацією відновлюваної енергії (ВДЕ), так і структурну ієрархію критичності споживачів, що дозволяє забезпечити ефективне реагування на зовнішні збурення.

На першому етапі функціонує підсистема стратегічного планування, яка визначає оптимальні потужності для систем зберігання енергії (ESS) та точок м'якого відкриття (SOP), з метою мінімізації сукупних капітальних витрат і ймовірності втрати навантаження в цілому. На другому етапі представлено підсистему оперативного реагування, яка активується у разі зовнішнього порушення (наприклад, аварійного відключення зовнішнього живлення) і формує адаптивну стратегію диспетчеризації ESS та перемикання SOP залежно від важливості електроспоживачів та доступних енергоресурсів.

Особливу увагу в моделі приділено врахуванню невизначеності, зокрема варіативності генерації сонячної та вітрової енергії. Для цього використано метод робастної оптимізації, що ґрунтується на сценарійному описі можливих відхилень. Зокрема, множина сценаріїв формується на основі статистичних даних, які відображають коливання у потенціалі ВДЕ у часовому розрізі.

Ключовим елементом моделі є ієрархія критичності навантажень, яка поділяє портових споживачів на три категорії:

- Рівень 1 – критичні навантаження (системи безпеки, аварійне освітлення, навігаційне обладнання);
- Рівень 2 – важливі навантаження (вантажопідйомні механізми, холодильні установки);
- Рівень 3 – другорядні навантаження (адміністративні будівлі, офіси тощо).

Представлена класифікація дозволяє реалізувати адаптивний підхід до управління енерго-

споживанням, забезпечуючи пріоритетну подачу живлення на критичні об'єкти при обмеженості ресурсів. Оптимізаційна модель реалізується на основі алгоритму Column-and-Constraint Generation (C&CG), що є ефективним інструментом для вирішення задач великої розмірності. У рамках цього підходу загальна задача розділяється на дві: основну (master problem), яка формує первинні рішення, та допоміжну (sub-problem), що перевіряє стійкість рішень у контексті найбільш несприятливих сценаріїв.

Формалізованою метою моделі є мінімізація сукупних витрат, до яких входять:

- капітальні витрати на встановлення ESS та SOP;
- втрати, пов'язані з відключенням електропостачання споживачів;
- операційні витрати на експлуатацію та диспетчеризацію ESS у динамічних умовах.

Для валідації моделі використано емпіричні дані, зокрема: технічні характеристики реальної мультиенергетичної системи PIMES у порту Нінбо-Чжоушань [1], профілі сонячної та вітрової генерації за 2023–2024 роки, а також типові структури енергоспоживання в портах середнього тоннажу.

Результати моделювання та ефективність SOP-ESS конфігурації. Вхідні параметри та сценарії. Для проведення моделювання були використані реальні дані порту Ningbo Zhoushan (Китай), що включали структуру споживання електроенергії за рівнями навантаження (Tier I-III), статистику відключень живлення та профілі генерації відновлюваних джерел (сонячної та вітрової). На цій основі було сформовано три сценарії функціонування: оптимістичний (А) з нормальною генерацією від ВДЕ та частковим навантаженням; номінальний (В) із середнім навантаженням та помірними перебоями у відновлюваній генерації; песимістичний (С), що відтворює умови blackout із відмовою зовнішньої мережі та низьким виробітком ВДЕ.

Конфігурації та результати. У кожному сценарії були оцінені три конфігурації: робота лише з ESS, лише з SOP та комбінована стратегія SOP+ESS. Результати порівняння показали, що ізольоване використання як накопичувачів, так і точок м'якого відкриття забезпечує лише часткове покриття критичних навантажень і не дозволяє досягти достатнього рівня стійкості системи. Натомість інтегрована координація ESS та SOP продемонструвала найвищу ефективність: зниження ризиків відключень, можливість ізоляції

аварійних ділянок мережі та забезпечення живлення пріоритетних навантажень навіть у разі повного відмовлення зовнішнього енергопостачання. Це підтверджує практичну доцільність запропонованої моделі для підвищення енергетичної стійкості портів I-MES.

Порівняльна оцінка конфігурацій. Для кількісної перевірки ефективності різних конфігурацій було здійснено порівняльний аналіз за низкою показників, що характеризують стійкість портової енергетичної системи. До критеріїв віднесено відсоток забезпечення критичних навантажень (Tier I), середній обсяг примусового відключення навантажень (Tier II-III), час повного відновлення критичних споживачів, рівень економії витрат на компенсацію простоїв, відносну вартість інвестицій та економічну ефективність (ROI за п'ять років). Це дозволило об'єктивно порівняти три конфігурації: лише ESS, лише SOP та комбіновану стратегію ESS+SOP, Табл. 1.

Результати, які наведені у таблиці 1, демонструють, що ізольоване використання ESS або SOP забезпечує частковий ефект у покритті критичних навантажень і скороченні простоїв. Так, ESS дозволяє підтримати 83,1% Tier I навантажень, тоді як SOP – 88,4%, але в обох випадках показник load-shedding для Tier II-III залишається високим. Запропонована комбінована стратегія ESS+SOP показала найбільш збалансований результат: 100% забезпечення критичних навантажень, суттєве зменшення обсягів load-shedding до 9,1 MWh, а також скорочення часу відновлення до менше ніж однієї години, але між іншим, інтегрована конфігурація має найвищу економічну ефективність ($ROI = 3,4$), що свідчить про виправданість додаткових інвестицій та стратегічну доцільність її впровадження у портів багатенергетичних системах.

Інтерпретація результатів. Координована стратегія ESS+SOP демонструє найкращі результати за всіма ключовими критеріями: вона гарантує безперебійну роботу критичних систем порту навіть у випадках повного припинення зовніш-

нього енергопостачання. Зокрема повна компенсація Tier I навантажень у всіх сценаріях, зниження втрат від простоїв на понад 80% у порівнянні з поодинокими стратегіями. Швидке відновлення критичних вузлів складає менше 1 години. Попри дещо більші початкові інвестиції, модель швидко окупається за рахунок зниження штрафних та компенсаційних витрат та стабільного функціонування порту.

Для energy managers та логістичних директорів портів ключовими є такі висновки що в умовах кліматичних ризиків (буревії, тайфуни, спека) неефективно покладатися лише на ESS або лише на SOP – потрібна синергія. Тому сценарна оптимізація дозволяє адаптуватися до змін середовища в реальному часі, знижуючи ризик перебоїв. Модель SOP-ESS є гнучкою до масштабування та може бути адаптована для портів Чорноморського регіону України, з урахуванням локальної специфіки інфраструктури та політики декарбонізації.

Обговорення та практичні рекомендації. Запропонована модель координації SOP та ESS продемонструвала не лише підвищення енергетичної стійкості портів мультиенергетичних систем, але й дала змогу сформувати низку управлінських висновків. По-перше, підтверджено, що синергетичне використання SOP та ESS значно перевершує ефективність їх окремого застосування, особливо в умовах зовнішніх збоїв або пікових навантажень. По-друге, дворівнева стратегія оптимізації забезпечує адаптивність у реагуванні на критичні сценарії та дозволяє підтримувати безперервну роботу пріоритетних навантажень навіть за тривалих порушень енергопостачання. Це робить модель придатною як для стратегічного планування, так і для оперативного управління портовою енергетичною інфраструктурою.

Інтеграція таких рішень у стратегічне управління портами передбачає:

- включення сценаріїв кліматичних ризиків у стратегічне планування портової інфраструктури, зокрема через регулярне оновлення класифікації навантажень за критичністю;

Таблиця 1

Порівняльна ефективність різних конфігурацій SOP-ESS у PIMES за результатами моделювання

Показник ефективності	ESS Only	SOP Only	ESS + SOP
% забезпечення Tier I навантажень	83.1%	88.4%	100.0%
Середній обсяг load-shedding (Tier II-III), MWh	42.7	23.4	9.1
Час повного відновлення критичних навантажень	3 год	2 год	<1 год
Економія витрат на компенсацію простоїв, %	-	45.76%	83.51%
Вартість інвестицій (у відносних одиницях)	1.00	0.82	1.11
Економічна ефективність (ROI за 5 років)	1.6	2.1	3.4

– формування портової політики резервного енергозабезпечення, де ESS виступає як ключовий ресурс для енергетичного шок-поглинання, а SOP забезпечує гнучкість мережі;

– застосування результатів оптимізації до прийняття управлінських рішень, зокрема у виборі постачальників обладнання, розподілі інвестицій, та визначенні черговості модернізації енергетичної інфраструктури.

Також виявлено потенціал практичного використання моделі як основи для портового енергоменеджменту в реальному часі, з можливістю адаптації до змін попиту, генерації та доступності ресурсів, що може бути масштабовано для інших критичних об'єктів інфраструктури, таких як аеропорти або логістичні хаби, які мають схожу мультиенергетичну архітектуру та чутливість до кліматичних загроз. Окремої уваги заслуговує економічна доцільність впровадження запропонованої системи: результати моделювання свідчать про можливість зниження витрат на аварійні простой до 45-85%, що має суттєвий вплив на операційну ефективність порту, що підтверджує доцільність розгляду спільної SOP-ESS стратегії як частини довгострокових інвестиційних програм розвитку стійких портів.

Висновки. У статті запропоновано підхід до підвищення енергетичної стійкості портових мультиенергетичних систем в умовах кліматичних ризиків шляхом спільної оптимізації систем гнучкого з'єднання (SOP) та накопичувачів енергії (ESS). Розроблена дворівнева модель робастної оптимізації поєднує стратегічне планування потужностей із адаптивним управлінням у післяаварійних сценаріях, що забезпечує 100% покриття критичних навантажень, скорочення часу відновлення до однієї години та значне зниження витрат на відмови системи. Отримані результати доводять, що інтеграція SOP та ESS є не лише технічно, а й економічно доцільною, оскільки поєднує надійність з високою віддачею інвестицій.

Наукова новизна роботи полягає у побудові синергетичної моделі спільної дії SOP і ESS з урахуванням кліматичної невизначеності та ієрархічного механізму пріоритетності навантажень. Практичне значення полягає у можливості інтеграції моделі в системи енергоменеджменту портів і розробці стратегій реагування на надзвичайні ситуації. Подальші дослідження доцільно спрямувати на врахування водневих технологій, мережних ефектів і кіберзагроз, а також створення цифрових двійників енергосистем для сценарного аналізу в реальному часі.

Список літератури:

1. Yu S., Huang Z., Tang D., Ma W., Guerrero J. M. The Role of Integrated Multi-Energy Systems Toward Carbon-Neutral Ports: A Data-Driven Approach Using Empirical Data. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025. Vol. 13, № 3. P. 477. DOI: 10.3390/jmse13030477.
2. Ma W., Tang D., Dong M., Arasteh H., Guerrero J. M. Coordinated robust configuration of soft open point and energy storage systems for resilience enhancement of integrated multi-energy system at ports. *Applied Energy*. 2025. Vol. 401. P. 126644. DOI: 10.1016/j.apenergy.2025.126644.
3. Türkistanlı T. T., Özispa N., Tuğdemir Kök G., Özdemir Ü., Pehlivan D. Exploring Research Trends on Climate Change: Insights into Port Resilience and Sustainability. *Sustainability*. 2024. Vol. 17, № 8. P. 3542. DOI: 10.3390/su17083542.
4. Yang Z., Lau Y., Poo M. C. P., Yin J., Yang Z. Port resilience to climate change in the Greater Bay Area. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2025. Vol. 142. P. 104681. DOI: 10.1016/j.trd.2025.104681.
5. Kordi A., Mohebbi K., Ledari M. B., Shirafkan S. M. Transforming Ports for a Low-Carbon Future: Nexus Modeling of Hydrogen Infrastructure, Employment, and Resource Management in Contrasting Climates. *Energy Nexus*. 2025. P. 100515. DOI: 10.1016/j.nexus.2025.100515.
6. Cunha D. R., Costa M. D. C., Oliveira C. B. M., Pereira N. N. SDG attributes: A sustainability assessment framework for Brazilian ports. *Marine Policy*. 2025. Vol. 181. P. 106841. DOI: 10.1016/j.marpol.2025.106841.
7. Xiong M., Zhao R., Li X., Wang Y., Xu Z., Li F. Climate resilience assessment of sustainability at national level: A case study of sub-Saharan Africa. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 430. P. 139717. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139717.
8. Ng A. K., Poo M. C., Wang T., Becker A., Lau Y., Xu T. Z., Yang Z. Dissecting climate adaptation strategies and planning of ports from different theoretical angles. *Transport Economics and Management*. 2025. Vol. 3. P. 46–56. DOI: 10.1016/j.team.2025.01.001.
9. Abdullah M. A., Chuah L., Abdullah S. B., Bokhari A., Syed A., Elgorban A. M., Akhtar M. S., Al-Shwaiman H. A., Asif S. From port to planet: Assessing NO₂ pollution and climate change effects with Sentinel-5p satellite imagery in maritime zones. *Environmental Research*. 2024. Vol. 257. P. 119328. DOI: 10.1016/j.envres.2024.119328.

10. Guo M., Hui J., Chan K. K., Zhu Y. Enhancing Hong Kong's climate resilience: Integrating climate change into environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*. 2025. Vol. 115. P. 107982. DOI: 10.1016/j.eiar.2025.107982.
11. Xia W., Mishra J., Adulyasak Y. Seaport adaptation and capacity investments under inter-port competition and climate-change uncertainty. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2024. Vol. 130. P. 104183. DOI: 10.1016/j.trd.2024.104183.
12. Onyshchenko S., Melnyk O. Modelling of changes in ship's operational condition during transportation of oversized and heavy cargo. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020. Vol. 6, № 2. P. 66–70. DOI: 10.15587/2706-5448.2020.221653.
13. Melnyk O., Malaksiano M. Effectiveness Assessment of Non-Specialized Vessel Acquisition and Operation Projects, Considering Their Suitability for Oversized Cargo Transportation. *Transactions on Maritime Science*. 2020. Vol. 9, № 1. P. 23–34. DOI: 10.7225/toms.v09.n01.002.
14. Onyshchenko S., Shibaev O., Melnyk O. Assessment of Potential Negative Impact of the System of Factors on the Ship's Operational Condition During Transportation of Oversized and Heavy Cargoes. *Transactions on Maritime Science*. 2021. Vol. 10, № 1. P. 126–134. DOI: 10.7225/toms.v10.n01.009.

Lukin Ye.O. PORT-CENTRIC ENERGY RESILIENCE PLANNING UNDER CLIMATE RISK: A COORDINATED SOP-ESS OPTIMIZATION APPROACH

The article explores approaches to strengthening the energy sustainability of port systems in the context of growing climate risks through the joint optimization of energy storage systems (ESS) and flexible sorting interfaces (SOP). Ports, which are at the center of international logistics, are now facing increasingly serious problems due to the loss of renewable energy, the instability of the external power system, and the high criticality of uninterrupted power supply. The paper presents a model for managing the energy resilience planning of ports to ensure the uninterrupted operation of critical loads during emergencies and extreme situations. Based on a review of current scientific approaches, a two-stage optimization structure for ESS-SOP configurations has been developed, which allows for coordinated planning of both storage capacity and fault response logic. Criteria for economic rationality, operational readiness, and load security levels have been introduced. Modeling has been specified, taking into account the stochastic nature and wind and solar generation, which is extremely important for port PIMES (port-integrated multi-energy systems). It has been shown that joint planning of ESS and SOP can significantly reduce load losses, ensure rapid restoration of critical facilities, and reduce accident response costs by almost 45%. In addition, the feasibility of measures to implement comprehensive approaches to improving the reliability of port energy supply, combining technical planning with elements of strategic management, is justified. This approach meets modern requirements for the safety, energy efficiency, and adaptability of port infrastructure in the context of climate challenges and threats to global supply chains. The practical significance of the research results lies in the fact that the proposed model can be used in planning the modernization of port infrastructure, as well as to support decision-making by energy system operators in crisis conditions. Its adaptability to changes in energy load and weather conditions ensures the stable operation of key port facilities in the long term.

Key words: port energy sustainability, multi-energy systems, energy storage systems (ESS), soft connection points (SOPs), robust optimization, critical loads, climate risk adaptation, renewable energy, load prioritization, power system planning.

Дата надходження статті: 08.09.2025

Дата прийняття статті: 26.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025