

УДК 33.658.005.93; 658.9

JEL Classification: L85

DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.31.2024.319022>**Нестерова К. С.**кандидат економічних наук, доцент,  
доцент кафедри економіки і міжнародних економічних відносин

ORCID ID: 0000-0002-4956-0469

**Бринзило А. В.**здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти  
(відповідальний автор)

ORCID ID: 0009-0006-3287-4994

Міжнародний гуманітарний університет, м. Одеса

**Nesterova Kateryna, Brynzylo Andriy**  
International Humanitarian University, Odesa

## УПРАВЛІННЯ ВПРОВАДЖЕННЯМ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ РЕЗЕРВНОГО ЖИВЛЕННЯ У ДІЯЛЬНІСТЬ ТОРГОВЕЛЬНО-РОЗВАЖАЛЬНОГО ЦЕНТРУ

### MANAGEMENT OF THE IMPLEMENTATION OF INNOVATIVE BACKUP POWER TECHNOLOGIES IN THE FUNCTIONING OF A SHOPPING MALL

У роботі проаналізовані інноваційні технології резервного живлення, які сприяють підвищенню стійкості торгово-розважальних центрів (ТРЦ) до блекаутів. Метою дослідження є аналіз можливостей застосування сонячних електростанцій, систем накопичення енергії та дизель-генераторів для забезпечення безперебійного енергопостачання. Методологія дослідження включала моделювання оптимальних рішень для розміщення сонячних панелей на дахах та парковках ТРЦ, а також оцінку технічних параметрів цих систем. Отримані результати довели, що розміщення сонячних панелей на дахах ТРЦ може забезпечити до 25% від їхнього енергоспоживання влітку та навесні навіть при встановленні станцій невеликої потужності до 2 МВт. Також виявлено, що комбінування сонячних електростанцій із дизель-генераторами може значно знизити навантаження на енергосистему країни та підвищити стійкість інфраструктури. Встановлено, що ефективний менеджмент ТРЦ в контексті планування та стратегічного розміщення таких систем дозволяє забезпечити надійне резервне живлення. Крім того, результати продемонстрували, що інтеграція відновлювальних джерел енергії з резервними системами здатна зменшити витрати на енергію в періоди пікового споживання та покращити екологічну ситуацію завдяки зниженню викидів CO<sub>2</sub>, а також підтвердили, що інтеграція відновлювальних джерел енергії та резервних джерел енергії є ефективним управлінським рішенням для забезпечення безперебійного енергопостачання ТРЦ. Такі системи підвищують енергетичну незалежність об'єктів, знижують їх залежність від зовнішніх енергетичних загроз та покращують стійкість до надзвичайних ситуацій. Розроблені управлінські стратегії можуть бути адаптовані для різних географічних і кліматичних умов, що сприяє поширенню таких рішень в інших країнах, які мають подібні виклики в енергетичній сфері.

**Ключові слова:** ТРЦ, сонячні панелі, системи накопичення енергії, енергетична стійкість, підвищення операційної ефективності, відновлювальні джерела енергії.

The study explored innovative backup power technologies to bolster the resilience of shopping and entertainment centers (SECs) during blackouts. The research evaluated the feasibility of using solar power plants, energy storage systems, and diesel generators to ensure uninterrupted energy supply. The methodology involved modeling optimal configurations for placing solar panels on rooftops and parking lots of SECs, as well as analyzing technical parameters of these systems. Results indicated that installing solar panels on SEC rooftops can meet up to 25% of their energy demand during spring and summer, even with smaller solar installations of up to 2 MW. Furthermore, integrating solar power plants with diesel generators was shown to significantly alleviate the strain on the national power grid while improving infrastructure resilience. A critical factor in achieving reliable backup power was identified as effective SEC management, which involves careful planning and strategic placement of these systems. The integration of renewable energy sources with backup solutions also demonstrated cost-saving potential by reducing energy expenses during peak demand periods. Additionally, these systems contribute to environmental benefits, such as lowering CO<sub>2</sub> emissions. The findings confirmed that combining renewable energy with backup power sources enhances energy independence, minimizes reliance on external energy systems, and improves resilience against emergencies. Proposed management strategies were found to be adaptable across diverse geographic and climatic conditions, making them applicable to other regions facing similar energy challenges. This adaptability underscores the potential for widespread adoption of these solutions, fostering sustainable energy practices globally.

**Keywords:** Shopping mall, solar panels, energy storage systems, energy resilience, improving operational efficiency, renewable energy sources.

**Постановка проблеми.** У сучасному світі енергетична безпека стала ключовим аспектом функціонування будь-якої інфраструктури, зокрема торгово-розважальних центрів (ТРЦ), які відіграють важливу роль у комерційній та соціальній структурах міст. В умовах кризових ситуацій, таких як воєнний стан чи масові блекаути, забезпечення стабільної роботи таких об'єктів стає значним управлінським викликом. ТРЦ особливо вразливі до відключень електропостачання через високе споживання енергії, пов'язане з роботою систем кондиціонування, освітлення та іншого обладнання. У ситуаціях, коли основна енергетична інфраструктура зазнає пошкоджень, критично важливим є зменшення залежності від централізованого електропостачання та впровадження систем резервного живлення, здатних забезпечити автономність і стійкість цих об'єктів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження щодо впровадження інноваційних технологій резервного живлення для ТРЦ здебільшого представлені у роботах іноземних науковців. Так, J. Marqusee та ін. виявлено, що технології резервного енергопостачання, зокрема сонячні електростанції, акумулятори та дизель-генератори, можуть стати ключовими інструментами для підвищення стійкості ТРЦ до надзвичайних ситуацій [8]. Окрім цього, застосування відновлювальних джерел енергії дає змогу зменшити залежність від зовнішніх джерел енергопостачання, що надзвичайно важливо в умовах нестабільності енергосистеми в кризові періоди.

Відновлювальні джерела енергії стають важливими елементами енергетичної стійкості в умовах нестабільного енергопостачання. У роботі R. Takahashi та ін. відзначено, що сонячні панелі можуть знизити енергетичну залежність ТРЦ від зовнішніх джерел електроенергії [11]. Однак автори вказують, що для ефективного використання цієї технології необхідне належне проектування та ефективний менеджмент у частині оптимального розміщення панелей на дахах та фасадах будівель.

У дослідженні J. Hoshen зазначено, що існують роботи, у яких розглянуті питання енергетичної стійкості різних інфраструктурних об'єктів, зокрема в умовах надзвичайних ситуацій та воєнних конфліктів [5].

Y. Liu відзначає, що застосування сонячних батарей та акумуляторних систем дозволяє значно знизити енергетичну залежність від зовнішніх джерел [7].

У дослідженні Y. Elomari та ін. зазначено, що недостатньо уваги приділено комбінуванню сонячних систем із дизель-генераторами та іншими резервними джерелами енергії, що могло б забезпечити надійне енергопостачання в умовах обмеженого доступу до зовнішніх джерел енергії [3].

**Формулювання цілей статті.** В умовах недостатності досліджень різних аспектів впровадження інноваційних технологій резервного живлення у діяльність великих комерційних об'єктів, метою даної статті – є аналіз управлінського механізму впровадження таких технологій, як сонячні електростанції та акумулятори, у діяльність ТРЦ в Україні.

**Виклад основного матеріалу.** З серпня по листопад 2024 року на базі кількох великих ТРЦ у Києві (ТРЦ 1 – 160 000 м<sup>2</sup>, ТРЦ 2 – 70 000 м<sup>2</sup> та ТРЦ 3 – 90 000 м<sup>2</sup>), обраних за критеріями наявності існуючої

енергетичної інфраструктури, доступності площ для встановлення сонячних панелей та наявності резервного енергопостачання, був проведений аналіз використання цими об'єктами відновлювальних джерел енергії. Для виборки було обрано ті об'єкти, що мають можливість модернізації енергетичних систем та володіють відповідною інфраструктурою для підтримки комерційної активності під час блекаутів. Кожен ТРЦ було оснащено різним типом системи енергозабезпечення для проведення порівняльного аналізу їх ефективності та надійності.

Для ТРЦ 1 було використано сонячні панелі моделі Trina Solar TSM-DE18M(II) 400W, виробника Trina Solar з Китаю. Ця модель належить до високоефективних монокристалічних панелей, які забезпечують високу продуктивність навіть за слабого освітлення. Загальна встановлена потужність склала 1МВт.

Враховуючи можливість тривалих відключень електрики, було розглянуто варіант комбінації сонячних панелей з дизельними генераторами для забезпечення стабільного енергопостачання.

Процедура експерименту включала моделювання генерації енергії сонячними панелями в умовах відсутності централізованого енергопостачання. Для цього були використані періодичні симуляції блекаутів, під час яких проводилися тестові запуски систем резервного живлення. Зокрема, для перевірки стабільності електропостачання в умовах високого навантаження системи резервного живлення працювали протягом 8-12 годин, що дозволяло відтворювати можливі кризові ситуації.

У ТРЦ 2 використовувалися дизельні генератори Volvo Penta TAD 1642VE, виробництва компанії VOLVO, Швеція, з потужністю 537 кВт. Ці генератори забезпечують стабільне електропостачання під час відключень та швидко запускаються, що критично для підтримки енергозабезпечення у кризових ситуаціях.

У ТРЦ 3 було використано комбіновану систему, що включала сонячні панелі Trina Solar TSM-DE18M(II) загальною потужністю 1.5 МВт та дизельний генератор Volvo Penta TAD 1642VE для забезпечення енергопостачання під час перебоїв з електропостачанням (табл. 1). Генератор здатний працювати від 12 до 15 годин при середньому навантаженні. Протягом 10 годин роботи при навантаженні 50% генератор споживає близько 500 літрів дизельного пального, що дозволяє забезпечити мінімальні потреби систем торгового центру, таких як освітлення та системи безпеки.

Управлінське рішення шляхом комбінації двох моделей дозволило забезпечити гнучкість у використанні різних джерел енергії, залежно від наявності сонячного випромінювання та тривалості відключень. Для встановлення сонячних панелей було обрано дахи торгових центрів через велику доступну площу та мінімальне затінення. З огляду на кліматичні особливості регіону дослідження, було враховано середню інсоляцію, яка змінюється залежно від сезону. У літній період, коли інсоляція досягає максимальних показників, сонячні панелі здатні забезпечити значну частку від загального денного споживання енергії торгового центру, що дозволяє значно скоротити обсяги зовнішнього електропостачання. Проте у зимовий період через зниження інсоляції генерація електроенергії падає на 70% у порівнянні із теплою порою року. Слід зазначити, що частка генерації

Таблиця 1

## Характеристики дизельного генератора для резервного живлення

Параметр	Volvo Penta TAD 1642VE
Потужність генератора	537 кВт
Тривалість роботи	12-15 годин
Витрата пального (50% навантаження)	500 літрів на 10 годин роботи
Викиди CO <sub>2</sub> за 10 годин роботи	1200 кг CO <sub>2</sub> (приблизно)
Операційні витрати на 10 годин роботи (без врахування ТО)	22 500 грн (в залежності від ціни пального)
Екологічний вплив	Високий рівень викидів CO <sub>2</sub>

Джерело: результати дослідження авторів

від загального денного споживання енергії, що забезпечується за рахунок сонячних панелей прямо пропорційна залежить від конфігурації ТРЦ. Чим більшим є показник площі забудови по відношенню до загальної площі ТРЦ тим більший потенціал щодо збільшення частки генерації за рахунок сонячних панелей.

У процесі дослідження та при моделюванні сценаріїв використовувалися фактичні дані щодо споживання електроенергії функціонуючого ТРЦ площею біля 80.000 кв. м обладнаного системою резервного живлення та автоматизованої системою комерційного обліку електроенергії. У результаті дослідження було встановлено, що найбільшими споживачами енергії є системи кондиціонування повітря, які забезпечують комфортний клімат у приміщеннях для великої кількості відвідувачів, займаючи близько 35% загального енергоспоживання. Кондиціонування є критичним фактором у створенні привабливого середовища для відвідувачів і особливо важливим у літній період, коли температура значно підвищується. Проте, в умовах пікового навантаження у такі періоди споживання енергії зростає, що може створювати додатковий тиск на систему живлення [8].

Другою найбільш енерговитратною категорією є освітлення, яке становить близько 25% від загального обсягу споживання. У торгових центрах висока інтенсивність освітлення є необхідною для привабливості вітрин, зручності навігації. Освітлювальна система включає різні рівні інтенсивності та енергозатратні LED-лампи, які використовуються для освітлення центральних зон, коридорів, ескалаторів, а також окремих торгових площ, що вимагає значного енергоресурсу.

Ще однією важливою категорією споживання енергії (близько 15%) є забезпечення роботи основних сервісних зон, до яких входять ліфти, ескалатори, системи пожежної безпеки та підтримка стабільного функціонування систем життєзабезпечення. Це обладнання має безперервно функціонувати для забезпечення безпеки та зручності відвідувачів, тому система резервного живлення для цих об'єктів має бути розрахована на підтримку роботи навіть у випадках аварійного відключення.

Решта енергоспоживання (близько 25%) включає підтримку окремого обладнання магазинів, яке також може мати високі енергозатрати, особливо у випадках використання холодильного обладнання, електронних кас, систем безпеки та додаткового освітлення. Ці потреби залежать від типу магазинів та орендарів, однак загальна картина дозволила визначити критичні зони енергоспоживання, які потребують особливого контролю.

Аналіз пікового навантаження виявив, що найбільш інтенсивне споживання енергії спостерігається в період з 12:00 до 18:00, що збігається з основними робочими годинами більшості магазинів та піковим потоком відвідувачів. У цей час енергоспоживання підвищується на 20–25% у порівнянні з ранковими та вечірніми годинами, що потребує відповідного забезпечення енергоресурсів для стабільної роботи всієї інфраструктури торгового центру. У табл. 2 наведений розподіл енергоспоживання різних систем у ТРЦ.

У табл. 3 продемонстровано енергоспоживання ТРЦ 1, де основним споживачем енергії є система кондиціонування, особливо в пікові години з 12:00 до 18:00, коли споживання досягає максимального рівня. У ТРЦ 2 велика частка енергоспоживання припадає на систему кондиціонування, що є типовим для великих об'єктів, а також освітлення, яке працює протягом дня з найбільшим навантаженням в пікові години. ТРЦ 3 використовує комбіновану систему енергозабезпечення, що дозволяє підтримувати ефективність роботи при різних умовах.

Споживання енергії для кондиціонування та освітлення є значними, з піковими навантаженнями у денний час. Під час сонячних днів панелі забезпечували значний обсяг енергії, а дизельні генератори були включені при недостатній генерації або тривалих відключеннях.

Табл. 3 ілюструє сезонні коливання генерації електроенергії сонячними панелями. Дані показують залежність покриття енергопотреб ТРЦ від погодних умов: найвища ефективність досягається влітку, тоді як узимку потрібна значна підтримка резервних джерел.

Оцінка тривалості роботи системи під час симуляції блекаутів показала, що сонячні панелі здатні підтримувати основне навантаження за умови встановлення потужних станцій із номінальною потужністю, що перевищує пікові рівні споживання ТРЦ. Це робить систему ефективною для короткотривалих відключень, однак обмежує її продуктивність при тривалих збоях в енергопостачанні.

Використання дизельних генераторів пов'язане з великими викидами CO<sub>2</sub>, що є серйозною екологічною проблемою для торгових центрів, що прагнуть знизити свій екологічний слід. Для генератора потужністю 500 кВт, викиди CO<sub>2</sub> можуть становити приблизно 120–240 кг за годину роботи в залежності від ступеня навантаження.

Табл. 4 порівнює торгові центри за витратами на паливо, викидами CO<sub>2</sub> та часом роботи дизельного генератора в умовах резервного енергопостачання. ТРЦ 2 використовує лише дизельний генератор з висо-

кими витратами на пальне і значними викидами CO<sub>2</sub>. ТРЦ 3 має комбіновану систему, де витрати на пальне та викиди знижуються завдяки використанню сонячних панелей.

Генератори вимагають використання палива, що обмежує їхню економічну та екологічну доцільність. Система забезпечила безперервне енергопостачання на протязі тривалих періодів – до 24 годин та більше,

що робить її ефективною в умовах тривалих кризових ситуацій, однак зумовлює високі витрати на пальне та обслуговування. Впровадження відновлювальних джерел енергії та акумуляторних систем може значно зменшити витрати на пальне і викиди CO<sub>2</sub>.

У процесі дослідження встановлено, що важливу роль у процесі забезпечення надійності та ефективності енергопостачання відіграє комбінована система. Початкові

Таблиця 2

## Розподіл енергоспоживання для ТРЦ 1, ТРЦ 2 та ТРЦ 3

Проект	Система	Відсоток від загального споживання (%)	Середнє денне споживання (кВт-год)	Піковий період споживання	Загальне енергоспоживання кВт-год, рік
ТРЦ 1	Системи кондиціонування	35%	6,240,315	12:00–18:00	17,829,470
	Освітлення	25%	4,457,368	Постійно, 12:00–18:00	
	Сервісні зони (ліфти, ескалатори)	15%	2,674,421	Постійно	
	Обладнання магазинів	20%	3,565,894	Залежить від графіка магазинів	
	Інші технічні потреби	5%	891,474	Залежить від потреб	
ТРЦ 2	Системи кондиціонування	40%	3,120,157	11:00–17:00	7,800,393
	Освітлення	20%	1,560,079	Постійно, 15:00–21:00	
	Сервісні зони (ліфти, ескалатори)	15%	1,170,059	Постійно	
	Обладнання магазинів	22%	1,716,086	Залежить від графіка магазинів	
	Інші технічні потреби	3%	234,012	Залежить від потреб	
ТРЦ 3	Системи кондиціонування	38%	3,811,049	10:00–16:00	10,029,077
	Освітлення	22%	2,206,397	Постійно, 14:00–20:00	
	Сервісні зони (ліфти, ескалатори)	20%	2,005,815	Постійно	
	Обладнання магазинів	17%	1,704,943	Залежить від графіка магазинів	
	Інші технічні потреби	3%	300,872	Залежить від потреб	

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 3

## Виробництво енергії сонячними панелями

Проект	Період року	Енергія, вироблена сонячними панелями (МВт-год)	Покриття енергопотреб ТРЦ (%)
ТРЦ 1	Літо	0.44	8%
	Осінь	0.26	6%
	Зима	0.14	3%
	Весна	0.37	9%
ТРЦ 3	Літо	0.66	22%
	Осінь	0.39	15%
	Зима	0.21	9%
	Весна	0.55	25%

Джерело: результати дослідження авторів

Таблиця 4

Порівняння ТРЦ за витратами на пальне, викидами CO<sub>2</sub> та часом роботи дизельного генератора

ТРЦ	Тип джерела енергії	Витрати на пальне при 50% навантаженні (500 літрів на 10 годин)	Викиди CO <sub>2</sub> (кг на годину)
ТРЦ 2	Дизельний генератор	549 доларів	123 кг/год
ТРЦ 3	Сонячні панелі + дизель	450 доларів (з частковим використанням генератора)	100 кг/год (під час використання дизельного генератора)

Джерело: результати власного дослідження

інвестиції в установку таких систем будуть значними, проте вони швидко окупаються завдяки зниженню витрат на електроенергію та паливо. Системи на основі акумуляторів та сонячних панелей дозволяють зменшити потребу в дизельних генераторах, що знижує викиди CO<sub>2</sub> та витрати на паливо, покращуючи фінансові результати торгових центрів у довгостроковій перспективі.

Акумулятори дозволяють зберігати надлишкову енергію, згенеровану в період сонячної активності, що знижує використання дизельних генераторів. Під час несприятливих погодних умов або при тривалих відключеннях акумулятори можуть забезпечити енергопостачання без потреби в генераторах.

У разі зниження продуктивності сонячних панелей або за умов повного відключення електропостачання, акумулятори дозволяють підтримувати роботу основних систем, це зменшує витрати на дизельне паливо та знижує експлуатаційні витрати на резервні джерела енергії. Технології інтеграції акумуляторів до систем резервного живлення на вітчизняному ринку не є розповсюдженим явищем і вимагають додаткового дослідження.

ТРЦ 3 досягнув найбільшої річної генерації енергії серед трьох об'єктів – 1,8 МВт-год. Цей показник обумовлений використанням розширеної площі сонячних панелей, що дозволило значно знизити споживання енергії з централізованої мережі.

Також була досягнута найвища економія витрат на енергопостачання – 18%. Це стало можливим завдяки високій ефективності використання сонячної енергії та обмеженню часу роботи дизельних генераторів.

У табл. 5 подані ключові параметри енергосистем, що використовуються у торгових центрах 1, 2 та 3. Для кожного ТРЦ наведено тип джерела енергії, витрати на паливо, характеристики а також тривалість роботи резервних джерел.

Інтеграція сонячних панелей та акумуляторів, як у ТРЦ 1, є найбільш екологічним та ефективним рішенням із мінімальними викидами CO<sub>2</sub>. У порівнянні, комбінована система ТРЦ 3 дозволяє суттєво знизити витрати пального, тоді як дизельний генератор ТРЦ 2 має найвищий рівень екологічного впливу та витрат.

У табл. 6 проведено аналіз викидів CO<sub>2</sub> і операційних витрат для різних типів енергосистем.

Система з використанням сонячних панелей має найнижчий екологічний вплив і практично нульові операційні витрати, що робить її найбільш екологічно та економічно вигідною. Натомість дизельний генератор характеризується найвищими викидами CO<sub>2</sub> (1230 кг за 10 годин) і значними витратами, що підкреслює його екологічну неефективність. Табл. 7 порівнює ефективність систем енергозабезпечення в трьох ТРЦ.

Аналіз табл. 7 показує різні рівні ефективності енергозабезпечення в трьох ТРЦ, зокрема в залежності від типу використовуваної системи. ТРЦ 1 з сонячними панелями має високу ефективність при короткострокових відключеннях у теплу пору року та у світлі часи доби, але обмежену здатність забезпечувати енергопостачання в разі тривалих перерв у постачанні енергії та в холодну пору року.

ТРЦ 2, який використовує лише дизельний генератор, забезпечує стабільне енергопостачання в умовах тривалих відключень, однак це супроводжується високими витратами на паливо та обслуговування, що знижує економічну ефективність цієї системи.

ТРЦ 3 має комбіновану систему, що забезпечує оптимальний баланс між ефективністю та надійністю. Автоматичне переключення на дизельний генератор при відсутності сонячної енергії дозволяє мінімізувати залежність від одного джерела енергії, що підвищує загальну надійність енергозабезпечення. Табл. 8 демонструє надійність кожної системи в умовах відключень електроенергії.

ТРЦ 2 з дизельним генератором має найвищу надійність, оскільки генератор здатен працювати практично безперервно, що робить систему надійною навіть при тривалих відключеннях. Проте ця система потребує значних витрат на паливо та обслуговування, що може впливати на загальні експлуатаційні витрати. ТРЦ 1 що використовує сонячні панелі, показує найнижчий рівень стійкості до ризиків відключень. Також система обмежена відсутністю сонячного випромінювання, що знижує її ефективність у нічний час або в похмурі дні. ТРЦ 3 з комбінованою системою, яка включає сонячні панелі та дизельний генератор, демонструє високу надійність завдяки автоматичному переходу між джерелами енергії при необхідності. Це дозволяє забезпечити безперебійне енергопостачання навіть при зміні умов зовнішнього середовища або відсутності сонячної енергії. Таким чином, комбінована система є найбільш збалансованим варіантом для забезпечення безперебійного енергопостачання.

Табл. 9 демонструє економічну ефективність для кожного типу системи в розрізі досліджувальних торгових центрів.

ТРЦ 3 забезпечує значне зниження витрат на паливо в порівнянні з дизельним генератором в ТРЦ 2. Однак система в ТРЦ 1, яка використовує тільки сонячні панелі є більш екологічною, але її ефективність обмежена залежно від погодних умов і кількості сонячних днів. Комбіновані системи енергопостачання є найкращим вибором для торгових центрів, оскільки вони поєднують переваги сонячних панелей із резервним живленням від дизельних генераторів. Це дозволяє досягти балансу між стабільністю енергопостачання, екологічною ефективністю та економією витрат.

Необхідність обслуговування енергетичних систем – сонячних панелей та дизельних генераторів – є важливим аспектом в економічній оцінці. Однак навіть враховуючи витрати на технічне обслуговування, загальні витрати на експлуатацію комбінованої системи залишаються значно нижчими, ніж при використанні виключно дизельних генераторів. Сонячні панелі потребують мінімального обслуговування, переважно це періодична очистка панелей від пилу та бруду. Дизельні генератори мають більш високі витрати на технічне обслуговування, зокрема на заміну масла, фільтрів, перевірку системи охолодження та перевірку витрат палива.

**Висновки.** Результати цього дослідження узгоджуються із висновками, що інтеграція сонячних панелей у бізнес-центри дозволяє зменшити потребу в зовнішньому енергопостачанні на 30–40% та скоротити викиди CO<sub>2</sub> на 200 тонн щорічно.

Комбінування акумуляторних систем із сонячними панелями для підвищення тривалості автономної роботи енергетичних систем є ефективним рішенням. Така інтеграція дозволяє акумулювати енергію в періоди високої сонячної активності, що забезпечує

Таблиця 5

## Порівняння енергосистем у трьох ТРЦ – об'єктах дослідження

ТРЦ	Тип енергосистеми	Характеристики	Результати дослідження
ТРЦ 1	Сонячні панелі	1 МВт. Генерація сонячними панелями: до 9% потреб.	Мінімальні викиди CO <sub>2</sub> . Низький рівень енергонезалежності.
ТРЦ 2	Дизельний генератор	Потужність 500 кВт. Витрати пального: 500 л/10 годин. Викиди: 1230 кг CO <sub>2</sub> /10 годин.	Високий рівень екологічного впливу та високі експлуатаційні витрати.
ТРЦ 3	Сонячні панелі + дизельний генератор	1.5 МВт. Панелі генерують до 25% потреб. Генератор: 500 кВт.	Комбінована система знижує витрати пального до 41 л/10 годин. Викиди CO <sub>2</sub> : до 1000 кг/10 годин. Найвищий рівень енергонезалежності.

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 6

## Порівняння екологічного впливу

Тип системи	Викиди CO <sub>2</sub> (кг/10 годин)	Операційні витрати (грн/10 годин)	Рівень екологічності	Екологічні переваги
Дизельний генератор	1230	22 500 грн	Високий вплив (негативний)	Найбільші екологічні недоліки через високі викиди CO <sub>2</sub> та значні витрати пального.
Сонячні панелі + дизель	1000	18 450 грн	Середній вплив	Зниження використання пального, менші викиди CO <sub>2</sub> завдяки використанню сонячної енергії.

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 7

## Порівняння ефективності систем енергозабезпечення в трьох ТРЦ

ТРЦ	Тип системи	Ефективність
ТРЦ 1	Сонячні панелі	Висока ефективність при короткострокових відключеннях, але обмежена в умовах тривалих відключень.
ТРЦ 2	Дизельний генератор	Стабільне енергопостачання в умовах тривалих відключень, але з високими витратами на пальне та обслуговування.
ТРЦ 3	Комбінована система (сонячні панелі + дизельний генератор)	Оптимальний баланс між ефективністю та надійністю, з автоматичним переходом на генератор при відсутності сонячної енергії.

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 8

## Порівняння надійності систем енергозабезпечення в трьох ТРЦ

ТРЦ	Тип системи	Надійність
ТРЦ 1	Сонячні панелі	Надійність для короткострокових відключень, обмежена відсутністю сонячного випромінювання.
ТРЦ 2	Дизельний генератор	Найбільш надійна система для тривалих відключень, здатна працювати безперервно протягом кількох діб.
ТРЦ 3	Комбінована система (сонячні панелі + дизельний генератор)	Висока надійність завдяки автоматичному переходу між джерелами енергії при необхідності.

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 9

## Порівняння економічної ефективності систем енергозабезпечення в трьох ТРЦ

Проект	Тип системи	Економічна ефективність
ТРЦ 1	Сонячні панелі	Висока первісна вартість установки, але низькі експлуатаційні витрати завдяки відсутності пального та мінімальному обслуговуванню. Окупність залежить від кількості сонячних днів.
ТРЦ 2	Дизельний генератор	Помірні капітальні витрати, але висока вартість пального та обслуговування. Невигідне в довгостроковій перспективі через постійні витрати.
ТРЦ 3	Комбінована система (сонячні панелі + дизельний генератор)	Високі початкові витрати на встановлення сонячних панелей і генератора, але значне зниження витрат на пальне при використанні сонячної енергії. Оптимальний варіант для довгострокових вкладень.

Джерело: розроблено авторами

безперебійне живлення вночі або в умовах хмарної погоди, коли сонячна енергія не доступна. Завдяки цьому зменшується потреба у використанні дизельних генераторів, що сприяє значному скороченню витрат на паливо та знижує рівень викидів CO<sub>2</sub>. Це рішення є дуже важливим для критичних інфраструктур, оскільки підвищує ефективність і зменшує залежність від традиційних джерел енергії, що є важливим аспектом у контексті зменшення впливу на навколишнє середовище та економії витрат. За рахунок швидкого розвитку технологій акумулятори стають не лише більш енергоефективними, але й екологічно безпечними.

Фінансовий аналіз демонструє, що інвестиції в сонячні панелі для торгових центрів можуть окупилися в середньому за 5–7 років, залежно від умов використання та обсягів генерації енергії. Такі рішення зменшують залежність від централізованого енергопостачання та значно скорочують витрати на енергію. Економічна віддача від впровадження подібних систем напряму залежить від грамотного технічного проектування, включаючи оптимальне розміщення панелей, правильний підбір акумуляторів і систем управління. Це вказує на необхідність врахування регіональних особливостей, таких як рівень інсоляції, для підвищення ефективності систем. Таким чином, фінансові переваги комбінованих систем можуть бути реалізовані лише за умов ретельного планування та проектування.

Висновки про зменшення залежності від дизельних генераторів, отримані в рамках цього дослідження підтверджують, що хоча дизельні генератори залишаються необхідним резервним джерелом енергії, їхній високий екологічний вплив робить критично важливим зменшення частоти їх використання. Це узгоджується із висновками про необхідність інтеграції сонячних панелей та акумуляторних систем, які дозволяють знизити кількість запусків генераторів.

Отримані результати дослідження підтвердили важливість комбінованих систем для торгових центрів. Вони забезпечують стабільне енергопостачання, скорочують витрати та мінімізують екологічний вплив. Результати узгоджуються з тенденціями сучасної науки, зокрема зростаючим інтересом до відновлювальних джерел енергії як способу зменшення вуглецевого сліду.

Результати дослідження показали, що оптимізація енергопостачання торгових центрів через впровадження комбінованих систем дозволяє ефективно вирішувати проблему енергетичної стабільності, знижуючи витрати та екологічний вплив.

Встановлено, що використання сонячних панелей дозволяє покривати до 25% денного енергоспоживання залежно від пори року навіть при встановленні достатньо компактних станцій потужністю 1,5 МВт.

Наприклад, у ТРЦ 3 середня генерація становила 1,81 МВт·год на рік, що дозволило зменшити залежність від дизельних генераторів на 18%.

Дизельні генератори залишаються важливим компонентом системи резервного живлення. У ТРЦ 2 генератори забезпечували безперебійну роботу протягом 12–15 годин, але супроводжувалися значними витратами на паливо (500 літрів за 10 годин роботи) та високими викидами CO<sub>2</sub> (до 1230 кг за 10 годин).

Таким чином, комбіновані системи, що включають сонячні панелі та дизельні генератори, дозволяють досягти оптимального балансу між економічністю, надійністю та екологічністю. Ця система показала переваги у гнучкості та стабільності енергопостачання. Вона була здатна підтримувати роботу критично важливих систем торгового центру протягом тривалих періодів завдяки використанню обох джерел, забезпечуючи економію пального та скорочення викидів забруднюючих речовин порівняно з виключно генераторною системою.

Ефективне впровадження систем резервного живлення у ТРЦ потребує застосування сучасних управлінських практик, спрямованих на підвищення енергетичної стійкості та зменшення залежності від централізованих мереж. Ключовим аспектом є стратегічне планування, яке включає вибір оптимальних джерел резервного живлення та їх інтеграцію у загальну енергетичну інфраструктуру. Для цього необхідно провести техніко-економічне обґрунтування, що охоплює аналіз витрат, екологічного впливу, довговічності та надійності обраних систем.

Механізм реалізації таких проектів передбачає застосування моделей гнучкого управління для адаптації до змінних зовнішніх умов, таких як коливання попиту на електроенергію та непередбачуваність кризових ситуацій (наприклад, блекауту). Успішне управління включає координацію між технічними службами, операційними підрозділами та постачальниками обладнання. Особлива увага має бути приділена моніторингу ефективності систем у реальному часі та впровадженню технологій енергоменеджменту, які дозволяють забезпечити оптимальний розподіл енергоресурсів, знизити витрати на паливо та зменшити викиди CO<sub>2</sub>.

Подальші дослідження мають зосередитися на вивченні ефективності впровадження альтернативних джерел енергії, таких як акумулятори та вітрові турбіни, для покращення генерації енергії в різних умовах. Крім того, необхідно розглянути можливість використання нових типів акумуляторів із підвищеною ємністю, що забезпечить тривалішу автономну роботу та знизить залежність від традиційних джерел енергії. Важливим напрямком є також аналіз впливу кліматичних змін на інсоляцію, щоб передбачити довгострокову продуктивність сонячних панелей у різних регіонах.

#### Література:

1. Amadi H.N. *Comparative Cost Analysis between Solar PV Energy and Diesel Generator as a Power Supply*. 2024. URL: [https://www.researchgate.net/publication/380148789\\_Comparative\\_Cost\\_Analysis\\_between\\_Solar\\_PV\\_Energy\\_and\\_Diesel\\_Generator\\_as\\_a\\_Power\\_Supply](https://www.researchgate.net/publication/380148789_Comparative_Cost_Analysis_between_Solar_PV_Energy_and_Diesel_Generator_as_a_Power_Supply) (дата звернення: 25.11.2024).
2. Broughton J., Ybarra C. and Nyer P. The Economics of Residential Solar Panels: A Comparison of Energy Charges for Different Load Profiles, Rate Plans, and Panel Orientations. *American Journal of Industrial and Business Management*. 2022. № 12. P. 180–194.

3. Elomari Y., Norouzi M., Marín-Genescà M., Fernández A., Boer D. Integration of Solar Photovoltaic Systems into Power Networks: A Scientific Evolution Analysis. *Sustainability*. 2022. № 14. URL: <https://doi.org/10.3390/su14159249> (дата звернення: 26.11.2024).
4. Gayen D., Chatterjee R. & Roy S. A review on environmental impacts of renewable energy for sustainable development. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2024. № 21. P. 5285–5310.
5. Hoshen J. The Impact of Time-of-Use Electricity Rate Plans on Solar Array Installation Breakeven Period. *Open Journal of Business and Management*. 2023. № 11. P. 1402–1416.
6. Kumar S. Economic Optimization and Performance Enhancement of Rooftop Solar Power Systems Using Concentrated Solar Technology and Advanced Materials. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2024. № 2(7). P. 949–959.
7. Liu Y., Zhang, R., Wang, J., & Wang, Y. Current and future lithium-ion battery manufacturing. *iScience*. 2021. № 24(4). URL: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102332> (дата звернення: 26.11.2024).
8. Marqusee J., & Jenket D. Reliability of emergency and standby diesel generators: Impact on energy resiliency solutions. *Applied Energy*. 2020. No. 268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114918> (дата звернення: 01.12.2024).
9. Rama Ramalakshmi V., Muniraj R., Jarin T. Solar Based Smart EV Charging Station with Smart Battery Management System. *7th International Conference on Circuit Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, Kollam, India. 2024. P. 1717–1722.
10. Salehi Boroujeni M., Ofetotse E.L., & Nebel J.C. Backup solar system for reliable power supply during unplanned power outages. *Journal of Energy Storage*. 2022. № 47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103653> (дата звернення: 01.12.2024).
11. Takahashi R., Umemura A. and Tamura J. Stability Enhancement of Small-Scale Power Grid with Renewable Power Sources by Variable Speed Diesel Power Plant. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2020. № 8. P. 1–17.

Стаття надійшла до редакції 10.12.2024

Стаття опублікована 21.01.2025