



Low Carbon Ukraine
Policy advice on low-carbon
policies for Ukraine

Supported by:



on the basis of a decision
by the German Bundestag

Серія політичних презентацій [PB/01/2023]

Електроенергія в часи відключень

Сонячні панелі, системи накопичення енергії та дизельні генератори

Дінара Сапарова
Рувен Штуббе
Павел Білек



Берлін/Київ, 2023

Implemented by



Про Low Carbon Ukraine

Low Carbon Ukraine – це проєкт, який надає постійну підтримку уряду України шляхом підготовки необхідного аналізу та пропозицій, з метою стимулювання переходу до низьковуглецевої економіки.

Цей проєкт є частиною Міжнародної кліматичної ініціативи (IKI) та фінансується Федеральним міністерством економіки та захисту клімату (BMWK) відповідно до рішення Бундестагу ФРН.

Подяка

Ми вдячні за допомогу Анастасії Верещинській та іншим колегам із Фонду «Енергетична Дія для України» за надання даних про припущення щодо вартості та споживання електроенергії для анонімної вибірки шкіл в Україні, та за плідні обговорення та коментарі щодо попередніх проєктів даного дослідження.

Low Carbon Ukraine

c/o BE Berlin Economics GmbH

Schillerstr. 59

D-10627 Berlin

Тел.: +49 30 / 20 61 34 64 0

Факс: +49 30 / 20 61 34 64 9

info@berlin-economics.com

www.lowcarbonukraine.com

Дата подання: 24 лютого 2023 р.

© 2023 BE Berlin Economics GmbH. Всі права застережено.

1 Резюме

Цілеспрямовані атаки РФ на цивільну інфраструктуру України призвели до значних відключень електроенергії. Як і решта країни, українські школи страждають від частих відключень, що заважає навчанню мільйонів учнів. У цьому дослідженні на прикладі однієї української школи в Києві оцінюється, як оптимальне за вартістю поєднання сонячних фотоелектричних панелей (далі – сонячних панелей), систем накопичення енергії (далі – систем накопичення) і дизельних генераторів може пом'якшувати вплив мережевих відключень електроенергії. Висновки вказують на те, що:

- За поточних умов і різноманітних протестованих сценаріїв **економічно вигідно встановлювати сонячні панелі та системи накопичення**, щоб пом'якшити вплив відключень та забезпечити безперервне постачання електроенергії.
- **Оптимальна за витратами система** включає **сонячні панелі, системи накопичення** та певну потужність **дизельних генераторів**, тоді як встановлення лише дизельних генераторів є дорожчим через витрати на паливо.
- Загальні річні витрати на **оптимальну за витратами комбіновану систему** складають **18 тис. євро**, тоді як **сценарій, що передбачає встановлення виключно дизельних генераторів**, обійдеться в **30 тис. євро**. Таким чином, використання **комбінованої системи** може **заощадити майже 40% річних витрат**.
- Дизельні генератори в основному діють як резервна потужність для сонячних панелей і систем накопичення у випадках тривалого зниження сонячного випромінювання. Порівняно зі сценарієм, що передбачає встановлення виключно дизельних генераторів, у сценарії оптимальної вартості потрібно **менше однієї третини дизельного палива**, що дозволяє **заощадити витрати та зменшити викиди**.
- Ці висновки справедливі в сучасному контексті низьких регульованих тарифів на електроенергію для населення та відсутності достатньо високих цін на викиди вуглецю. Економія від встановлення сонячних панелей і систем накопичення була б значно вищою у випадку наявності тарифів, що покривають витрати, і вищих цін на викиди вуглецю.
- Хоча початкові інвестиції є вищими для сонячних панелей та систем накопичення, довший термін служби порівняно з дизельними генераторами може допомогти забезпечити більшу стійкість і надійність.

2 Вступ

Енергетична безпека є пріоритетним питанням політичного порядку денного в Україні з часу російського вторгнення в лютому 2022 року. Триваючі атаки на енергетичну інфраструктуру болісно підкреслюють переваги поступового переходу до **більш децентралізованої енергетичної системи для посилення її стійкості**. Президент Володимир Зеленський і прем'єр-міністр Денис Шмигаль назвали цей перехід ключовим фактором як для зменшення вразливості до атак у коротко- та середньостроковій перспективі, так і для побудови сучасної та «зеленої» енергетичної системи в середньо- та довгостроковій перспективі.¹ Слід зазначити, що цей намір узгоджується із загальним майбутнім інтеграційним шляхом України до Європейського Союзу.

На даний момент однією з важливих потреб громадян і бізнесу України є **зменшення частих перебоїв електропостачання за рахунок використання альтернативних джерел** у разі мережевих відключень. Через цілеспрямовані атаки РФ на цивільну енергетичну інфраструктуру Україна стикається з **20-30% дефіцитом електроенергії, що супроводжується постійними відключеннями електроенергії та обмеженнями споживання**. Для пом'якшення наслідків таких відключень електроенергії домогосподарства та підприємства вже використовують різні засоби безперебійного розподіленого енергоживлення.

Атаки на енергетичну систему глибоко впливають практично на всі сфери цивільного життя. Серед багатьох інших сфер, **освіта**, яка є життєво важливою основою будь-якого сучасного суспільства, **значно постраждала через загарбницьку війну Росії**, внаслідок якої понад **п'ять мільйонів дітей мають обмежений доступ до освіти**.² Навіть ті школи, які безпосередньо не постраждали від артилерійських, ракетних обстрілів та атак дронами, страждають від перебоїв з електро- та теплопостачанням.

У цьому контексті дане **дослідження порівнює кілька альтернативних варіантів безперебійного електропостачання української школи**. Хоча це дослідження зосереджено на будівлі школи, загальні висновки залишаються дійсними для інших типів подібних громадських, комерційних або житлових споживачів. **Розподіленими джерелами електроенергії, які розглядаються в аналізі, є сонячні панелі, системи накопичення та дизельні генератори**. Передбачається, що ці технології доповнюватимуть мережеве електропостачання, що наразі характеризується частими перебоями. **Дослідження має на меті знайти оптимальне з точки зору вартості поєднання цих технологій задля задоволення потреб в електроенергії однієї репрезентативної школи в Києві**. Графік відключень також наближено до реальних умов у Києві.

Якщо припустити, що відключення електроенергії становить близько 70% або близько 8 годин на день, поєднання сонячних панелей, систем накопичення та дизельних генераторів виявляється оптимальним за витратами сценарієм для доповнення ненадійного мережевого електропостачання. У цьому сценарії дизельні генератори в

¹ <https://www.president.gov.ua/en/news/vistup-prezidenta-zi-shorichnim-poslannyam-do-verhovnoyi-rad-80113>;
<https://www.kmu.gov.ua/en/news/pobudova-detsentralizovanoi-enerhosystemy-zrobyt-ii-mensh-vrazlyvoiu-do-vorozhykh-atak-premier-ministr>

² <https://www.unicef.org/press-releases/11-months-war-ukraine-have-disrupted-education-more-five-million-children>

основному функціонують як резервна потужність для сонячних панелей та систем накопичення у випадках довготривалого зменшення сонячного випромінення. Порівняно зі сценарієм, що передбачає використання виключно дизельних генераторів, у сценарії оптимальної вартості потрібно менше однієї третини дизельного палива, що зменшує загальні річні витрати майже на 40%.

Незважаючи на те, що сценарій лише з сонячними панелями та системами накопичення дорожчий, ніж оптимальна з точки зору витрат комбінована система, адже він вимагає значно більше сонячних панелей і систем накопичення, але матиме трохи нижчі загальні річні витрати ніж ті, що прогножуються за сценарію, що передбачає використання виключно дизельних генераторів.

Таким чином, в **обох сценаріях із сонячними панелями та системами накопичення економія на операційних витратах** (зменшене споживання дизельного палива) переважає більш **високі першочергові витрати на початкові інвестиції**. Це справедливо навіть у поточному контексті низьких регульованих тарифів на електроенергію для населення та відсутності достатньо високих цін на викиди на вуглець. В умовах тарифів на електроенергію, що покривали б витрати, і вищих цін на викиди вуглець – чого можна було б обґрунтовано очікувати в контексті шляху України на вступ до ЄС у найближчі роки – економія від встановлення сонячних панелей і систем накопичення була б навіть більшою, ніж розраховано тут.

3 Підхід, міркування та сценарії

У дослідженні аналізуються кілька сценаріїв електропостачання репрезентативної школи в Києві з максимальною кількістю учнів 600 осіб. Погодинний стандартний профіль навантаження для німецької школи було адаптовано, щоб відображати український навчальний рік і сезон канікул, і змінено, щоб відповідати місячним потребам в електроенергії для української школи.

3.1 Відключення електроенергії

Енергетична система України дуже централізована. До війни понад 50% електроенергії постачалося чотирма великими атомними електростанціями та передавалося кількома лініями надвисокої напруги до основних центрів споживання, таких як Київ. Таким чином, цілеспрямовані атаки на енергетичну інфраструктуру призвели до великих перебоїв у постачанні електроенергії. Відключення можна поділити на планові та екстрені. Планові відключення плануються на заздалегідь визначений період часу, а інформація про них публікується на веб-сайті постачальника електроенергії. Ці відключення мають на меті збалансувати роботу системи, наприклад, коли ремонтуються пошкоджені лінії електропередачі. Проте екстрені відключення є непередбачуваними надзвичайними ситуаціями відразу після російських атак.

Для цього аналізу відключення розподіляються випадковим чином із типовою тривалістю від чотирьох до семи годин і частотою, яка відповідає загальному рівню відключень у 70%. Це відображає поточні заплановані рівні відключень у Києві із середньою доступністю мережевої електроенергії близько восьми годин на день (див. Рис. 1 нижче). Оскільки

можливі додаткові екстрені відключення через триваючі атаки на енергетичну інфраструктуру, рандомізований графік відключень наближений до поточних реалій.

Рис. 1. Приклад графіка відключень електроенергії протягом одного тижня (Київ)

Часові проміжки	00-01	01-02	02-03	03-04	04-05	05-06	06-07	07-08	08-09	09-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24
Понеділок	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗			✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗			✗	✗	✗	✗	✗	✗
Вівторок	✗			✗	✗	✗	✗	✗	✗				✗	✗	✗	✗	✗	✗				✗	✗	✗
Середа	✗	✗	✗	✗			✗	✗	✗	✗	✗	✗				✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗		
Четвер	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗			✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗			✗	✗	✗	✗	✗	✗
П'ятниця	✗			✗	✗	✗	✗	✗	✗				✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗			✗	✗	✗
Субота	✗	✗	✗	✗			✗	✗	✗	✗	✗	✗				✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗		
Неділя	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗			✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗			✗	✗	✗	✗	✗	✗

Світло є
 Можливо відключення
 Світла немає

Джерело: ДТЕК Київські електромережі, 2023

3.2 Технології

У цьому дослідженні зроблено спробу оцінити економічну доцільність використання сонячних панелей і систем накопичення як альтернативного або додаткового децентралізованого джерела живлення в порівнянні з традиційними дизельними генераторами. Таким чином, є такі можливі технологічні варіанти для доповнення мережевого електропостачання, що часто переривається:

Рис. 2. Технології, розглянуті в рамках дослідження



* з перервами, що відображають типову тривалість і частоту поточних відключень
Джерело: власна ілюстрація

Дизельні генератори є відомим і досить поширеним рішенням для безперебійного електропостачання. Вони характеризуються відносно низькою початковою вартістю покупки. Однак для роботи генераторів потрібне паливо, що створює постійні

експлуатаційні витрати. Враховуючи нещодавнє підвищення та загальну волатильність цін на паливо, це зменшує загальну привабливість дизельних генераторів для відносно частого виробництва електроенергії, тобто в контексті частих відключень. З іншого боку, дизельні генератори забезпечують більш надійне електропостачання незалежно від погодних умов. Цей недолік можна частково усунути для сонячних панелей шляхом додавання систем накопичення.

Падіння цін на **системи накопичення та сонячні панелі** було постійною тенденцією протягом останнього десятиліття (зі зниженням на понад 80%), що дозволило цим технологіям стати конкурентоспроможними в порівнянні з традиційними технологіями на основі викопного палива. Загалом, сонячні панелі мають вищі капітальні витрати, ніж генератори, особливо в поєднанні з акумуляторними системами накопичення енергії. Однак експлуатаційні витрати дуже низькі, а очікуваний термін служби сонячних панелей досить довгий (20-25 років) порівняно з дизельними генераторами (зазвичай близько 8-10 років).

Детальну інформацію про технології та витрати на паливо, а також інші техніко-економічні припущення можна знайти в Додатку А.

3.3 Сценарії

На основі технологій, представлених вище, розроблено три сценарії для оцінки різних варіантів децентралізованого виробництва електроенергії:

Табл. 1. Огляд сценаріїв

Назва сценарію	Лише дизельні генератори	Лише сонячні панелі та системи накопичення	Оптимальна за витратами комбінована система
Мережеве електропостачання*	✓	✓	✓
Дизельні генератори	✓		✓
Сонячні панелі		✓	✓
Системи накопичення		✓	✓

* з перервами, що відображають типову тривалість і частоту поточних відключень
Джерело: власна ілюстрація

Усі три сценарії аналізуються за допомогою спеціально створеної техніко-економічної моделі енергетичної системи, яка спільно оптимізує інвестиції (у дизельні генератори, сонячні панелі та системи накопичення) і погодинний відпуск електроенергії для задоволення попиту на електроенергію протягом повного навчального року з вересня по серпень.

4 Результати

У цьому розділі підсумовуються результати моделювання для розглянутих сценаріїв. Встановлено, що **поєднання сонячних панелей, систем накопичення і дизельних генераторів є оптимальним за вартістю** як доповнення до ненадійного мережевого електропостачання. У цьому сценарії **дизельні генератори** в основному **функціонують як резервна потужність для сонячних панелей і систем накопичення** у випадках тривалого зниження сонячного випромінювання. Порівняно зі сценарієм, що передбачає встановлення виключно дизельних генераторів, для оптимального за витратами сценарію потрібно менше однієї третини дизельного палива, що зменшує загальні річні витрати майже на 40%.

Незважаючи на те, що сценарій, що передбачає встановлення лише сонячних панелей та системам накопичення, дорожчий ніж оптимальний за вартістю сценарій (адже потребує значно більше сонячних панелей і систем накопичення), він все ж трохи дешевший з точки зору загальних річних витрат, ніж сценарій, що передбачає використання лише дизельних генераторів.

4.1 Встановлена потужність

Поєднання **сонячних панелей потужністю 26 кВт, дизельних генераторів потужністю 25 кВт і систем накопичення ємністю 130 кВт-год** вважається **оптимальним з точки зору витрат** для забезпечення попиту на електроенергію даної школи (пікове річне навантаження 43 кВт). Цей мікс потужностей відображає комбінацію, яка повністю задовольняє попит і дозволяє уникнути відключень за найменших витрат. Якщо **тільки дизельні генератори** доповнюють мережеве електропостачання, то їх встановлена потужність мала б досягати **42 кВт**. У сценарії, що передбачає використання лише **сонячних панелей та систем накопичення**, потужність становить **69 кВт та 814 кВт-год** відповідно. Потрібна більша ємність систем накопичення через переривчастий характер постачання сонячної енергії.

Табл. 2. Встановлена потужність

	Лише дизельні генератори	Лише сонячні панелі та системи накопичення	Оптимальна за витратами комбінована система
Дизельні генератори (кВт)	42	-	25
Сонячні панелі (кВт)	-	69	26
Системи накопичення (кВт-год)	-	814	130

Джерело: власне моделювання та розрахунки

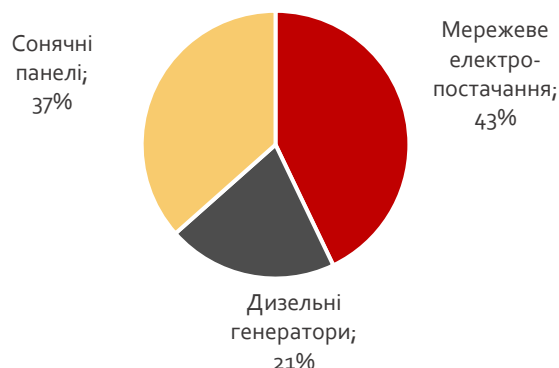
У сценарії, що передбачає повне відключення від мережевого електропостачання (будь ласка, див. Додаток В для більш детальної інформації), оптимальна з точки зору витрат система характеризується більшою встановленою потужністю сонячних панелей (53 кВт) і дизельних генераторів (33 кВт), а також зменшеною ємністю систем накопичення (48 кВт-год). Збільшення потужностей генерації відображає відсутність (навіть переривчастого) мережевого електропостачання, а також необхідність враховувати різну доступність сонячної енергії, особливо взимку, за відсутності довгострокових технологій сезонного зберігання енергії.

4.2 Розподіл генерації

Незважаючи на те, що електроенергія доступна лише близько 8 годин на день, **електроенергія з мережі покриває понад 40% загального споживання електроенергії** за сценарієм оптимальної вартості (Рис. 3). Це пов'язано з тим, що **електроенергія з мережі** також використовується **для заряджання систем накопичення** у ті години, коли вона доступна (як показано кривою на Рис. 6). Це узгоджується з моделями, що працюють в реальних умовах, коли українці заряджають свої портативні зарядні пристрої протягом тих годин, коли доступне електропостачання. **Сонячні панелі** забезпечують другу за величиною частку споживаної енергії – **близько 40%**. Подібно до мережевого електропостачання, системи накопичення сприяють перенесенню сонячної генерації на ті години, коли це найбільше потрібно.

Дизельні генератори, за сценарієм оптимальної вартості, **покривають трохи більше 20%** потреб в електроенергії та в основному **функціонують як резервна потужність для сонячних панелей і систем накопичення** у випадках тривалих періодів зменшення сонячного випромінювання. Про це свідчить той факт, що їх коефіцієнт використання потужності становить лише 5,4%. Порівняно зі сценарієм, що передбачає використання лише дизельних генераторів, у сценарії оптимальної вартості потрібно менше однієї третини дизельного палива.

Рис. 3. Розподіл генерації за типом (оптимальний за витратами сценарій)



Джерело: власне моделювання та розрахунки

4.3 Інвестиції та загальні річні витрати

Незважаючи на те, що сценарій, що передбачає використання лише сонячних панелей та систем накопичення є дорожчим, ніж оптимальний за витратами сценарій комбінованої системи, оскільки вимагає значно більших початкових інвестицій у сонячні панелі та системи накопичення, за рівнем загальних річних витрат він залишається трохи нижчим ніж сценарій, що передбачає використання лише дизельних генераторів. Таким чином, **в обох сценаріях із сонячними панелями та системами накопичення економія на операційних витратах (зменшене споживання дизельного палива) з лишком переважає більші першочергові витрати на початкові інвестиції**. Додаткові вигоди від подачі електроенергії до мережі (роль просьюмера) можуть додатково збільшити фінансову привабливість.

Рис. 4. Інвестиційні витрати

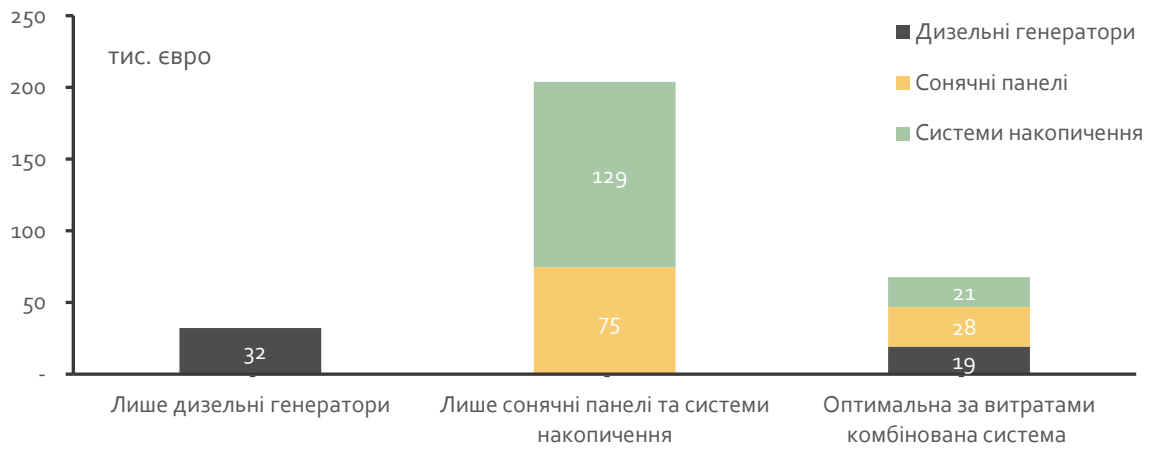
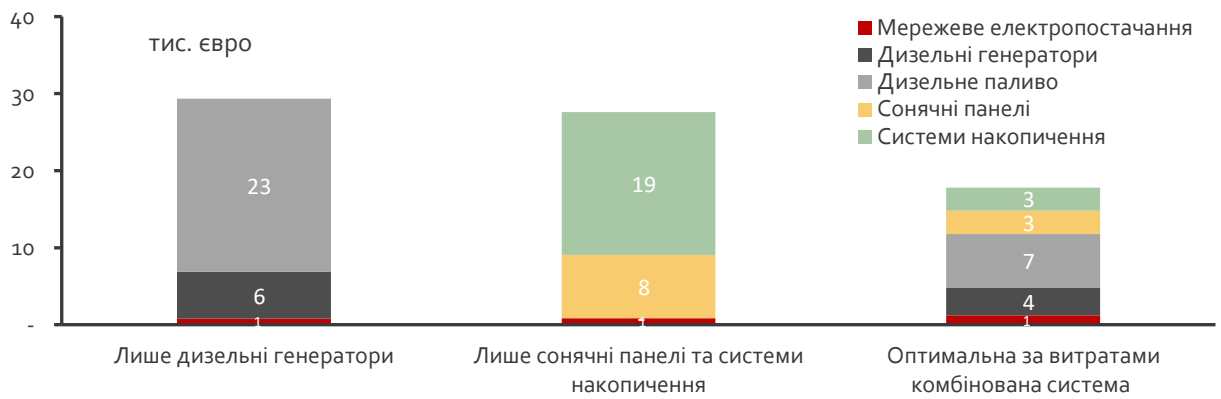
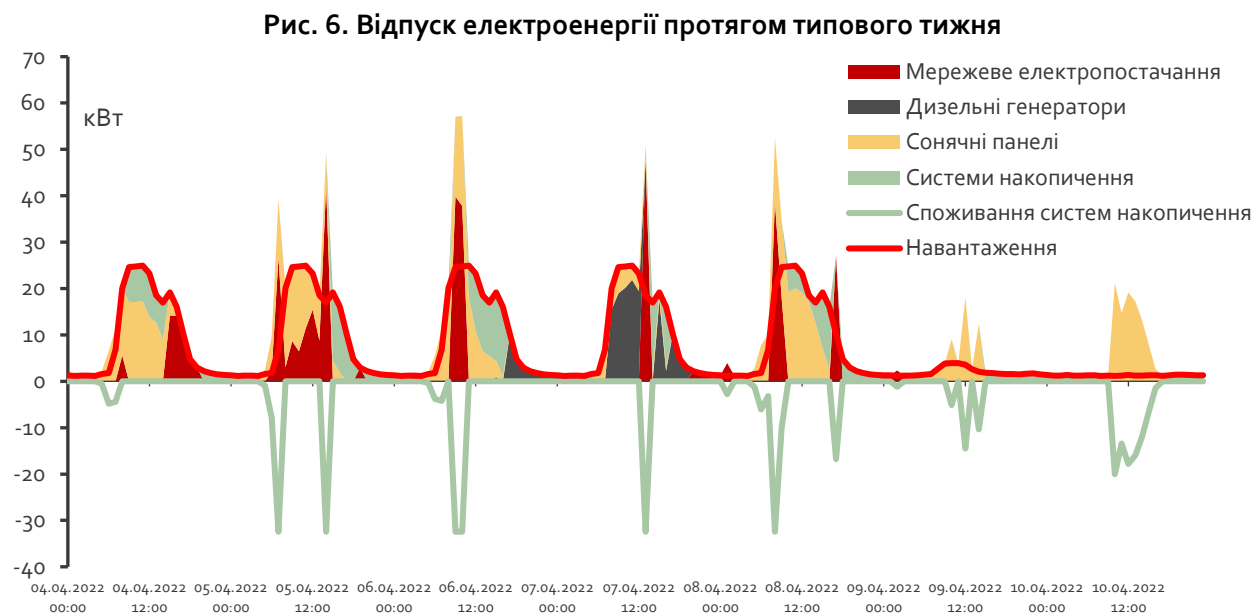


Рис. 5. Загальні річні витрати



4.4 Погодинний відпуск електроенергії (типовий тиждень)

Типовий тиждень (для цілей даного дослідження був обраний тиждень з 4 квітня по 10 квітня) показує, що відпуск електроенергії протягом денних годин у робочі дні вищий, і більша частина електроенергії подається мережею та генерується сонячними панелями. Дизельні генератори і системи накопичення працюють переважно у вечірні/нічні години або менш сонячні дні.



Джерело: власне моделювання та розрахунки

5 Висновки

Війна Росії в Україні обмежила доступ до освіти для понад п'яти мільйонів дітей.³ Спробам повернути дітей до діючих шкіл заважають часті перебої з електропостачанням через триваючі атаки Росії на цивільну енергетичну інфраструктуру.

Аналіз показує, що поєднання сонячних панелей, систем накопичення і дизельних генераторів є найбільш вдалим варіантом для безперебійного постачання електроенергії до однієї типової школи в Києві. Ця комбінація здатна зменшити сукупні витрати, надійно задовольняючи потреби школи в електроенергії в будь-який час. Економія на операційних витратах, тобто зменшення споживання дизельного палива, з лишком переважає вищі першочергові витрати на початкові інвестиції в сонячні панелі та системи накопичення.

Це справедливо навіть у поточному контексті низьких регульованих тарифів на електроенергію для населення та відсутності достатньо високих цін на викиди вуглецю. В умовах тарифів на електроенергію, що покриватимуть витрати, і вищих цін на викиди вуглецю – чого можна було б обґрунтовано очікувати в контексті шляху України на вступ до ЄС у найближчі роки – економія від встановлення сонячних панелей і систем накопичення була б навіть більшою, ніж розраховано тут. Розподілена сонячна генерація

³ <https://www.unicef.org/press-releases/11-months-war-ukraine-have-disrupted-education-more-five-million-children>

та системи накопичення для українських шкіл можуть стати першим кроком до більш децентралізованої, стійкої та орієнтованої на майбутнє української енергетичної системи.

Додаток А – Підхід до моделювання та техніко-економічні припущення

Аналіз було проведено за допомогою створеної на замовлення техніко-економічної моделі енергетичної системи, заснованої на системі моделювання енергетичних систем з відкритим кодом Calliope.⁴ Модель спільно оптимізує інвестиції в сонячні панелі, системи накопичення та дизельні генератори, погодинний відпуск електроенергії з дизельних генераторів та сонячних панелей, споживання систем накопичення та їхній відпуск електроенергії, а також мережеве електропостачання для задоволення попиту на електроенергію протягом повного навчального року (8760 годин) від вересня по серпень.

Погодинна потреба в електроенергії протягом усіх 8760 годин базується на чвертьгодинному стандартному профілі навантаження для німецької школи від VDEW.⁵ Спочатку, стандартний профіль навантаження було скориговано до умов українського навчального року, що відображає відповідні будні, вихідні та святкові канікули за рік з 1 вересня 2021 року по 31 серпня 2022 року. Як другий крок, профіль навантаження було змінено відповідно до фактичного місячного навантаження у 2021 році школи в м. Києві, що була прийнята за типову в цілях даного дослідження.

Аналіз враховує рівні відключень від мережі, близькі до статус-кво, коли мережеве електропостачання доступне 2721 годину на рік (~30%), а школа повністю покладається на розподілені енергоресурси протягом 6039 годин (~70%). Розподіл відключень і їх тривалість були рандомізовані із типовою тривалістю від чотирьох до семи годин, щоб відобразити реальні умови (див. Розділ 3.1). Вартість електроенергії в мережах базується на поточному регульованому тарифі для малих побутових споживачів в Україні.

Для змодельованих технологій генерації та зберігання компоненти витрат можна диференціювати на капітальні витрати (тобто витрати на початкові інвестиції), з одного боку, і витрати на експлуатацію та обслуговування (включаючи витрати на паливо) з іншого боку. Використано припущення щодо вартості обладнання для житлових будинків з урахуванням 20% податку на додану вартість в Україні.

- Витрати на сонячні панелі для побутових споживачів та літій-іонні системи накопичення для мережі змінного струму узяті з оцінок Національної лабораторії відновлюваної енергії (NREL) за 2 квартал 2022 року.⁶ Вартість послуг з проектування, будівництва та монтажу надано Фондом «Енергетична Дія для України».
- Витрати на дизельні генератори взяті з дослідження Фонду Рокфеллера щодо детальних моделей витрат і контрольних показників для електрифікації громад.⁷

⁴ Pfenninger, S., & Pickering, B. (2018). Calliope: a multi-scale energy systems modelling framework. *Journal of Open Source Software*, 3(29), 825.

⁵ Fünfgeld, C., & Tiedemann, R. (2000). *Anwendung der repräsentativen VDEW-Lastprofile: step-by-step*. VDEW.

⁶ <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/83586.pdf>

⁷ <https://www.rockefellerfoundation.org/wp-content/uploads/2020/12/EE-Download-Opportunity-Datasheet-Detailed-Cost-Models-and-Benchmarks.pdf>

- Вартість дизельного палива розрахована на основі середньої комерційної ціни на дизельне паливо в Україні станом на 26 січня 2023 року⁸.

Додаток В – Сценарій, що передбачає відсутність мережевого електропостачання (оптимальної вартості)

Рис. 7. Встановлена потужність

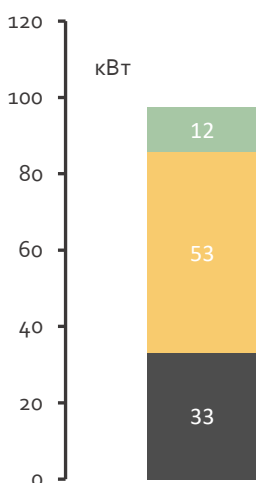


Рис. 8. Вартість інвестицій

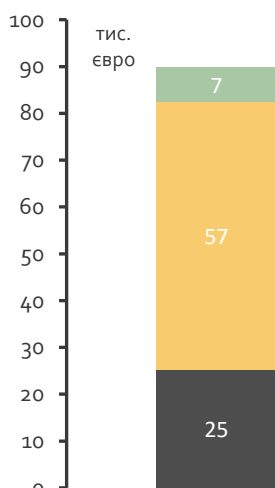
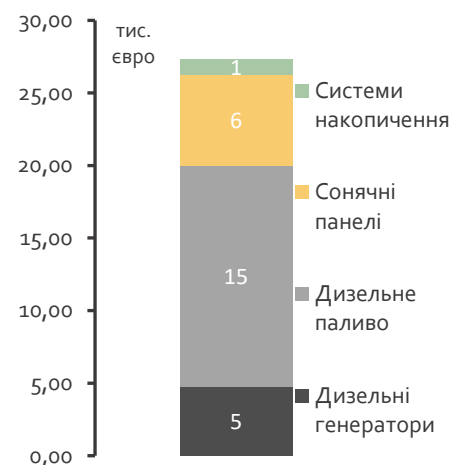
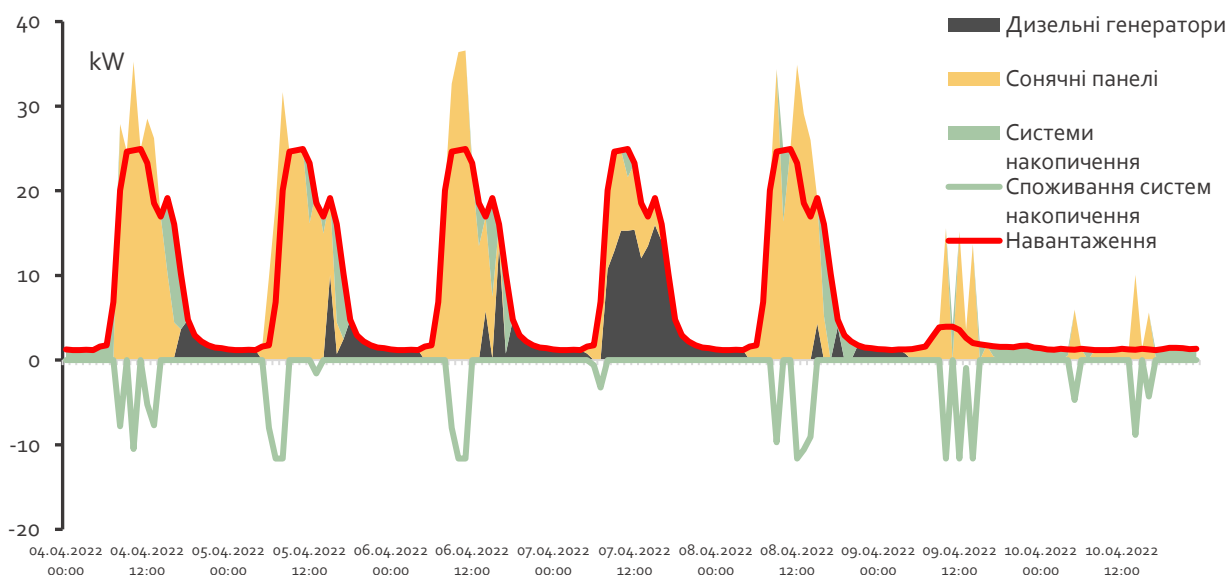


Рис. 9. Загальні річні витрати



Джерело (Рис. 7-9): власне моделювання та розрахунки

Рис. 10. Відпуск електроенергії під час типового тижня



Джерело: власне моделювання та розрахунки

⁸ <https://index.minfin.com.ua/ua/markets/fuel/dt/>