

© Є.В. Кошеленко¹, І.М. Луценко¹, О.А. Замкова¹,
П.С. Циган¹, А.О. Кошеленко¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ СИСТЕМ КОМБІНОВАНОГО ЖИВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ МІСТ

© Ye. Koshelenko¹, I. Lutsenko¹, O. Zamkova¹,
P. Tsyhan¹, A. Koshelenko¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

TECHNOLOGIES FOR CREATING COMBINED POWER SUPPLY SYSTEMS FOR URBAN FACILITIES

Мета. Дослідити сучасні технологічні підходи до створення систем комбінованого живлення об'єктів міст і оцінити техніко-економічні показники їх роботи.

Методика. У роботі проведено систематизацію та статистичну обробку вартісних показників різних технологій створення систем резервного живлення об'єктів міст. При визначенні питомих показників вартості електричної енергії використано методику оцінки капітальних та експлуатаційних витрат упродовж життєвого циклу обладнання.

Результати. Проведений статистичний аналіз ринкових цін на децентралізовані джерела енергії (дизельні та бензинові генератори різної потужності) дозволив: оцінити питому вартість виробленої електричної енергії; визначити раціональні параметри комбінованої системи живлення для об'єктів міст; встановити закономірність зміни питомої вартості електричної енергії в залежності від потужності дизельного генератора. Оцінено доступний ресурс циклів заряду-розряду акумуляторних батарей різних типів, встановлено раціональний рівень їх розряду з позицій забезпечення мінімального зносу, довготривалого використання та мінімальної вартості відданої з накопичувача електричної енергії.

Наукова новизна. В умовах значного попиту на технології для створення систем резервного живлення споживачів проаналізовано вартість електричної енергії на життєвому циклі обладнання. Встановлено логарифмічну залежність між питомою вартістю електричної енергії та потужністю дизельних генераторів, що простежується широкому діапазоні потужностей. Встановлено, що для більшості типів акумуляторів електричної енергії найбільшою ефективністю характеризується режим використання з глибиною розрядження до 50% від номінальної ємності, що забезпечує максимальну тривалість експлуатації та найменшу питому вартість електричної енергії.

Практична значимість. Підходи визначення вартості електричної енергії на життєвому циклі обладнання систем резервного живлення можуть застосовуватися для визначення раціональної структури таких систем.

Ключові слова: акумуляторні батареї, бензинові генератори, вартість життєвого циклу, дизельні генератори, тариф на електричну енергію.

Вступ. У воєнний час надзвичайно актуально постає проблема живлення об'єктів міст. На зараз є багато зруйнованих та пошкоджених об'єктів енергетичної інфраструктури, тому виникає задача пошуку альтернативних джерел енергопостачання споживачів. Вирішення цієї задачі лягає як на керівництво

енергопостачальних компаній, так і на адміністрацію міських установ та побутових споживачів.

Розв'язання цієї задачі часто обумовлено наявністю фінансових ресурсів та доступного обладнання. При цьому створені системи автономного енергозабезпечення як електричної, так і теплової енергії не завжди задовольняють фактичну енергопотребу та характеризуються нераціональною структурою. Здебільшого вони забезпечують короткотривале слабкопрогнозоване резервування живлення або вартість систем гарантованого живлення споживачів є економічно необґрунтованою.

Тому, метою даного дослідження є аналіз і структурування поширених практичних рішень, дослідження ринку енергетичного обладнання і розробка рекомендацій щодо створення раціональних структур енергопостачання об'єктів міської інфраструктури. При цьому раціональними можуть вважатися структури, які характеризуються мінімальною вартістю енергії порівняно з іншими, системи які здатні упродовж певного часу забезпечувати резервне живлення об'єктів відповідно до нормального або аварійного режиму їх роботи залежно від мети створення такої системи.

Основна частина. Найбільшого поширення в умовах міст набувають системи резервного живлення на основі генераторів. Такі системи широко використовуються малим бізнесом та приватними будівлями, оскільки вони дозволяють зменшити залежність від централізованої електромережі. Це пояснюється доступністю дизельних та бензинових генераторів малої потужності, легкістю інтеграції генератора до існуючої системи електропостачання та пуску систем, якщо навантаження не характеризується значною кратністю пускових струмів. Проте, витрати пального на отримання електричної енергії коливаються в межах 0,2–0,5 літрів на 1 кВт·год.

Необхідні дані для подальшого аналізу та розрахунку найпоширеніших дизельних та бензинових генераторів представлено у табл. 1 і 2.

Таблиця 1

Номінальні характеристики дизельних генераторів

Потужність генератора $P_{дг}$, кВт	Вартість генератора $C_{дг}$, грн	Моторесурс $T_{дг}$, год	Питома витрата пального $g_{дг}$, л/(кВт·год)	Витрата мастила на одне обслуговування $G_{дг}$, л
5	43 000	3 000	0,3	2
10	149 000	6 000	0,25	3,5
15	210 000	8 000	0,25	4,5
20	310 000	8 000	0,25	5
25	367 500	15 000	0,24	6
30	405 000	15 000	0,24	7
50	474 430	20 000	0,2	10
100	1 050 040	25 000	0,18	15

Таблиця 2

Номінальні характеристики бензинових генераторів

Потужність генератора $P_{БГ}$, кВт	Вартість генератора $C_{БГ}$, грн	Моторесурс $T_{БГ}$, год	Питома витрата пального $g_{БГ}$, л/(кВт·год)	Витрата мастила на одне обслуговування $G_{БГ}$, л
3	27000	500	0,47	0,6
6	41170	1500	0,38	0,9
10	78000	1500	0,35	1,2

Проведемо оцінку вартості електричної енергії для повного життєвого циклу генератора. Для наведених потужностей генераторів визначимо наступні проміжні параметри для визначення вартості електричної енергії:

- вартість життєвого циклу генератора;
- вироблена електроенергія за життєвий цикл.

Виходячи з зазначених даних у табл. 1 і 2, визначимо вартість життєвого циклу генератора наступним чином:

$$C_{ЖЦ} = C_{Г} + C_{М} + C_{П},$$

де: $C_{Г}$ – вартість генератора, грн; $C_{М}$ – вартість масла, яке витрачається за весь життєвий цикл генератора, грн. $C_{П}$ – вартість витраченого палива на весь життєвий цикл генератора, грн.

Визначаючи вартість масла та палива, що витрачаються на обслуговування і роботу генератора використано ціни станом на березень 2025 року в об'ємі за 1 л:

- ціна дизельного пального – 54,00 грн/л;
- ціна бензину – 58,96 грн/л;
- ціна мастила – 450,00 грн/л.

Вартість масла, яке витрачається за весь життєвий цикл генератора визначається як:

$$C_{М} = \frac{T_{Г}}{100} G_{Г} Ц_{М},$$

де: $T_{Г}$ – моторесурс генератора, год; $G_{Г}$ – витрата мастила на одне обслуговування генератора, л; $Ц_{М}$ – ціна 1 л мастила, що використовується для обслуговування генератора, грн.

Вартість витраченого палива на весь життєвий цикл генератора розраховується за наступною формулою:

$$C_{П} = T_{Г} P_{Г} g_{Г} Ц_{П},$$

де: $T_{Г}$ – моторесурс генератора, год; $P_{Г}$ – потужність генератора, кВт; $g_{Г}$ – питома витрата пального, л/(кВт·год); $Ц_{П}$ – ціна 1 л пального, що використовується для роботи генератора, грн.

Кількість виробленої електроенергії генератором за один життєвий цикл визначаємо як:

$$W = P_G T_G,$$

де: P_G – потужність генератора, кВт; T_G – моторесурс генератора, год.

Вартість електроенергії отриманої від генератора визначається як відношення вартості життєвого циклу генератора до кількості виробленої електроенергії цим генератором за життєвий цикл:

$$C_{EE} = \frac{C_{ЖЦ}}{W},$$

де: $C_{ЖЦ}$ – вартість життєвого циклу генератора, грн; W – кількість виробленої електроенергії генератором за один життєвий цикл, кВт·год.

Результати розрахунку вартості електричної енергії від генераторів за поточного рівня цін на паливо, наведені у табл. 3 і 4.

Таблиця 3

Результати розрахунків для дизельних генераторів

Потужність генератора $P_{ДГ}$, кВт	Вартість життєвого циклу $C_{ЖЦ}$, грн	Вироблена електроенергія W , кВт·год	Вартість електроенергії, отриманої від генератора C_{EE} , грн./кВт·год
5	314 845	15 000	20,99
10	1 059 650	60 000	17,66
15	2 026 064	120 000	16,88
20	2 666 400	160 000	16,67
25	5 669 400	375 000	15,12
30	6 753 780	450 000	15,01
50	12 256 430	1 000 000	12,26
100	27 222 040	2 500 000	10,89

Таблиця 4

Результати розрахунків для бензинових генераторів

Потужність генератора $P_{ДГ}$, кВт	Вартість життєвого циклу $C_{ЖЦ}$, грн	Вироблена електроенергія W , кВт·год	Вартість електроенергії, отриманої від генератора C_{EE} , грн/кВт·год
3	69622	1500	46,42
6	250657	9000	27,85
10	395640	15000	26,38

За отриманими результатами з табл. 3 і 4 маємо, що вартість електричної енергії при використанні дизельних генераторів варіюється з 12,26 до 20,99 грн за 1 кВт·год, а при використанні бензинових генераторів вартість електричної енергії змінюється у межах від 26,38 до 46,42 грн за 1 кВт·год.

Альтернативним рішенням системи резервного живлення для споживачів виступають системи накопичення з акумуляторних батарей. Вони характеризуються різними темпами розряду батареї та глибиною розряду.

Виділяють наступні основні характеристики батарей: ємність, розрядний струм та глибина розряду. Темп розряду характеризується показником струмовіддачі, C , який прямо пропорційний швидкості розряду батареї.

Проте, швидке розрядження батареї призводить до її перегрівання та зменшення ефективності ємності. Окрім наведених характеристик, вплив на ефективність використання та термін експлуатації акумуляторів має температура навколишнього середовища. При низьких температурах батареї мають тенденцію до зменшення ефективної ємності, а при високих температурах зростає внутрішній опір батареї.

Як зазначено авторами у [1–8], для споживання енергії варто використовувати швидкодіючі акумулятори C1-C2-C5, які здатні швидко віддавати накопичену енергію. Тому, проаналізуємо, скільки складатиме вартість електричної енергії при використанні акумуляторних батарей. Для оцінки вартості, в табл. 5 приведено кількість циклів розряду та вартість 1 кВт·год енергії на життєвому циклі АКБ при різній глибині розряду.

Таблиця 5

Вартість одного циклу заряд/розряд для акумуляторних батарей ємністю 1 кВт·год різних типів при різних значеннях граничної глибини розряду упродовж експлуатації [1]

Тип батареї	Кількість циклів при глибині розряду, D , %				Ціна батареї ємністю 1 кВт·год, грн.	Вартість 1 кВт·год енергії на життєвому циклі АКБ при різній глибині розряду (D , %), грн.			
	25	50	75	100		25	50	75	100
VRLA	1000	500	400	300	4450	17,8	17,8	14,83	14,83
AGM VRLA	2100	1200	800	600	6900	13,14	11,5	11,5	11,5
GEL VRLA	3000	1750	1000	800	10850	14,47	12,4	14,47	13,56
OPzV	3000	1750	1000	800	30000	40	34,29	40	37,5
OPzS	6000	3500	1750	1200	14060	9,37	8,03	10,71	11,72
Ni-Cd	6000	4000	2000	1500	24170	16,11	12,09	16,11	16,11
Li-ion	7000	5000	2000	1500	16600	9,49	6,64	11,07	11,07

Результати, які було отримано в [1] демонструють, що найнижча вартість на одиницю енергії на життєвому циклі акумулятора мають літій-іонні батареї та свинцево-кислотні з додаванням сурми й селену (OPzS). При цьому, вартість електричної енергії є найнижчою при розряді акумулятора до рівня 50%. Такий спосіб використання акумуляторів дозволяє не тільки отримати найнижчу ціну на накопичену енергію, а й збільшити термін використання АКБ.

Щоб визначити найбільш доцільне джерело живлення порівняємо вартість 1 кВт·год для зарядження акумуляторів від генераторів та від мережі (рис. 1, 2).

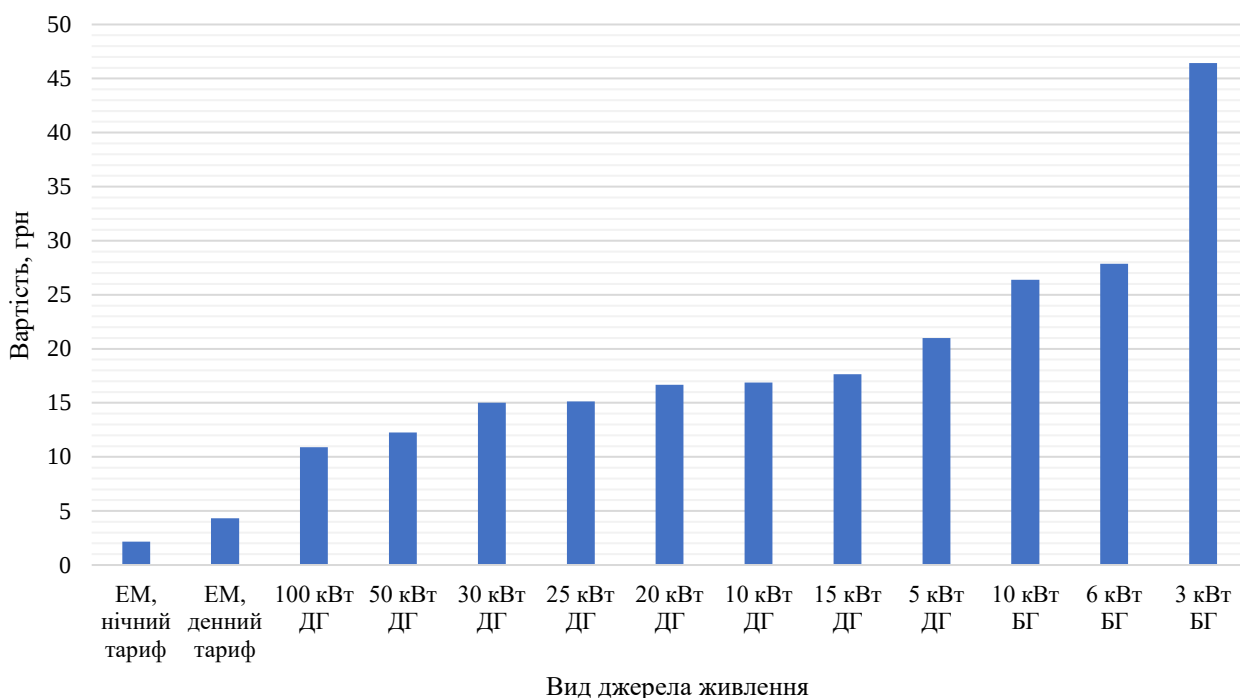


Рис. 1. Порівняльна діаграма тарифів вартості 1 кВт·год, де ЕМ – електрична мережа, ДГ – дизельний генератор, БГ – бензиновий генератор

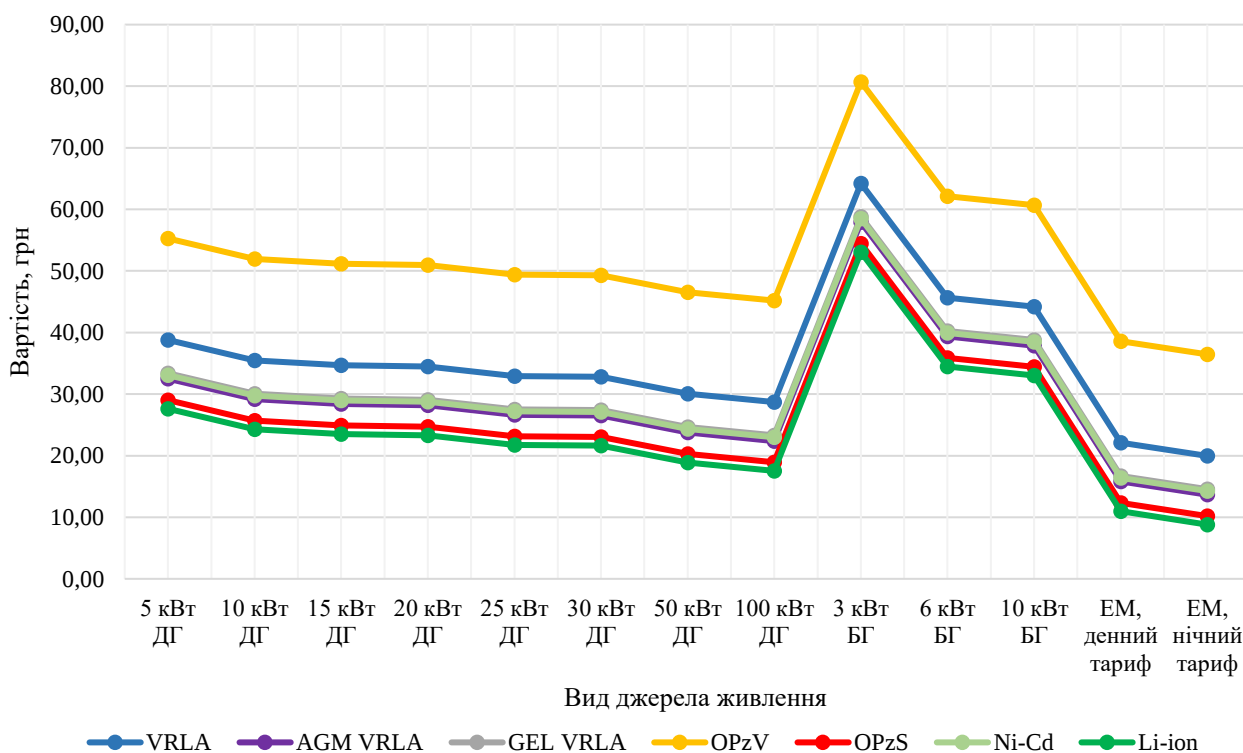


Рис. 2. Діаграма ефективності використання резервних джерел живлення, де ЕМ – електрична мережа, ДГ – дизельний генератор, БГ – бензиновий генератор

З діаграми видно, що найбільш доцільнішим є заряджання акумуляторів від мережі в період нічного тарифу. Якщо порівняти вартість 1 кВт·год, що виробляє

генератор потужністю 50 кВт, вона становитиме 12,26 грн. В той же час, вартість 1 кВт·год при використанні АКБ (типу Li-ion), який був заряджений від мережі за нічним тарифом становитиме 8,8 грн, а за денним – 10,96 грн. Отже, економічно доцільніше використовувати літій-іонні акумулятори із заряджанням їх від мережі за нічним або денним тарифами.

Моделювання вартості електричної енергії, виробленої дизельними генераторами потужністю 5-100 кВт, дозволило встановити, що питома вартість електричної енергії зменшується за логарифмічним законом при збільшенні потужності генератора (рис. 3).

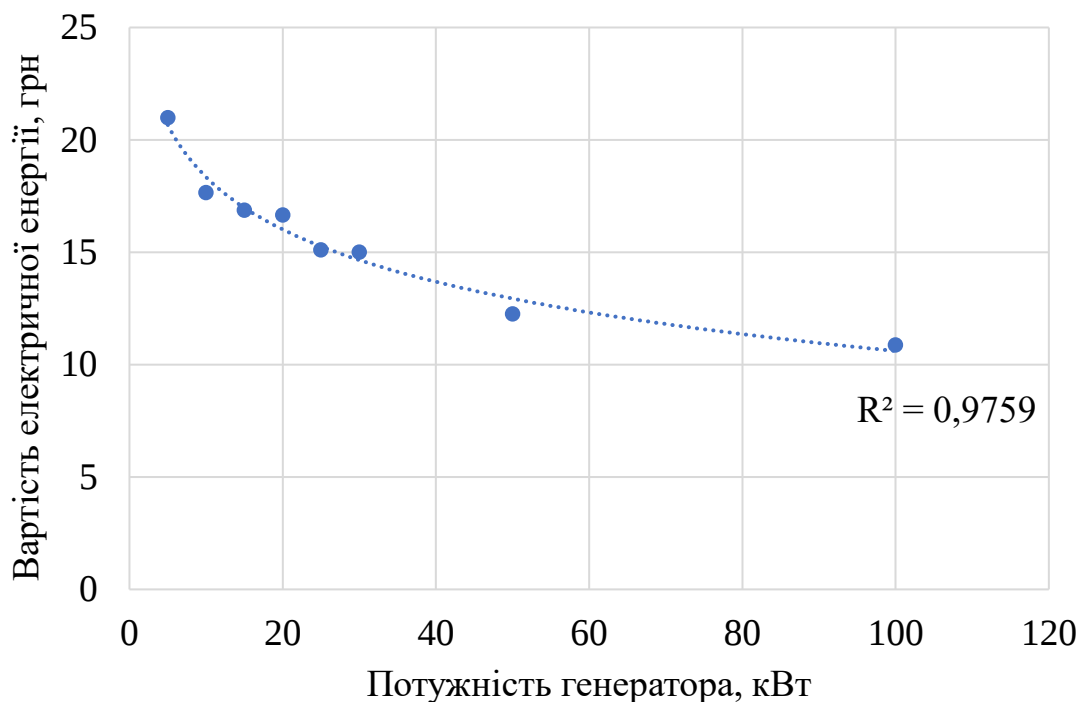


Рис. 3. Закономірність зміни питомої вартості електричної енергії

Отримана залежність може бути в подальшому використана при моделюванні вартісних показників та виконанні техніко-економічних обґрунтувань в складних системах електропостачання з резервуванням живлення споживачів.

Висновки. У ході дослідження виконано аналіз вартості електричної енергії в системах резервного живлення різної потужності на базі дизельних і бензинових генераторів та з використанням акумуляторів різного типу. За результатами статистичної обробки даних цін на дизельні генератори в широкому діапазоні потужностей, вартості витратних матеріалів та обслуговування упродовж їх життєвого циклу встановлено, що питома вартість електричної енергії, отриманої від дизельних генераторів, зменшується зі збільшенням потужності генератора за логарифмічним законом.

Електрична енергія, отримана з систем накопичення на базі Li-ion акумуляторів, характеризується найменшою вартістю серед усіх типів систем резервного живлення. Тому при незначному споживанні електричної енергії, наприклад, в

домогосподарствах, або в секторі малого бізнесу, перевагу слід віддати акумуляторним системам.

Системи резервного живлення на базі генераторів доцільно застосовувати при значних обсягах споживання електричної енергії або непрогнозованих довготривалих перервах в роботі системи електропостачання. При цьому, перевагу слід віддавати дизельним генераторам, які з одного боку характеризуються високою початковою вартістю, але за рахунок меншої питомої витрати палива та більшого моторесурсу мають нижчу вартість виробленої електричної енергії в усьому діапазоні потужностей.

Перелік посилань

1. Луценко, І., Кошеленко, Є., Луценко, М., & Кошеленко, А. (2023). Оцінка економічної ефективності використання накопичувачів електричної енергії на базі акумуляторних батарей різних типів. *Міжнародна науково-практична конференція енергозбереження та енергоефективність – 2023. Збірник тез. Дніпро. НТУ "ДП". 15 грудня 2023 р.*, 56–58.
2. Тарифи на електроенергію 2025 для населення. (n.d.). <https://surl.li/pgscwh>
3. Вартість акумуляторів (n.d.). [https://mtsbaza.com.ua/akkumulyatoryi?filters=57o-emkost\[6661-100-ach](https://mtsbaza.com.ua/akkumulyatoryi?filters=57o-emkost[6661-100-ach)
4. Prytyskach, I., Opryshko, V., Veremiichuk, Y., & Yarmoliuk, O. (2024). Battery Energy Storage Systems: Enabling Ukraine's Grid Flexibility and Energy Security Through Ancillary Services. *Systems, Decision and Control in Energy VI*, 3–36. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67091-6_1
5. Buratynskyi, I., Nechaieva, T., & Leshchenko, I. (2024). Assessment of the Economic Efficiency of Battery Energy Storage Systems in the Electricity Market Segments. *Systems, Decision and Control in Energy VI*, 37–50. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67091-6_2
6. Kostenko, G., & Zaporozhets, A. (2024). Transition from Electric Vehicles to Energy Storage: Review on Targeted Lithium-Ion Battery Diagnostics. *Energies*, 17(20), 5132. <https://doi.org/10.3390/en17205132>
7. Kostenko, G., & Zaporozhets, A. (2024). Integral Degradation Index of Second-Life EV Batteries Application in Energy Storage Systems: Accounting for Calendar and Cyclic Aging. *System Research in Energy*, (2a (78), 31–33. <https://systemre.org/index.php/journal/article/view/848>
8. Kostenko, G., & Zaporozhets, A. (2024). World experience of legislative regulation for Lithium-ion electric vehicle batteries considering their second-life application in power sector. *System Research in Energy*, 2024(2), 97–114. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.02.097>

ABSTRACT

Purpose. To investigate modern technological approaches to the development of combined power supply systems for urban facilities and assess their techno-economic performance indicators.

The methods. The study involved the systematization and statistical analysis of cost indicators for various backup power supply system technologies in urban facilities. To determine the specific cost indicators of electrical energy, a methodology was used that evaluates capital and operational expenditures throughout the equipment's life cycle.

Findings. A statistical analysis of market prices for decentralized energy sources (diesel and gasoline generators of various capacities) enabled the evaluation of the specific cost of generated electrical energy, identification of optimal parameters for a combined power supply system for urban facilities, and establishment of a correlation between the specific cost of electrical energy and diesel generator capacity. The available charge-discharge cycle resource of various types of battery storage was assessed, and an optimal discharge level was determined to minimize wear, ensure long-term use, and reduce the cost of delivered electrical energy from storage systems.

The originality. Amid the growing demand for backup power supply technologies, the cost of electrical energy over the life cycle of equipment was analyzed. A logarithmic relationship was established between the specific cost of electrical energy and the capacity of diesel generators, observed over a wide range of capacities. It was found that for most types of battery storage, the most efficient operating mode is characterized by a depth of discharge of up to 50% of nominal capacity, ensuring maximum service life and the lowest specific cost of electrical energy.

Practical implementation. The proposed approaches for determining the cost of electrical energy over the life cycle of backup power system equipment can be applied to identify the optimal structure of such systems.

Keywords: *battery storage, gasoline generators, life cycle cost, diesel generators, electricity tariff.*