

ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ МІСЬКОГО ТРАНСПОРТУ ТА ДОМОГОСПОДАРСТВ

Андрусенко С.І., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, sergeandrusenko@gmail.com, orcid.org/0000-0002-9914-0200

Бугайчук О.С., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, bug_os@ukr.net, orcid.org/0000-0001-8646-6263

Будниченко В.Б., кандидат технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, budnrb@i.ua, orcid.org/0000-0002-1235-3781

Подписнов В.С., Національний транспортний університет, Київ, Україна, vpodpisnov@ukr.net, orcid.org/0000-0002-8583-1502

BUSINESS CASE FOR APPLICATION OF ENERGY STORAGE UNITS IN URBAN TRANSPORT AND HOME POWER GRIDS

Andrusenko S.I., Ph.D. in Technical Science, National Transport University, Kyiv, Ukraine, sergeandrusenko@gmail.com, orcid.org/0000-0002-9914-0200

Buhaichuk O.S., Ph.D. in Technical Science, National Transport University, Kyiv, Ukraine, bug_os@ukr.net, orcid.org/0000-0001-8646-6263

Budnychenko V.B., Ph.D. in Technical Science, National Transport University, Kyiv, Ukraine, budnrb@i.ua, orcid.org/0000-0002-1235-3781

Podpisnov V.S., National Transport University, Kyiv, Ukraine, vpodpisnov@ukr.net, orcid.org/0000-0002-8583-1502

ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ ГОРОДСКОГО ТРАНСПОРТА И ДОМОХОЗЯЙСТВ

Андрусенко С.И., кандидат технических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина, sergeandrusenko@gmail.com, orcid.org/0000-0002-9914-0200

Бугайчук А.С., кандидат технических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина, bug_os@ukr.net, orcid.org/0000-0001-8646-6263

Будниченко В.Б., кандидат технических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина, budnrb@i.ua, orcid.org/0000-0002-1235-3781

Подписнов В.С., Национальный транспортный университет, Киев, Украина, vpodpisnov@ukr.net, orcid.org/0000-0002-8583-1502

Постановка проблеми.

У повсякденному житті постійно присутня ситуація, коли в кожний момент часу кількість виробленої енергії не співпадає з енергетичною потребою і навпаки. Для розв'язання цієї проблеми та оптимізації енергетичних потоків використовують накопичувачі енергії.

Накопичувачем енергії є пристрій, який може акумулювати енергію в разі наявності її надлишків та віддавати накопичену енергію в разі нестачі її виробництва генеруючими установками.

Цікавим з практичної точки зору може бути використання накопичувача, який заряджається за рахунок дешевої енергії, коли до неї є доступ (вночі), та віддає накопичену енергію у потрібний час (вдень). Розвиток таких технологій може дати значний економічний ефект і має велике практичне значення.

Наприклад, в Україні встановлені двозонні та трizonні тарифи на електроенергію [1, 2]. За двозонного тарифу для підприємств у Києві коефіцієнти вартості електроенергії для споживачів (крім населення) становлять 0,35 у нічний період з 23.00 по 7.00 та 1,35 – у денний період. Вартість електроенергії з ПДВ при цьому складає 229,508 коп/кВт·год для споживачів за II класом напруги (до 27,5 кВ).

Для населення [2] за двозонного тарифу в Україні коефіцієнти вартості електроенергії для побутових споживачів становлять 0,5 у нічний період з 23.00 по 7.00 та 1,0 – у денний період. Вартість електроенергії при цьому дорівнює для споживачів 90/168 коп/кВт·год за використання

відповідно до та понад 100 кВт·год на місяць з 1 травня по 30 вересня та 3000 кВт·год – з 1 жовтня по 30 квітня.

Максимальна експлуатація міського електротранспорту, а також витрати електроенергії в підприємствах, організаціях та домогосподарствах припадають на період доби, коли вартість електроенергії найвища. Для зменшення загальних витрат можна заряджати накопичувачі електроенергії вночі й використовувати накопичену енергію вдень. Тому розробка методики оцінки економічної ефективності використання накопичувачів енергії є важливою задачею.

Аналіз відомих нам публікацій. Дослідженню використання електронакопичувачів присвячена велика кількість робіт. Так, у роботі [3] виконана оцінка меж економічно доцільних капіталовкладень у систему накопичення електроенергії, призначену для вирівнювання добового графіку навантаження. На основі порівняння питомих вартостей виготовлення накопичувачів, робиться висновок про перспективність такої технології.

У роботі [4] проаналізована система електропостачання, віддалена від високовольтної енергосистеми. Такі системи зазвичай живляться від автономної електростанції з двома дизель-генераторами, які працюють по черзі. Розглянуті шляхи зменшення витрат дизельного палива. Автори стверджують, що використання поновлюваних джерел і накопичувачів енергії дозволяє знизити вартість 1 кВт·год електроенергії – на 60-80%. У роботі [5] розглянуті питання підвищення ефективності гірничого локомотивного електротранспорту використанням різних типів пристроїв зберігання енергії. Показано, що застосування накопичувачів дозволить зменшити витрати енергії, підвищити стабільність та надійність систем енергопостачання. Робота [6] присвячена розв'язанню проблеми вибору раціонального складу обладнання для живлення комплексу децентралізованого електропостачання споживачів. Основним критерієм оптимальності пропонується обрати чистий дисконтований дохід. У роботі [7] використовується оцінка ефективності постачання електричної енергії від мікрогідроелектростанцій, яка базується на собівартості виробництва електроенергії, але рівняння цільової функції не наводиться. В [8] досліджується ефективність пристроїв зберігання енергії для забезпечення розподілу електроенергії до споживачів, які вимагають безперервного живлення. Використовуються такі показники, як вартість електричної енергії та надійність електропостачання. В [9] показані результати розроблення моделі оптимального керування потужністю та програмне забезпечення, що дозволяє управляти електричною системою в реальному часі. Як параметри оптимального управління використовуються ефективність системи та її швидкодія. В [10] запропоновано використання для оцінювання пристроїв для зберігання електроенергії такі показники, як «питомі енергетичні та потужнісні витрати». Але, на наш погляд, рівняння для визначення цих показників, що наводяться в роботі, не відповідають визначенню.

Аналіз робіт показав, що в більшості досліджень проводяться розрахунки параметрів економічної ефективності окремих технічних рішень, але не пропонується зручний і простий критерій, який би наочно характеризував економічну доцільність реалізації конкретних схем використання електричних накопичувачів енергії для транспорту та домогосподарств з точки зору споживача електроенергії.

Метою даного дослідження є розробка методики та критеріїв визначення економічної доцільності використання накопичувачів електричної енергії в системах живлення муніципального електротранспорту або окремих домогосподарств за умови використання двозонних і трizonних тарифів на електроенергію.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Схема системи живлення споживачів електроенергії (міського електротранспорту або домогосподарств) від джерел енергопостачання різної вартості з використанням накопичувачів електроенергії наведена на рисунку 1.

Відповідно до рисунку 1, кінцевий споживач енергії (електротранспорт, домогосподарство) живиться від двох джерел електричної енергії (стаціонарна електрична мережа з вартістю енергії T_d , грн/кВт·год, та додаткове джерело електроенергії – як-от, наприклад, вітрова установка або сонячні батареї з вартістю електроенергії T_n , грн/кВт·год) чи одного джерела електроенергії з різною вартістю T_d у денний та T_n у нічний час.

Розглянемо більш детально останній випадок. Оскільки режими споживання та генерації електроенергії у денний та нічний час не співпадають, використовується накопичувач електроенергії, який акумулює енергію, вироблену за дешевим тарифом T_n у нічний час, та віддає її споживачам у денний час.

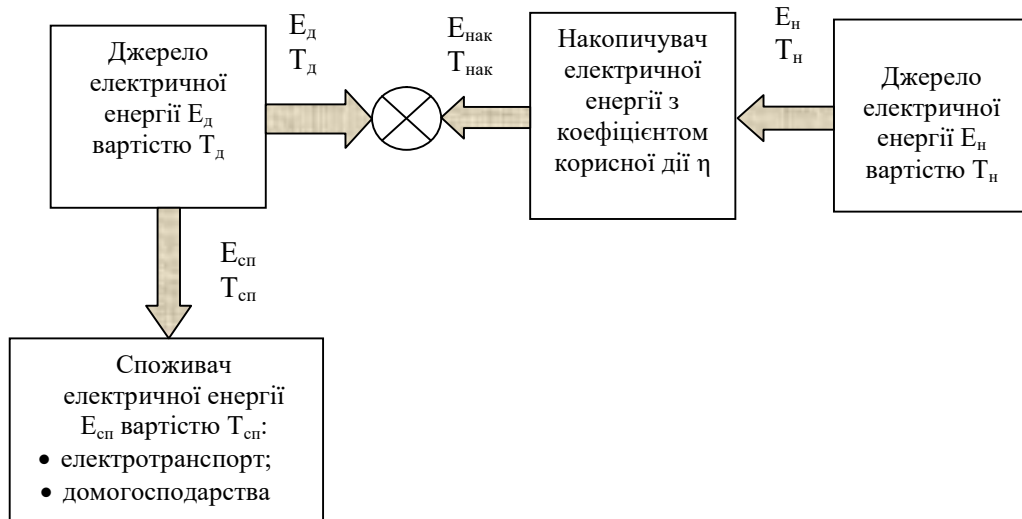


Рисунок 1 – Схема системи живлення споживачів електроенергії від джерел енергопостачання різної вартості з використанням накопичувачів електроенергії

Figure 1 – The scheme of energy consumption when using different sources of energy supply equipped with energy storage units

Кількість енергії, що отримує споживач, дорівнює сумі потоків електроенергії від мережі E_d та енергії від накопичувача E_n :

$$E_{сп} = E_d + E_n. \quad (1)$$

Вартість електроенергії для споживача складе

$$BE_{сп} = BE_d + BE_n + BE_{нак}, \quad (2)$$

де $BE_{сп}$, BE_d , BE_n , $BE_{нак}$ – відповідно вартість електроенергії для споживача, вартості енергії, отриманої від стаціонарного джерела, за денним тарифом і за нічним тарифом, а також вартість енергії, що надається накопичувачем.

Вартість спожитої енергії BE визначається як добуток вартості одиниці кількості електроенергії (тарифу) T на її кількість E :

$$BE = E \cdot T. \quad (3)$$

Виходячи з цього, рівняння (2) матиме вигляд

$$BE_{сп} = T_d \cdot E_d + T_n \cdot E_n + T_{нак} \cdot E_{нак}, \quad (4)$$

де T_d , T_n , $T_{нак}$ – відповідно денний і нічний тарифи електропостачання та питома вартість (тариф) електроенергії, отриманої від накопичувача.

Виходячи зі схеми потоків енергії (рисунок 1), можна пов'язати кількість енергії, спожитої накопичувачем під час заряджання за нічним тарифом, з кількістю енергії, відданої накопичувачем, рівнянням

$$E_{нак} = E_n \cdot \eta \text{ або } E_n = E_{нак} / \eta, \quad (5)$$

де η – коефіцієнт корисної дії накопичувача.

Також можна записати, що

$$E_d = E_{сп} - E_{нак}. \quad (6)$$

Підставимо рівняння (5) і (6) у рівняння (4) і після перетворень отримаємо питому вартість електроенергії (або тариф) у споживача $T_{сп}$:

$$T_{сп} = T_d - (T_d - T_{нак} - T_n/\eta) \cdot E_{нак}/E_{сп}. \quad (7)$$

Із цього рівняння можна зробити висновок, що для того, щоб тариф за схемою з накопичувачем був менший за денний тариф на електроенергію $T_{сп} < T_d$, необхідно виконання умови

$$(T_d - T_{нак} - T_n/\eta) \cdot E_{нак}/E_{сп} > 0, \text{ тобто } T_d > T_{нак} + T_n/\eta. \quad (8)$$

Важливим є визначення величини питомої вартості електроенергії, отриманої від накопичувача $T_{нак}$. Вона залежить від вартості накопичувача, його монтажу та експлуатації, ефективності накопичувача $V_{нак}$, а також від терміну служби. Ця величина може бути визначена за рівнянням

$$T_{нак} = V_{нак}/(E_{нак} \cdot C), \quad (9)$$

де $V_{нак}$ – вартість накопичувача, його монтажу та експлуатації протягом життєвого циклу;

$E_{нак}$ – корисна ємність накопичувача в одному циклі;

C – термін роботи (число циклів заряджання-розряджання).

У разі використання тризонного тарифу на електроенергію за умови, що накопичувач буде заряджатись з урахуванням нічного та напівпікового тарифів, необхідно розрахувати приведений нічний тариф T_n^1 , значення якого використовується замість нічного тарифу T_n у рівняннях (4)–(9):

$$T_n^1 = (T_n \cdot t_n + T_{пн} \cdot t_{пн})/(t_n + t_{пн}), \quad (10)$$

де $T_n, T_{пн}$ – відповідно нічний та напівпіковий тарифи на електроенергію;

$t_n, t_{пн}$ – сумарний час дії нічного та напівпікового тарифів.

Економічний ефект за рік від застосування подібної схеми енергопостачання можна розрахувати за рівнянням

$$\Delta BE_{сп} = (T_d - T_{сп}) \cdot E_{сп, рік}, \quad (11)$$

де $E_{сп, рік}$ – кількість спожитої електроенергії за рік, кВт·год;

T_d – денний тариф на електроенергію, грн/кВт·год;

$T_{сп}$ – питома вартість (тариф) електроенергії у споживача при застосуванні накопичувача, грн/кВт·год.

Вочевидь, економічний ефект від запропонованих заходів має бути позитивним. Це є першою умовою визначення доцільності використання накопичувачів. Другою умовою є достатність цього економічного ефекту для того, щоб термін окупності проекту був прийнятним.

Для розрахунку терміну окупності проекту використаємо метод визначення сподіваної чистої теперішньої вартості проекту (СЧТВ) [11].

Для випадка, коли початкові інвестиції здійснюються протягом одного року, а грошовий потік починає надходити з наступного року, СЧТВ визначається як різниця між сумою теперішніх вартостей майбутніх грошових потоків і сумою інвестицій при реалізації проекту:

$$СЧТВ = \sum_{i=1}^n \frac{p_i \cdot ГП_i}{(1+r)^i} - П, \quad (12)$$

де $ГП_i = \Delta BE_{сп, i}$ – грошовий потік у i -му періоді, який дорівнює річній економії i -го періоду;

r – безризикова ставка. Може бути прийнята ставка за державними облігаціями в Україні, яка на 2019 рік складала приблизно 18 %;

p_i – коефіцієнт еквівалента впевненості в періоді i (сподівана ймовірність отримання такої економії коштів);

n – кількість років існування проекту;

$П$ – початкові інвестиції, які дорівнюють вартості накопичувача, інвертора та іншого обладнання, їхньої доставки та монтажу.

Термін окупності проекту – це момент часу, в який величина СЧТВ змінює свій знак з від'ємного на додатний, тобто дорівнює нулю.

Розглянемо ринкову пропозицію обладнання для збереження електричної енергії для промисловості та домогосподарств [12, 13]. Інформацію щодо електронакопичувачів різних виробників для використання у промисловості та в домогосподарствах наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Системи акумулювання електроенергії, наявні на ринку
Table 1 – Energy storage systems available on the market

Марка системи акумулювання електроенергії	Корисна ємність накопичувача в одному циклі, кВт·год	Вартість обладнання, доставки, монтажу, \$/грн	Питома вартість електроенергії від накопичувача, (\$-грн)/кВт·год
Tesla Powerpack	5400,0	3217000/86859000	0,119–3,2
Tesla Powerwall 2	13,5	7000/189000	0,104–2,8
LG Chem RESU	6,5	4500/121000	0,14–3,78
Sunverge	23,0	20000/540000	0,17–4.59
ElectrIQ	10,0	13000/351000	0,26–7,02
Nissan XStorage	4,2	4500/121000	0,21–5,67
Mercedes-Benz	20,0	10000/270000	0,1–2,7
Orison	2,2	1600/43200	0,145–3.92
Sonnen	4,0	5950/160650	0,3–8,1
Powervault c	6,6	3000/81000	0,0909–2,45

Для розрахунків обраний оптимістичний термін роботи системи акумулювання електричної енергії 5000 циклів [3].

Аналіз доцільності використання накопичувачів енергії на міському електротранспорті для заряджання вночі та віддачі енергії вдень виконаємо при двозонному тарифі на електроенергію [1] за таких умов: середньодобовий пробіг тролейбуса 200 км; витрати електроенергії тролейбуса на 1 км пробігу 2,7 кВт·год [14]. Добове споживання електроенергії одним тролейбусом 540 кВт·год. Одна установка Tesla Powerpack (таблиця 1) може забезпечити роботу 10 тролейбусів. Питома вартість електроенергії у споживача в системі з накопичувачем Tesla Powerpack складе згідно із (7) 4,08 грн/кВт·год, що є більшим за денний тариф 3,09 грн/кВт·год. Тобто використання такої схеми електропостачання є не вигідним (умова 8). Також підраховано, що в умовах України питома вартість електроенергії від накопичувача не має перевищувати $T_{\text{нак}} = 0,7$ грн/кВт·год, при цьому вартість накопичувача з параметрами Tesla Powerpack (таблиця 1) ємністю 5400 кВт·год має бути менша за 18,9 млн грн. Визначення терміну окупності такої системи в Україні проілюстровано на рисунку 2, з якого видно, що період окупності без врахування інфляції та фактору часу дорівнює 6,39 років, з врахування інфляції 15 % – 7,03 роки, а період окупності за безпечної норми відсотків 17% та врахуванні ризику (імовірність 0,95-0,5) є більшим за 10 років.

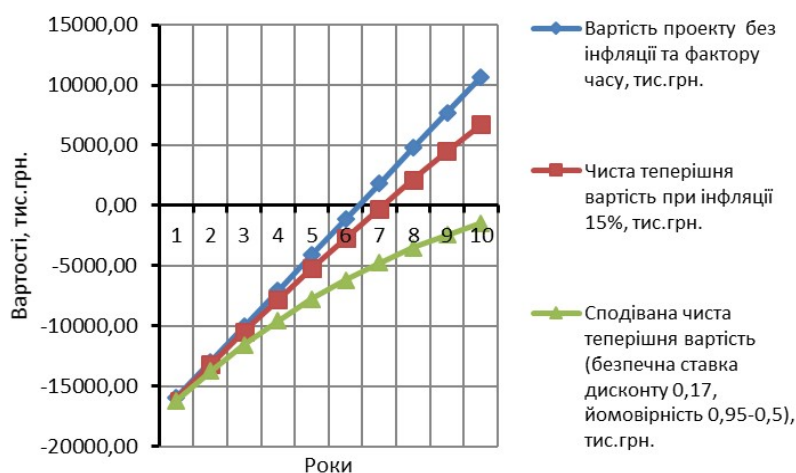


Рисунок 2 – Визначення терміну окупності проекту з накопичувачем електричної енергії для мережі міського електротранспорту ємністю 5400 кВт·год
Figure 2 – Design of payback period for an urban electric transport project with a 5400 kWh energy storage unit

У домогосподарствах вартість електроенергії у споживача за системи живлення з накопичувачем Tesla Powerwall 2.0 складе $T_{\text{сп}} > 3,38$ грн/кВт·год, що значно більше за денний тариф $T_{\text{д}} = 1,68$ грн/кВт·год. Економічний ефект (11) буде від'ємним, і застосування накопичувачів електроенергії з наведеними вище параметрами в домогосподарствах в умовах м. Києва не є доцільним. Для забезпечення прийнятної терміну окупності (<6 років) вартість електроенергії від накопичувача не має перевищувати $T_{\text{нак}} = 0,2$ грн/кВт·год.

Аналіз показав, що економічна доцільність застосування накопичувачів електричної енергії при використанні двозонного тарифу в Україні може мати місце лише за умови існування накопичувачів, величина питомої вартості електроенергії від яких буде менше 0,2...0,7 грн/кВт·год. Вартість такого обладнання має бути значно нижча за існуючу ринкову

Висновки та перспективи подальшого дослідження.

Запропоновано методику визначення економічної доцільності застосування накопичувачів електричної енергії за використання двозонних та трizonних тарифів на електроенергію. Отримано критерій визначення такої доцільності. Для розрахунку терміну окупності проекту використовується метод сподіваної чистої теперішньої вартості проекту. Показано, що за сучасних умов в Україні та існуючих вартісних характеристик систем акумуляування енергії використання таких систем для економії коштів за рахунок низьких нічних тарифів на електроенергію не є доцільним. Показано, що прийнятна вартість такого обладнання має бути значно нижча за існуючу ринкову.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Тарифи на електричну енергію для малих побутових споживачів, що приєднані до мереж ПрАТ «ДТЕК Київські електромережі». – Режим доступу: <https://www.kyiv.yasno.com.ua/business/b2b-tariffs>. – Назва з екрану.

2. Тарифи на електричну енергію, що відпускається для різних категорій побутових споживачів. – Режим доступу: <https://www.kyiv.yasno.com.ua/b2c-tariffs>. – Назва з екрану.

3. Чернецкий А.М. Оценка экономической эффективности использования накопителей электроэнергии в энергосистеме / А.М. Чернецкий // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2013. – № 4. – С. 21–28. – Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/5401>. – Загл. с экрана.

4. Chernetsky A.M. Assessment of Economic Efficiency Pertaining to Application of Energy Storage Units in Power System. *ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2013;(4):21–28. (In Russ.)

5. Степаненко В.П. Выбор накопителей энергии / В.П. Степаненко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 3. – С. 228–234. – ISSN 0236-1493. – Режим доступа: http://www.giab-online.ru/files/Data/2017/3/228_234_3_2017.pdf. – Загл. с экрана.

6. Степаненко В. П. Определение параметров накопителей энергии комбинированных силовых установок / В.П. Степаненко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 8. – С. 166–174. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-parametrov-nakopiteley-energii-kombinirovannyh-silovyh-ustanovok>. – Загл с экрана.

7. Сарсикеев Е.Ж. Технико-экономическая оценка проектов электроснабжения в автономных системах на базе возобновляемых источников энергии / Е.Ж. Сарсикеев, И.И. Шолохова, С.И. Шевелева и др. // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 03 (57). – Ч. 4. – С. 85–90. – Режим доступа: <https://research-journal.org/technical/texniko-ekonomicheskaya-ocenka-proektov-elektrosnabzheniya-v-avtonomnyh-sistemah-na-baze-vozobnovlyaemyx-istochnikov-energii>. – Загл. с экрана.

8. Лукутин Б.В. Оценка технико-экономической эффективности использования накопителей электроэнергии в автономной микрогидроэлектростанции / Б.В. Лукутин, Е.Ж. Сарсикеев, Е.Б. Шандарова // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-2. – Режим доступа: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=22874>. – Загл. с экрана.

9. Непомнящий В.А. Роль накопителей электроэнергии в повышении эффективности работы энергосистем и отдельных энергообъектов / В.А. Непомнящий, В.Ю. Кононенко, Д.О. Смоленцев, О.В. Вещунов // Энергоэксперт – 2014. – № 3. – С. 18–25. – Режим доступа: <https://docplayer.ru/69034437-Rol-nakopiteley-elektroenergii-v-povyshenii-effektivnosti-raboty-energосistem-i-otdelnyh-energoobektov.html>. – Загл. с экрана.

10. Белов В.Ф. Экспериментальная оценка модели оптимального управления накопителем электрической энергии / В.Ф. Белов, С.А. Рожкова, Д.В. Фарафонов // Современные наукоемкие

технологии. – 2016. – № 5-1. – С. 20–26. – Режим доступа: <https://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=35848>. – Загл. с экрана.

11. Любарский Б.Г. Сравнительный анализ накопителей энергии для транспортных средств / Б.Г. Любарский, В.П. Шайда, С.Г. Буряковский // *Залізничний транспорт України*. – 2015. – № 6. – С. 13–21. – Режим доступа: http://web.kpi.kharkov.ua/elmarsh/wp-content/uploads/sites/108/2017/03/2015_16.pdf. – Загл. с экрана.

12. Бланк И.А. Инвестиционный менеджмент. [учеб. курс] / Бланк И.А. – К.: Эльга-Н, Ника-Центр, 2001. – 448 с.

13. Maxim Zalevski. 12 домашних накопителей энергии, которые могут соперничать с Tesla PowerWall 2.0. – Режим доступа: <https://medium.com/@rodovidme/12-домашних-накопителей-энергии-которые-могут-соперничать-с-tesla-powerwall-2-0-e7695d1504e8>. – Загл. с экрана.

14. Tesla Energy Reveals Powerpack Pricing, Starting From 200 kWh Of Storage. – Available at: <https://insideevs.com/tesla-energy-reveals-powerpack-pricing/>. – Title from Screen.

15. Проект «Міський громадський транспорт в Україні». Фінансово-економічне обґрунтування проекту // Міністерство інфраструктури України. – Режим доступа: <https://mtu.gov.ua/news/27947.html>. – Назва з екрану.

REFERENCES

1. Taryfy na elektrychnu enerhiu dlia malykh nepobutovykh spozhyvachiv shcho pryednani do merezh PrAT «DTEK Kyivski elektromerezhni» [Electricity pricing for small businesses as consumers connected to DTEK Kyiv Electricity Networks]. – Available at: <https://www.kyiv.yasno.com.ua/business/b2b-tariffs>. – Title from Screen.

2. Taryfy na elektrychnu enerhiu shcho vidpuskaietsia dlia riznykh katehoriï pobutovykh spozhyvachiv [Electricity pricing for different consumer categories]. – Available at: <https://www.kyiv.yasno.com.ua/b2c-tariffs>. – Title from Screen.

3. Chernetskii A.M. Otsenka ekonomicheskoi effektivnosti ispolzovaniia nakopitelei elektroenergii v energosisteme [Assessment of economic efficiency pertaining to application of energy storage units in power system]. *Energetika. Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh obedinenii SNG – Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2013, issue 4, pp. 21–28. – Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/5401>. – Title from Screen.

4. Chernetskii A.M. Assessment of Economic Efficiency Pertaining to Application of Energy Storage Units in Power System. *ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2013, issue 4, pp. 21–28. (In Russ.)

5. Stepanenko V.P. Vyor nakopitelei energii [Selection of energy storage units]. *Gornyi informatcionno-analiticheskii biulleten – Mining news and analysis bulletin*, 2017, issue 3, pp. 228–234, ISSN 0236-1493. – Available at: http://www.giab-online.ru/files/Data/2017/3/228_234_3_2017.pdf. – Title from Screen.

6. Stepanenko V. P. Opredelenie parametrov nakopitelei energii kombinirovannykh silovykh ustanovok [Design of energy storage units for compound propulsion systems]. *Gornyi informatcionno-analiticheskii biulleten – Mining news and analysis bulletin*, 2016, issue 8, pp. 166–174. – Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-parametrov-nakopiteley-energii-kombinirovannykh-silovykh-ustanovok>. – Title from Screen.

7. Sarsikeev E. Zh., Sholokhova I.I., Sheveleva S.I. and others. Tekhniko-ekonomicheskaya otsenka proektov elektrosnabzheniia v avtonomnykh sistemakh na baze vozobnovliaemykh istochnikov energii [Technical and economical assessment of stand-alone renewable power system projects]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal – International research journal*, 2017, issue 03 (57), part 4, pp. 85–90. – Available at: <https://research-journal.org/technical/tekniko-ekonomicheskaya-ocenka-proektov-elektrosnabzheniya-v-avtonomnykh-sistemakh-na-baze-vozobnovlyaemykh-istochnikov-energii>. – Title from Screen.

8. Lukutin B.V., Sarsikeev E. Zh, Shandarova E.B. Otsenka tekhniko-ekonomicheskoi effektivnosti ispolzovaniia nakopitelei elektroenergii v avtonomnoi mikrogidroelektrostantsii [Evaluation of technical and economic efficiency of the electric energy storage device in stand-alone micro hydro power plant]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia – Modern problems of science and education*, 2015, issue № 2-2. – Available at: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=22874>. – Title from Screen.

9. Nepomniashchii V.A., Kononenko V. Iu., Smolentcev D.O., Veshchunov O.V. Rol nakopitelei elektroenergii v povyshenii effektivnosti raboty energosistem i otdelnykh energoobektov [The role of energy storage units in energy systems and single energy facilities efficiency improving]. *Energoekspert – Energy*

expert, 2014, issue 3, pp. 18–25. – Available at: <https://docplayer.ru/69034437-Rol-nakopiteley-elektroenergii-v-povyshenii-effektivnosti-raboty-energosisistem-i-otdelnyh-energoobektov.html>. – Title from Screen.

10. Belov V.F., Rozhkova S.A., Farafontov D.V. Eksperimentalnaia otsenka modeli optimalnogo upravleniia nakopitelem elektricheskoi energii [Experimental validation of optimal battery scheduling model]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii – Modern high technologies*, 2016, issue 5-1, pp. 20–26. – Available at: <https://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=35848>. – Title from Screen.

11. Liubarskii B.G., Shaida V.P., Buriakovskii S.G. Sravnitelnyi analiz nakopitelei energii dlia transportnykh sredstv [Comparative review of energy storage for vehicles]. *Zaloznychnyi Transport Ukrainy – Railway transport of Ukraine*, 2015, issue 6, pp. 13–21. – Available at: http://web.kpi.kharkov.ua/elmarsh/wp-content/uploads/sites/108/2017/03/2015_16.pdf. – Title from Screen.

12. Blank I.A. *Investitsionnyi menedzhment* [Investment management]. Kyiv, Elga-N Publ., Nika-Tcentr Publ., 2001. 448 p.

13. Maxim Zalevski. 12 domashnikh nakopitelei energii, kotorye mogut sopernichat s Tesla PowerWall 2.0 [12 home energy storage devices that can vie with Tesla PowerWall 2.0]. – Available at: <https://medium.com/@rodovidme/12-домашних-накопителей-энергии-которые-могут-соперничать-с-тесла-powerwall-2-0-e7695d1504e8>. – Title from Screen.

14. Tesla Energy Reveals Powerpack Pricing, Starting From 200 kWh Of Storage. – Available at: <https://insideevs.com/tesla-energy-reveals-powerpack-pricing/>. – Title from Screen.

15. Proekt «Miskyi hromadskyi transport v Ukraini». Finansovo-ekonomichne obgruntuvannia proektu [Project ‘Urban public transport in Ukraine’. Financial and economic justification for the project], *Ministerstvo infrastruktury Ukrainy – Ministry of Infrastructure of Ukraine*. – Available at: <https://mtu.gov.ua/news/27947.html>. – Title from Screen.

РЕФЕРАТ

Андрусенко С.І. Обґрунтування доцільності використання накопичувачів енергії в електромережах міського транспорту та домогосподарств / С.І. Андрусенко, О.С. Бугайчук, В.Б. Будниченко, В.С. Подпіснєв // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К.: НТУ, 2020. – Вип. 1 (46).

У статті викладена методика обґрунтування доцільності застосування накопичувачів енергії в електромережах міського транспорту і домогосподарств за умови використання дво- і тризонних тарифів на електроенергію та наведений приклад її застосування.

Об’єкт дослідження – електричні мережі з накопичувачами електроенергії.

Мета роботи – розробка методики визначення економічної доцільності використання накопичувачів електричної енергії в системах живлення міського електротранспорту або окремих домогосподарств за умови використання дво- і тризонних тарифів на електроенергію.

Методи дослідження – математичне моделювання процесів.

Зазвичай обсяги виробництва електроенергії та її споживання не співпадають у часі. Тому для оптимізації енергетичних потоків використовують накопичувачі енергії. Накопичувач заряджається, коли є надлишок енергії, і віддає накопичену енергію у систему в моменти її нестачі. Розвиток таких технологій може дати значний економічний ефект і має велике практичне значення. В Україні встановлені двозонні та тризонні тарифи на електроенергію для населення та суб’єктів господарювання. За двозонного тарифу коефіцієнти вартості електроенергії для побутових споживачів становлять 0,5 у нічний період з 23.00 по 7.00 та 1,0 – у денний період. Максимальна експлуатація міського електротранспорту, а також витрати електроенергії в підприємствах, організаціях та домогосподарствах припадають на період доби, коли вартість електроенергії найвища. Для зменшення загальних витрат можна заряджати накопичувачі електроенергії вночі й використовувати накопичену енергію вдень.

Запропоновано методику визначення економічної доцільності застосування накопичувачів електричної енергії за умови використання двозонних та тризонних тарифів. Отримано критерії визначення такої доцільності. Для розрахунку терміну окупності проєкту використовується метод сподіваної чистої теперішньої вартості проєкту. Показано, що за існуючих вартостей систем акумулювання енергії та тарифів на електроенергію в Україні використання таких систем для економії коштів за рахунок низьких нічних тарифів не є доцільним. Визначено, що економічна доцільність застосування накопичувачів електричної енергії за умови використання двозонного тарифу в Україні може мати місце у випадку існування накопичувачів, величина питомої вартості електроенергії від яких буде меншою ніж 0,2...0,7 грн/кВт·год.

Результати статті можуть бути використані під час проектування електричних систем з накопичувачами енергії.

Прогнозоване припущення щодо розвитку об'єкта дослідження – визначення умов доцільності використання накопичувачів енергії в схемах живлення споживачів з використанням альтернативних джерел електричної енергії.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЯ, НАКОПИЧУВАЧ, ТАРИФИ, ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТ, ДОМОГОСПОДАРСТВА, ІНВЕСТИЦІЇ, ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ, СПОДІВАНА ЧИСТА ТЕПЕРІШНЯ ВАРТІСТЬ, ТЕРМІН ОКУПНОСТІ.

ABSTRACT

Andrusenko S.I., Bugaichuk O.S., Budnychenko V.B., Podpisnov V.S. Business case for application of energy storage units in urban transport and home power grids. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific and Technical Collection. – Kyiv: National Transport University, 2020. – Issue 1 (46).

The article deals with the methodology of business case for application of energy storage units in urban transport and home power grids while using dual- and three-zone pricing; in addition it provides an example of the methodology application.

The object of study are electrical grids with energy storage units.

The purpose of the work is to develop the business case for application of energy storage units in urban transport and home power grids while using dual- and three-zone pricing.

Methods of investigations – mathematical modeling of processes.

As a rule, the volumes of electricity production and its consumption do not coincide in time. Therefore, energy storage units are used to optimize energy flows. The drive is charged with an excess of energy and transfers the stored energy to the system at the moments of its absence. The development of such technologies can have a significant economic effect and is of great practical importance. In Ukraine, dual-zone and three-zone pricing are set for the population and businesses. When using the dual-zone pricing, the energy price coefficients for households are 0.5 at night from 11 p.m. to 7 a.m. and 1.0 in the daytime. The maximum operation of urban electric transport, as well as power consumption by enterprises, organizations and households, occurs at the time of day with the highest energy price. To reduce overall consumption, you can charge energy storage units at night and use the stored energy during the day.

The methodology for business case for application of energy storage units by using dual-zone and three-zone pricing is proposed. We have obtained the criteria for this need. To calculate the payback period of the project, we use the method of expected current clean price is used. It is shown that at the existing prices of energy storage systems and electricity pricing in Ukraine, the use of such systems to save money due to low night pricing is impractical. It was determined that business case for application of energy storage units when using a dual-zone pricing in Ukraine can take place if only specific electricity pricing from available units is less than 0.2 ... 0.7 UAH/kWh.

The results of the study can be used in the design of electrical systems with energy storage units.

The predicted assumption about the development of the object of study is to determine business case for application of energy storage units in consumer power circuits using alternative sources of electricity.

KEYWORDS: ELECTRICITY, STORAGE UNITS, PRICING, ELECTRIC TRANSPORT, HOUSING, INVESTMENT, ECONOMIC EFFECT, EXPECTED CURRENT CLEAN PRICE, PAYBACK PERIOD.

РЕФЕРАТ

Андрусенко С.И. Обоснование целесообразности использования накопителей энергии в электросетях городского транспорта и домохозяйств / С.И. Андрусенко, А.С. Бугайчук, В.Б. Будниченко, В.С. Подписнов // Вестник Национального транспортного университета. Серия «Технические науки». Научно-технический сборник. – К.: НТУ, 2020. – Вып. 1 (46).

В статье изложена методика обоснования целесообразности использования накопителей энергии в электросетях городского транспорта и домохозяйств при использовании двух- и трехзонных тарифов на электроэнергию и приведен пример ее использования.

Объект исследования – электрические сети с накопителями электроэнергии.

Цель работы – разработка методики определения экономической целесообразности использования накопителей электрической энергии в системах питания городского электротранспорта или отдельных домохозяйств при использовании двух- и трехзонных тарифов на электроэнергию.

Методы исследования – математическое моделирование процессов.

Обычно объемы производства электроэнергии и ее потребление не совпадают по времени. Поэтому для оптимизации энергетических потоков используют накопители энергии. Накопитель заряжается, когда есть избыток энергии, и отдает накопленную энергию в систему в моменты ее недостатка. Развитие таких технологий может дать значительный экономический эффект и имеет большое практическое значение. В Украине установлены двухзонные и трехзонные тарифы на электроэнергию для населения и субъектов хозяйствования. При двухзонном тарифе коэффициенты стоимости электроэнергии для бытовых потребителей составляют 0,5 в ночное время с 23.00 по 7.00, и 1,0 – в дневной период. Максимальная эксплуатация городского электротранспорта, а также расходы электроэнергии на предприятиях, организациях и домохозяйствах приходится на время суток, когда стоимость электроэнергии наивысшая. Для уменьшения общих затрат можно заряжать накопители электроэнергии ночью и использовать накопленную энергию днем.

Предложена методика определения экономической целесообразности применения накопителей электрической энергии при использовании двухзонных и трехзонных тарифов. Получены критерии определения такой необходимости. Для расчета срока окупаемости проекта используется метод ожидаемой чистой приведенной стоимости проекта. Показано, что при существующих стоимостях систем аккумулирования энергии и тарифах на электроэнергию в Украине использование таких систем для экономии средств за счет низких ночных тарифов не целесообразно. Определено, что экономическая целесообразность применения накопителей электрической энергии при использовании двухзонного тарифа в Украине может иметь место при условии существования накопителей, величина удельной стоимости электроэнергии от которых будет менее 0,2 ... 0,7 грн/кВт·ч.

Результаты статьи могут быть использованы при проектировании электрических систем с накопителями энергии.

Прогнозируемое предположение по развитию объекта исследования – определение условий целесообразности использования накопителей энергии в схемах питания потребителей с использованием альтернативных источников электроэнергии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ, НАКОПИТЕЛИ, ТАРИФЫ, ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТ, ДОМОХОЗЯЙСТВА, ИНВЕСТИЦИИ, ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ, ОЖИДАЕМАЯ ЧИСТАЯ ТЕКУЩАЯ СТОИМОСТЬ, СРОК ОКУПАЕМОСТИ.

АВТОРИ:

Андрусенко Сергій Іванович, кандидат технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри технічної експлуатації автомобілів та автосервісу, e-mail: sergeandrusenko@gmail.com, тел. +380634720587, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 410А, orcid.org/0000-0002-9914-0200.

Бугайчук Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри технічної експлуатації автомобілів та автосервісу, e-mail: bug_os@ukr.net, тел. +380679955818, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 410, orcid.org/0000-0001-8646-6263.

Будниченко Валерій Борисович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, доцент кафедри технічної експлуатації автомобілів та автосервісу, e-mail: budnvb@i.ua, тел. +380679318431, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 410, orcid.org/0000-0002-1235-3781.

Подписнов Владислав Сергійович, Національний транспортний університет, асистент кафедри технічної експлуатації автомобілів та автосервісу, e-mail: vpodpisnov@ukr.net, тел. +380989623871, Україна, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, к. 410, orcid.org/0000-0002-8583-1502.

AUTHOR:

Andrusenko Serhii I., Ph.D. in Technical Science, Professor, National Transport University, Head of the Department of Motor Vehicle Maintenance and Service, e-mail: sergeandrusenko@gmail.com, tel. +380634720587, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovych-Pavlenko str. 1, of. 410A, orcid.org/0000-0002-9914-0200.

Buhaichuk Oleksandr S., Ph.D. in Technical Science, Associate Professor, National Transport University, Associate Professor of the Department of Motor Vehicle Maintenance and Service, e-mail: bug_os@ukr.net, tel. +380679955818, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovych-Pavlenko str. 1, of. 410, orcid.org/0000-0001-8646-6263.

Budnychenko Valerii B., Ph.D. in Technical Science, Associate Professor, National Transport University, Associate Professor of the Department of Motor Vehicle Maintenance and Service, e-mail: budnvvb@i.ua, tel. +380679318431, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovych-Pavlenko str. 1, of. 410, orcid.org/0000-0002-1235-3781.

Podpisnov Vladyslav S., National Transport University, Assistant Lecturer of the Department of Motor Vehicle Maintenance and Service, e-mail: vpodpisnov@ukr.net, tel. +380989623871, Ukraine, 01010, Kyiv, M. Omelianovych-Pavlenko str. 1, of. 410, orcid.org/0000-0002-8583-1502.

АВТОРЫ:

Андрусенко Сергей Иванович, кандидат технических наук, профессор, Национальный транспортный университет, заведующий кафедрой технической эксплуатации автомобилей и автосервиса, e-mail: sergeandrusenko@gmail.com, тел. +380634720587, Украина, 01010, г. Киев, ул. М. Омеляновича-Павленко, 1, к. 410А, orcid.org/0000-0002-9914-0200.

Бугайчук Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, Национальный транспортный университет, доцент кафедры технической эксплуатации автомобилей и автосервиса, e-mail: bug_os@ukr.net, тел. +380679955818, Украина, 01010, г. Киев, ул. М. Омеляновича-Павленко, 1, к. 410, orcid.org/0000-0001-8646-6263.

Будниченко Валерий Борисович, кандидат технических наук, доцент, Национальный транспортный университет, доцент кафедры технической эксплуатации автомобилей и автосервиса, e-mail: budnvvb@i.ua, тел. +380679318431, Украина, 01010, г. Киев, ул. М. Омеляновича-Павленко, 1, к. 410, orcid.org/0000-0002-1235-3781.

Подписнов Владислав Сергеевич, Национальный транспортный университет, ассистент кафедры технической эксплуатации автомобилей и автосервиса, e-mail: vpodpisnov@ukr.net, тел. +380989623871, Украина, 01010, г. Киев, ул. М. Омеляновича-Павленко, 1, к. 410, orcid.org/0000-0002-8583-1502.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Шаманський С.Й., доктор технічних наук, доцент, Національний авіаційний університет, доцент кафедри екології, Київ, Україна.

Гришук О.К., кандидат технічних наук, професор, Національний транспортний університет, проректор з навчальної роботи, Київ, Україна.

REVIEWER:

Shamanskyi S.Y., Doctor of Technical Science, Associate Professor, National Aviation University, Associate Professor, Department of Ecology, Kyiv, Ukraine.

Hryshchuk O.K., Candidate of Science (Engineering), Professor, National Transport University, Vice Rector for Academic Affairs, Kyiv, Ukraine.