

ЕКОНОМІКА ТА УПРАВЛІННЯ НАЦІОНАЛЬНИМ ГОСПОДАРСТВОМ

DOI: <https://doi.org/10.35774/econa2024.03.447>

JEL classification: L92, O33, Q42, R41

UDC: 621.314:629.423.1

Данило АНДРІЄНКО

кандидат технічних наук, докторант,
Класичний приватний університет, Україна
E-mail: andrds88@gmail.com
ORCID iD: 0009-0005-5504-497X

Сергій ШИЛО

старший викладач,
Національний університет «Запорізька політехніка», Україна
E-mail: sergey.shilo@gmail.com
ORCID iD: 0000-0002-4094-6269

ОЦІНКА ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

АНОТАЦІЯ

В роботі проведено оцінку доцільності використання статичних напівпровідникових перетворювачів на заміну електромашинних перетворювачів в електропоїздах та електропотягах постійного струму. Одним з важливих споживачів енергоресурсів є електрифікований транспорт, в тому числі і електропоїзди приміського сполучення. В результаті аналізу визначено лімітну ціну напівпровідникових перетворювачів, та час окупності виробу в залежності від часу роботи електропоїзду. Показано, що заміна електромашинного перетворювачів на напівпровідникові суттєво підвищує коефіцієнт корисної дії та знижує споживання електроенергії з мережі, що дозволяє додатково при модернізації електропоїздів збільшити споживні функції: вентиляцію та кондиціювання салонів, підвищити комфортність за рахунок зменшення шуму і вібрації, а також знизити витрати на експлуатацію обладнання. Авторами аргументовано, що передусім за рахунок економії електроенергії без введення додаткових функцій можлива окупність модернізації впродовж одного року за ціни рівній лімітній. За рівної потужності перетворювача є можливою уніфікація перетворювачів для електропоїздів та електропотягів. В статті наголошено, що для оцінки техніко-економічної доцільності впровадження статичних напівпровідникових перетворювачів для живлення споживачів власних потреб електропоїздів необхідно визначити лімітну ціну та прийнятний термін окупності первинних витрат на закупівлю нового обладнання. Сучасна тенденція покращення тягових електроприводів з використанням частотно-регульованих асинхронних двигунів, або імпульсних перетворювачів двигунів постійного струму пов'язана з відносно високою ціною перетворювачів, необхідності розробки асинхронних двигунів та модернізацією візків моторних вагонів, що потребує значних витрат і часу на їх впровадження, а повне оновлення парку потребує ще більших витрат. Дослідження показали, що за прийнятною лімітною ціною можливо використати уніфіковані рішення при модернізації електропоїздів та електропотягів постійного струму, та зменшити експлуатаційні втрати

© Данило Андрієнко, Сергій Шило, 2024

Отримано: 22.08.2024 р.

Рекомендовано до друку: 18.09.2024 р.

Опубліковано: 30.09.2024 р.



Ця стаття розповсюджується на умовах ліцензії Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0, яка дозволяє необмежене повторне використання, розповсюдження та відтворення на будь-якому носії, за умови правильного цитування оригінальної роботи.

Як цитувати: Андрієнко Д., Шило С. Оцінка доцільності використання напівпровідникових перетворювачів для живлення власних потреб електропоїздів постійного струму. *Економічний аналіз*. 2024. Том 34. № 3. С. 447-453. DOI: <https://doi.org/10.35774/econa2024.03.447>

за рахунок використання безколекторних асинхронних двигунів та зменшенні високовольтної апаратури у електропотягах.

Ключові слова: втрати електроенергії; електропоїзд; електропотяг; термін окупності; лімітна ціна.

Вступ

Сучасний стан економіки України потребує знаходити рішення, направлені на економію енерго- та матеріальних ресурсів.

Одним з важливих споживачів енергоресурсів є електрифікований транспорт, в тому числі і електропоїзди приміського сполучення. На теперішній час ПАТ «Укрзалізниця» експлуатує 325 електропоїздів постійного струму виробництва Ризького електромеханічного заводу (Латвія) 1970-2001 рр. та БАТ «Луганськтепловоз» (Україна) 2001-2016 рр. [1; 2]. При встановленому терміні служби у 28 років, парк електропоїздів підлягає оновленню та покращенню енергетичних характеристик.

У зв'язку з тяжким економічним станом ПАТ «Укрзалізниця» вимушено виконувати роботи з продовження терміну служби та часткової модернізації електропоїздів при капітальних ремонтах.

Для покращення енергетичних показників електропоїздів існує два напрями:

- модернізація тягового електроприводу моторних вагонів [3-5] або покупка нових електропоїздів;
- модернізація джерел живлення власних потреб електропоїздів.

Сучасна тенденція покращення тягових електроприводів з використанням частотно-регульованих асинхронних двигунів, або імпульсних перетворювачів двигунів постійного струму пов'язана з відносно високою ціною перетворювачів, необхідності

розробки асинхронних двигунів та модернізацією візків моторних вагонів, що потребує значних витрат і часу на їх впровадження. Повне оновлення парку потребує ще більших витрат.

Модернізація джерел живлення (ДЖ) власних потреб електропоїздів, які використовують електромашинні перетворювачі, що мають низький ККД стає нагальним, оскільки при капітальних ремонтах вагонів електропоїздів одночасно вирішуються проблеми покращення комфортності, кондиціонування повітря салонів, що потребує збільшення існуючої потужності з 38 кВт до 50 кВт.

Ця проблема вирішується при використанні статичних напівпровідникових перетворювачів, маючих відносно високий ККД, на заміну існуючих електромашинних [1; 2].

Мета статті

Метою даної роботи є визначення доцільності використання статичних напівпровідникових перетворювачів в якості джерел живлення на заміну електромашинних.

Основні результати роботи

На електропоїздах та електропотягах постійного струму для живлення власних потреб використовуються електромашинні перетворювачі, призначені для перетворення постійної напруги мережі живлення 3 000 В.

У таблиці 1 наведені технічні характеристики існуючих електромашинних перетворювачів (МП)

Таблиця 1. Технічні характеристики електромашинних перетворювачів

	Тип ЕМП 1П.6, 1П.7 (електропоїзда ЕР1, ЕР2, ЕПЛ2, ЕТ2)	тип НБ736 (електропотяг ВЛ-11)
Номінальна напруга, В	3000	3000
Вхідний номінальний струм, А	19,2	15
Номінальна потужність	38	30,4
Номінальна вихідна напруга, В/Гц	113×220×50	постійна 38
Номінальний вихідний струм, А	120	800
Коефіцієнт корисної дії (ККД)	0,63	0,64
Маса, кг	1980	1880
Опір демпферного пристрою, Ом	18	10

ЕМП типу 1П6 використовується для живлення компресора гальмівної системи та інших споживачів однієї секції електропоїзда.

ЕМП типу НБ 436 використовується для живлення обмоток збудження тягових двигунів електропотягів.

Для привода компресора гальмівної системи використовується окремий високовольтний двигун НБ 344 з номінальною потужністю 21 кВт. ККД_к 0,786, режим роботи – повторно-короткочасний з ПВ=50%. Додатковий демпферний опір – 22 Ом.

Вентиляція тягових двигунів забезпечується також окремим високовольтним двигуном постійного струму з номінальними напругою 3000 В, потужністю 53 кВт з ККД_в = 0,876, опором

Виходячи з того, що у склад електропоїзда входять (5-6) секцій, то сумарна потужність P_{Σ} , яка споживається з тягової мережі сягає

$$P_{\Sigma} = (5 \div 6) P_{in} / \eta_{in} = (5 \div 6) \cdot 38 / 0,63 \\ = (5 \div 6) \cdot 60,3 \\ = 301,5 \div 361,8 \text{ кВт}$$

де P_{in} – потужність ЕМП типу 1П.6, кВт
 η_{in} – ККД перетворювачів типу 1П.6

Сучасна тенденція побудови систем живлення електропоїздів потягів будується на використанні напівпровідникових перетворювачів, які мають ККД $\eta_n \geq 0,92$, що забезпечує можливість мати питому потужність споживачів

$$P = 60,3 \cdot 0,92 = 55,48 \text{ кВт}$$

Таким чином, за практично однакової споживної потужності з тягової мережі питома потужність навантаження зростає в $55,48/38 =$

1,46 рази, що забезпечує додаткову необхідну потужність живлення бортових споживачів при модернізації електропоїздів у процесі капітального ремонту.

Аналогічна ситуація виникає і при заміні ЕМП типу НБ436 на напівпровідниковий перетворювач, що дозволяє зменшити споживання електроенергії, враховуючи дані таблиці 1, у $0,92/0,64=1,438$ рази.

Враховуючи, що ЕМП мають на вході відповідні демпферні опори, які постійно включені у коло їх живлення, виникає додаткова можливість підвищити питому потужність бортових споживачів, відповідно до електропоїздів та електропотягів

$$\Delta P_{in} = R_{in} I_{in}^2 = 18 \cdot 9,2^2 = 6,6 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_{NB} = R_{NB} I_{NB}^2 = 10 \cdot 15^2 = 2,25 \text{ кВт}$$

Таким чином, для електропоїздів у разі використання напівпровідникових перетворювачів, питома потужність споживачів сягає 62,08 кВт, а для електропотягів – 45,95 кВт.

Відповідно, стає можливим додатково встановити нове обладнання для електропоїздів – 24,08 кВт, для електропотягів – 15,45 кВт.

Наявність надлишкової потужності дозволяє реалізувати модернізацію системи електроприводу компресора з двигуном 21 кВт з ПВ=50%, що потребує 10,5 кВт потужності з заміною двигуна постійного струму та асинхронний двигун [4].

Вказані заміни дозволять зменшити експлуатаційні втрати та обслуговування колектора, зменшити кількість високовольтної апаратури та втрати електроенергії на величину

$$\Delta P_k = R_k I_k^2 = P_k \left(\frac{P_k}{U_n \eta_k} \right)^2 = 22 \left(\frac{2110^3}{3000 \cdot 0,786} \right)^2 \cdot 0,5 = 872,5 \text{ кВт}$$

Оскільки двигуни компресора включаються по сигналу давача тиску у гальмівній системі, то частота пуску двигуна відбувається в залежності від стану гальмівної системи і режиму підтримки швидкості електропоїзда. Приймається, що пуск відбувається у

середньому 1 раз за 10 хвилин, з пусковим струмом, який обмежується додатковими опором у 22 Ом.

Відповідно, втрати потужності при одноступеневому пуску визначаються з виразу

$$\Delta P'_k = R_k I_{\text{пуск}}^2 \frac{t_{\text{пуск}}}{3} = \frac{U_H^2}{R_k} \cdot \frac{4}{3} K_{\text{п}} = \frac{3000^2}{22} \cdot \frac{4}{3} \cdot 6 \approx 3,6 \text{ кВт/год.}$$

$$\text{де } t_{\text{пуск}} \approx 3 - 5 \text{ с} = \frac{4 \cdot K_{\text{п}}}{3600}$$

$$K_{\text{п}} - \text{кількість пусків} = \frac{3600}{4} = 900$$

Сумарні втрати потужності при заміні ЕМП тип НБ436 та привода компресора на напівпровідниковий перетворювач становить $(3,6+0,872) \cdot 0,92+15,45=19,59$ кВт·год.

Заміна двигуна постійного струму на асинхронний з живленням від напівпровідникового перетворювача потребує збільшення його потужності до 90 кВт

Для оцінки техніко-економічної доцільності впровадження статичних напівпровідникових

перетворювачів для живлення споживачів власних потреб електропоїздів необхідно визначити лімітну ціну та прийнятний термін окупності первинних витрат на закупівлю нового обладнання.

Для цього скористуємося розповсюдженим методом оцінки ефективності нової техніки у електротехнічній галузі

$$E_e = (P_{\text{ПВ}} + \Delta P_R - P_{\text{сп}}) T_p C_e = \Delta E_e T_p \text{ [грн.]}$$

де $P_{\text{ПВ}} = 60,3$ кВт – споживна потужність електромашинного перетворювача ПВ за навантаження 38 кВт

$$\Delta P_R = R I_{\text{нПВ}}^2 = 18 \cdot 19,2^2 = 6,6 \text{ кВт}$$

– додаткові втрати у послідовного включеному резисторі $R=18$ Ом.

$P_{\text{сп}} = 38/0,92$ – споживана потужність напівпровідникового перетворювача при навантаженні 38 кВт, припускаючи, що $\eta=0,92$ const.

C_e – вартість електроенергії (2,2 грн. кВт·год.)

T_p – час роботи електропоїзду, приймаємо 2000, 3000, 4000 год. на рік.

Результат розрахунків економії електроенергії зведено в табл. 2.

$$E_e = \frac{C_e}{E_k + P_{\text{ам}}} \quad (1)$$

де E_e – економічний ефект нової техніки (грн.);

C_e – економія електроенергії (грн.);

$E_k = 0,1$ – норматив приведення;

$P_{\text{ам}}$ – відрахування на амортизацію;

$$P_{\text{ам}} = \frac{E_k}{(1 + E_k)^T - 1} = \frac{0,1}{(1 + 0,1)^{15} - 1} = 0,315$$

де $T=15$ років – термін служби виробу.

Вартість економії електроенергії при заміні ЕМП 1П.6 на напівпровідниковий дорівнює

Таблиця 2. Розрахунок економії електроенергії

E_e , грн.	$T_{\text{рік}}$		
	2000	3000	4000
E_e 38	798152	1197228	1596304
	974788	1462182	1949576
E_e 50	1050128	1575192	2100256
	1282605	1923907	2563210

В таблиці 2 дробом вказана економія для споживачів електроенергії I класу.

Для реалізації потужності навантаження 50 кВт маємо умовну вартість економії електроенергії

$$C_{e50} = C_{e38} \cdot \frac{50}{38} = C_{e38} \cdot 1,3158 \quad (3)$$

Лімітна ціна $C_{\text{л}}$ визначається з виразу

$$C_{\text{л}} = C_0 + E_e K \quad (4)$$

де C_0 – ціна базового виробу;

$K=1$ – коефіцієнт корисного ефекту, оскільки економічний ефект досягається новим перетворювачем.

$\Pi_6=159\,000$ грн. – витрати при капітальному ремонті і електромашинного перетворювача по даному депо. В цінах $\$1=24$ грн.

Відповідно до табл. 1 в залежності від часу роботи електропоїзда та класу по напрузі лімітна ціна буде знаходитись у межах, відповідно до виразу (4), $957.192 - 2.794.210$ грн.

Термін окупності визначається виразом:

$$T_{ок} = \frac{\Pi}{E_e + \Pi_6} \quad (5)$$

де Π – ціна виробу

За $\Pi_{л.ср}$ – строк окупності становить 1 рік.

Вважаючи, що середній час роботи електропоїзду становить 3000 годин на рік, будемо мати середню лімітну ціну $\Pi_{л.ср} = 1.698.832$ грн.

Приймаючи середню ціну за базову

$$\Pi_{л.ср} = \Pi_6 = 1 \quad (6)$$

маємо значення допустимої ціни виробу в залежності від реальної ціни нового виробу

$$\Pi_{сп} = \Pi_6 K_p = 1,69 \cdot 10^6 K_p \text{ грн.} \quad (7)$$

де K_p – розрахункова кількість років окупності

Таким чином [37], ми маємо критерії оцінки можливості впровадження статичного перетворювача взамін електромашинного.

Оскільки час руху, кількість пасажиропотоку, коливання напруги тягової мережі впливають на втрати електричної енергії, то для більш точного розрахунку необхідно проводити статистичну обробку параметрів руху на окремих ділянках та формувати комп'ютерні моделі розрахунку втрат електроенергії [6]

Оскільки сумарні втрати потужності в ЕМП типу НБ436 і двигуні компресору становлять 19,59 кВт, то при рівних ККД асинхронного двигуна і перетворювача при модернізації електропотягу допустима лімітна ціна ЦНБ буде декілька менше за лімітну ціну електропоїзда і становитиме

$$\Pi_{НБ} = \frac{19,59}{24,08} \cdot 1,69 \cdot 10^6 K_p = 1,375 K_p$$

Заміна двигунів постійного струму вентилятора при збільшенні потужності напівпровідникового перетворювача призводить до збільшення втрат потужності в двигуні за рахунок ККД перетворювачі в 1,044 рази і, відповідно, до зменшення лімітної ціни до величини $\Pi'_{НБ} = 1,32 \cdot 10^6 K_p$.

Враховуючи, що збільшення потужності перетворювача в два рази призводить до збільшення реальної ціни перетворювача у 1,5-1,6 разів, що призведе до збільшення терміну окупності перетворювача.

Подальше зменшення строку окупності можлива при реалізації регулювання потужності вентилятора в функції струму (температури) обмоток якоря, що потребує додаткових досліджень температурних режимів тягових двигунів в функції струму якоря та швидкості його обертання.

Висновки та перспективи подальших досліджень

1. Визначено базові критерії оцінки можливості заміни електромашинних перетворювачів на напівпровідникові.

2. Значно вищий коефіцієнт корисної дії (ККД) напівпровідникового перетворювача дозволяє без збільшення споживання електроенергії з тягової мережі в 1,4 рази підвищити номінальну потужність навантаження, що дозволяє суттєво покращити комфортність пасажирських салонів електропоїздів постійного струму.

3. Дослідження показали, що за прийнятої лімітної ціни можливо використати уніфіковані рішення при модернізації електропоїздів та електропотягів постійного струму, та зменшити експлуатаційні втрати за рахунок використання безколекторних асинхронних двигунів та зменшенні високовольтної апаратури у електропотягах.

4. Встановлено, що термін окупності при заміні електромашинних перетворювачів на напівпровідникові менше у електропоїздах у порівнянні з електропотягами у 1,2 рази.

5. Суттєво зменшити експлуатаційні витрати завдяки відсутності обертових частин та збільшенню терміну служби у 2,5 рази (до 15 років).

6. Суттєво зменшується знос сальників компресора гальмівної системи за рахунок зменшення пускових моментів та плавного

пуску двигуна компресора, що сприяє зменшенню експлуатаційних витрат.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Басов Г. Г., Яцько С. І. Розвиток електричного моторвагонного рухомого складу. Харків: Алекс+Н, 2005. 248 с.
2. Вельможко О. Усі потяги, електрички та вагони «Укрзалізниці». 2022.
3. Сучасна силова електроніка у схемах тягових перетворювачів (пер. з нім.) *Eisenbahn technische Rundschau*. 2005. № 7. 89443-454. ЖОМ. 2006. № 4. С. 28-40.
4. Andrienko A. P., Andrienko A. D., Zhorniak L., Maksymovych O., Sichenko V. An Electric Drive Traction Transmission of Diesel Train Based on the Induction Motor with a Phase Rotor. 2023 IEEE: 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2023. pp. 1-5. DOI: 10.1109/MEES61.502.2023.
5. Андрієнко П. Д., Шило С. І. Використання широтно-імпульсного регулювання для покращення характеристик електродвигунів. XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми автоматизованого електроприводу: теорія і практика». *Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету*. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007. С. 72-74.
6. Євдокімов В. А., Буркаєв В. Х., Остапченко К. Е. Комп'ютерна система моделювання процесів ціноутворення на оптовому ринку електроенергії. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 2. С. 72-81. DOI: 10.15407/techned2024.0272.

REFERENCES

1. Basov, H. H., & Yatsko, S. I. (2005). *Rozvytok elektrychnoho motorvagonnoho rukhomogo skladu* [Development of electric multiple unit rolling stock]. Kharkiv: Alex+N.
2. Velymzhko, O. (2022). All trains, electric trains, and carriages of Ukrzaliznytsia.
3. Modern power electronics in traction converter circuits (Transl. from German). (2005). *Eisenbahn Technische Rundschau*, 7(89443-454), 28-40. ZhOM, 2006(4), 28-40.
4. Andrienko, A. P., Andrienko, A. D., Zhorniak, L., Maksymovych, O., & Sichenko, V. (2023). An electric drive traction transmission of diesel train based on the induction motor with a phase rotor. *2023 IEEE: 5th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/MEES61.502.2023>.
5. Andrienko, P. D., & Shilo, S. I. (2007). Use of pulse-width modulation for improving electric motor characteristics. In *Proceedings of the XIV International Scientific and Technical Conference "Problems of Automated Electric Drive: Theory and Practice"* (pp. 72-74). Dniprodzerzhynsk: Dniprodzerzhynsk State Technical University.
6. Yevdokymov, V. A., Burkaiev, V. K., & Ostapchenko, K. E. (2024). A computer simulation system for pricing processes in the wholesale electricity market. *Technical Electrodynamics*, 2, 72-81. <https://doi.org/10.15407/techned2024.0272>.

Danylo Andrienko, Candidate of Technical Sciences, Doctoral Student, Classical Private University, Ukraine
Serhii Shylo, Senior Lecturer, National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Ukraine

Assessment of the feasibility of using semiconductor converters for powering the auxiliary systems of direct current electric trains

Abstract

The study evaluates the feasibility of using static semiconductor converters to replace electromechanical converters in direct current electric trains and suburban trains. Electrified transport, particularly suburban electric trains, is one of the major consumers of energy resources. The analysis identified the limit price of semiconductor converters and the payback period depending on the operational time of the train. It was demonstrated that replacing electromechanical converters with semiconductor ones significantly improves efficiency and reduces electricity consumption from the grid. This allows for the expansion of auxiliary functions during train modernization, such as ventilation and air conditioning, improving comfort by reducing noise and vibration, and lowering equipment maintenance costs. The authors argue that, primarily due to energy savings, without introducing additional functions, the modernization can achieve payback within one year at a price equal to the limit price. With equal converter power, unification of converters for electric trains and suburban trains is possible. The article emphasizes that for assessing the technical and economic feasibility of implementing static semiconductor converters to power the auxiliary systems of electric trains, it is essential to determine the limit price and the acceptable payback period for the initial investment in new equipment. The modern trend of improving traction electric drives through the use of frequency-controlled asynchronous motors or pulse converters for DC motors is associated with the relatively high cost of converters, the need to develop asynchronous motors, and the modernization of motor carriages, which requires significant costs and time for implementation. A complete renewal of the fleet would require even greater expenditures. The study showed that with an acceptable limit price, unified solutions could be applied in the modernization of direct current electric trains and suburban trains, reducing operational losses by using brushless asynchronous motors and reducing high-voltage equipment in trains.

Keywords: energy losses; electric train; suburban train; payback period; limit price.

Cite as: Andrienko, D., and Shylo, S. (2024). Assessment of the feasibility of using semiconductor converters for powering the auxiliary systems of direct current electric trains. *Economic analysis*, 34 (3), 447-453. DOI: <https://doi.org/10.35774/econa2024.03.447>