

# Система живлення тролейбусу з ВИСОКОВОЛЬТНИМ акумулятором

Мартюхін І. А., ORCID [0000-0003-3004-0487](https://orcid.org/0000-0003-3004-0487)

Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"  
Київ, Україна

**Анотація**—У статті розглядається система електроживлення транспортного засобу з високовольтним акумулятором. Показано переваги використання такої системи електроживлення та досліджено режими її роботи і порівняно зі звичайною схемою електроживлення тролейбуса. Визначається ШІМ модуляція для оптимального режиму роботи. Для живлення електроприводу у разі відсутності мережі буде використовуватися акумулятор. Перетворення енергії відбувається за допомогою перетворювача з двостороннім передаванням енергії. Такий перетворювач потрібен для того, щоб заряджати акумулятор енергією, яка виділяється при гальмуванні. Накопичена енергія, повторно використовується, щоб знизити навантаження на мережу під час пуску двигуна.

**Ключові слова** — перетворювач; електропривід; векторна ШІМ; 3х фазний інвертор.

## I. ВСТУП

Тролейбус – це один з економічно вигідних транспортних, адже він дешевший в експлуатації ніж автобус, а також він не має викидів CO<sub>2</sub>, що одночасно його робить екологічним транспортним засобом (ТЗ). Однак він має один суттєвий недолік, такий як обмежена мобільність, що обумовлюється прив'язкою до мережі живлення та лінії по якій вона прокладена [1]. А тому тролейбус не має змоги у разі критичної ситуації на дорозі або ДТП змінити полосу руху або ж об'їхати заваду, яка виникла на шляху. Тому в такому випадку доцільно використовувати тягову систему до якої під'єднаний високовольтний акумулятор. Ємність такого акумулятора є невеликою в порівнянні з електробусом, тому вартість такого транспортного засобу є низькою. Високовольтний акумулятор може використовуватися в автономному режимі коли відсутня мережа для переміщення на незначні відстані або працює паралельно з мережею.

Паралельна робота акумулятора з мережею дозволяє зменшити навантаження на мережу під час розгону транспортного засобу та рекуперувати енергію в акумулятор, що зменшить втрати електроенергії [2]. У роботі розробляється структура та моделюється тягова система з високовольтним акумулятором.

На Рис. 1 зображена структурна схема системи електроживлення тролейбуса з високовольтним акумулятором.

Головна відмінність такої системи електроживлення від звичайної системи живлення тролейбуса є те, що він якусь частину маршруту може рухатися автономно. У статті аналізується режими роботи такої системи, визначаються переваги та недоліки, а також пропонуються шляхи їх вирішення. Робота електропривода без ємнісного накопичувача.

Енергія для живлення відбирається від джерела постійної напруги. Випрямляч у такому випадку потрібен для того, щоб не виникло аварійного режиму роботи коли полярність підключення може бути переплутана. Після випрямляча іде ланка постійного струму – це конденсатор. До ланки ж підключається 3-х фазний інвертор, який формує 3-х фазну напругу на двигун.

Основні недоліки такої схеми, це те що під час пуску потужність, яка відбирається від мережі значно більше ніж в усталеному режимі. А також коли відбувається гальмування енергія не може передаватися назад у мережу, через те, що випрямляч не дозволяє енергії повернутися назад. В такому випадку замість випрямляча можна використовувати активний випрямляч, який складається з транзисторів [3]. Це дозволяє рекуперувати енергію назад в мережу.

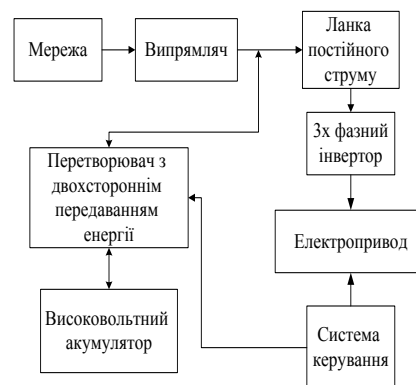


Рис. 1 Система електроживлення тролейбуса з високовольтним акумулятором

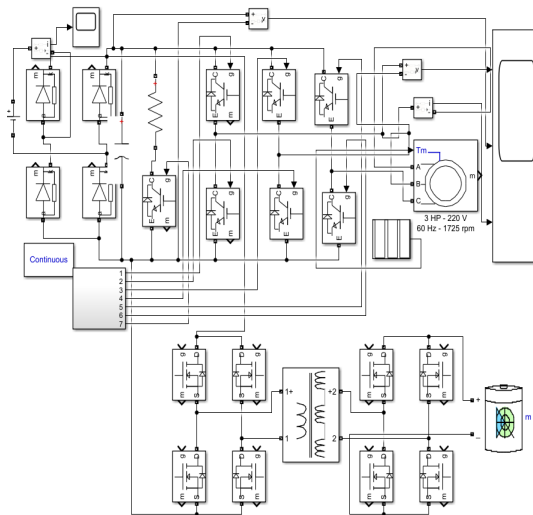


Рис. 2 Модель електропривода

Переважно тролейбусні мережі не передбачені для рекуперації енергії і як правило в таких схемах встановлюють гальмівний резистор, який підключається до ланки постійного струму під час гальмування.

Проаналізуємо режими роботи такої системи електроживлення за допомогою моделі MATLAB® зображеної на Рис. 2.

На моделі зображено схему електроживлення тролейбуса. Живлення відбувається за рахунок 3-х фазного джерела напруги після якого встановлений випрямляч, ланка постійного струму (конденсатор), гальмівний резистор, 3-х фазний інвертор від якого живиться двигун.

«Класична» ШІМ – це найпростіший метод модуляції, але при використанні цього метода модуляції амплітуда першої гармоніки є доволі низькою [4].

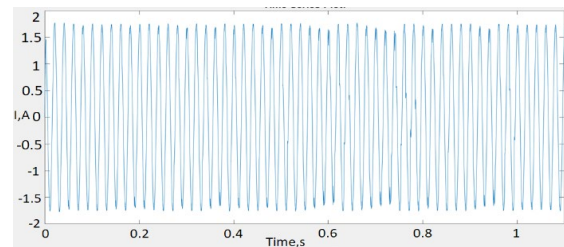
Завдання підвищення основної гармоніки вхідної напруги інвертора до напруги джерела живлення є досить актуально. Тому існують два інших способи, які дозволяють вирішити цю проблему.

Перший – це ШІМ з перемодуляцією третьої гармоніки [5]. При реалізації даного різновиду ШІМ сигнал кожної фази, який подається на входи 3-х фазного ШІМ-модулятора, до нього додається нульова послідовність, що містить третю гармоніку основної частоти в зазначеній нижче пропорції:

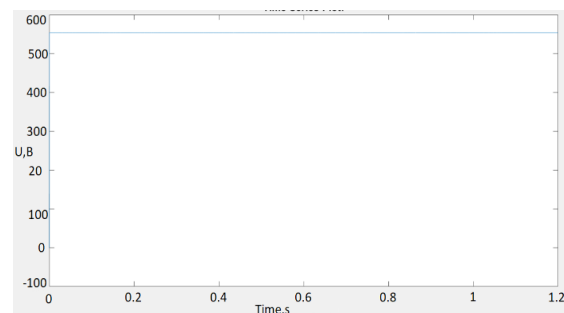
$$u_{yA} = \frac{K_M U_M}{\cos(\frac{\pi}{6})} \{ \sin(\theta) + [1 - \cos(\frac{\pi}{6})] \cdot \sin(3\theta) \};$$

$$u_{yB} = \frac{K_M U_M}{\cos(\frac{\pi}{6})} \{ \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) + [1 - \cos(\frac{\pi}{6})] \cdot \sin(3\theta) \};$$

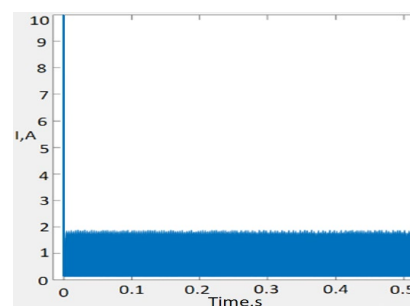
$$u_{yC} = \frac{K_M U_M}{\cos(\frac{\pi}{6})} \{ \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) + [1 - \cos(\frac{\pi}{6})] \cdot \sin(3\theta) \};$$



а)



б)



в)

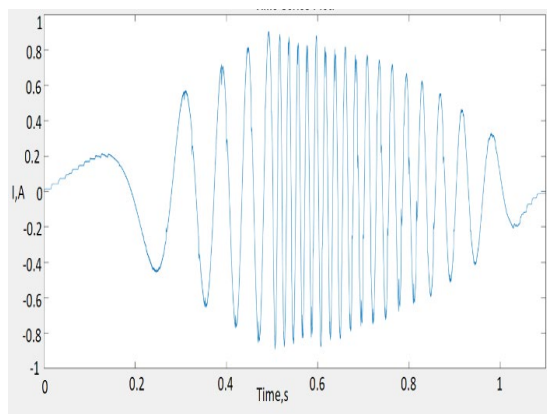
Рис. 3 Струм фази (а), напруга ланки постійного струму (б), струм мережі(в)

Другий спосіб – це векторна ШІМ [6]. Реалізація векторної ШІМ здійснюється за допомогою 8 базових векторів в трифазній системі координат. Кожен базовий вектор характеризується певним станом ключів інвертора.

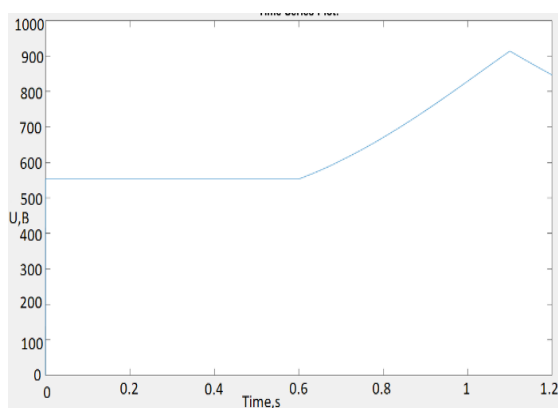
Для трифазного симетричної системи, якою можна вважати двигун, фазні навантаження рівні, отже, амплітуда всіх ненульових базових векторів становить  $2U_d/3$ . Обидва нульових вектора V7 (0+) і V8 (0-), незважаючи на різний стан ключів, забезпечують одночасне прикладення нульових напруг до обмоток статора.

При моделюванні даної системи (з використанням векторної ШІМ) діаграми роботи без гальмівного резистора та накопичувача зображено на Рис. 3.

Під час перехідних процесів є перевищення по струму, це внаслідок того, що частота роботи інвертора відразу відповідає номінальним оборотам двигуна. При плавній зміні обертів таких великих перехідних процесів не буде (див. Рис. 4).



а)



б)

Рис. 4 Струм фази (а), напруга ланки постійного струму (б)

В роботі, що поклала початок частотному керуванню, академік М. П. Костенко встановив наступний закон частотного управління, який можна записати рівнянням [7]:

$$\frac{U_1'}{U_1} = \frac{f_1'}{f_1} \cdot \sqrt{\frac{M_c'}{M_c}}$$

де  $M_c'$  та  $M_c$  – статичні моменти опору, які відповідають швидкості двигуна при частотах  $f_1'$  та  $f_1$ ;  $U_1'$  та  $U_1$  – відповідні частотам  $f_1'$  та  $f_1$  напруги.

Запропонований закон керування дає змогу плавно збільшувати частоту напруги, що зменшує пусковий струм двигуна.

Для того, щоб усунути сплеск напруги при гальмуванні у модель необхідно додати гальмівний транзистор, який обмежує перенапругу.

Діаграми, отримані, з використання моделі електропривода без ємнісного накопичувача з гальмівним резистором зображені на Рис. 5.

За рахунок того, що в моделі з'явилися гальмівний резистор з транзистором, таким чином була усунута проблема збільшення струму, але в такому випадку вся корисна енергія, яка б могла використовуватися

розсіюється на резисторі. І в такому випадку доцільно використовувати додатковий перетворювач, який сам забере цю енергію і потім її можна буде використати при пуску двигуна.

## II. РОБОТА ПЕРЕТВОРЮВАЧА З ДВОСТОРОННІМ ПЕРЕДАВАННЯМ ЕНЕРГІЇ

Такий перетворювач потрібен для того, щоб заряджати акумулятор енергією, яка виділяється при гальмуванні. А після того, як енергія накопичилася вона повторно використовується, щоб знизити навантаження на мережу під час пуску двигуна.

Керування електроприводом і перетворювачем є узгодженим. Коли електропривод гальмує, то це зумовлює підвищення напруги в ланці постійного струму і цей надлишок енергії, який зумовив це зростання, повинен піти в акумулятор для накопичення енергії [8].

Для живлення електроприводу у разі відсутності мережі буде використовуватися акумулятор. Перетворення енергії відбувається за допомогою перетворювача з двостороннім передаванням енергії.

На Рис. 6 зображено діаграма системи електроживлення з ємнісним накопичувачем. Така система дає можливість запускати двигун з меншим навантаженням на мережу.

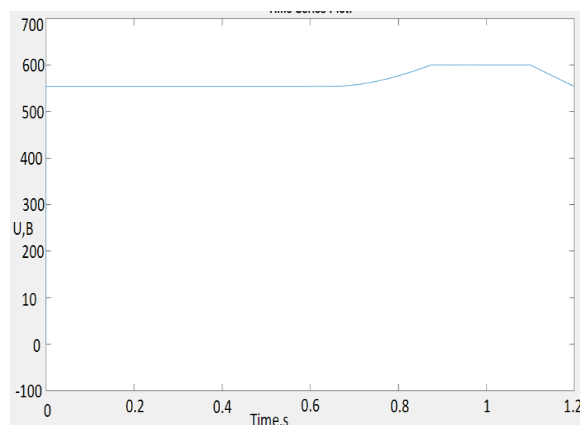


Рис. 5 Напруга ланки постійного струму

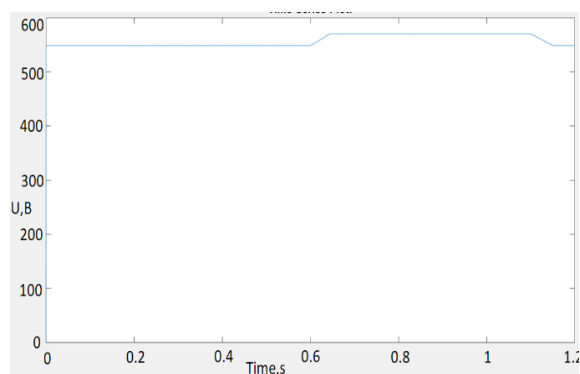


Рис. 6 Напруга ланки постійного струму

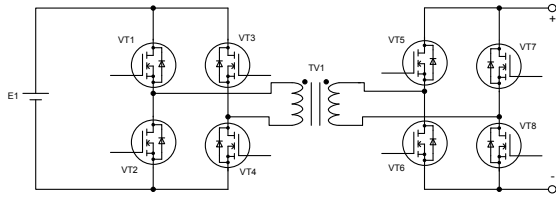


Рис. 7 Перетворювач з двостороннім передаванням енергії

Для передавання енергії від акумулятора до ланки постійного струму в інвертора 1 замикаються транзистори VT1 та VT4, діоди які вбудовані в транзистори VT5 та VT8 інвертора 2 будуть виконувати функцію випрямляча (див. Рис. 7) [9] [10]

Для накопичення енергії в акумуляторі, яка буде надходити від ланки постійного струму в інвертора 2 замикаються транзистори VT5 та VT8, діоди які вбудовані в транзистори VT1 та VT4 інвертора 1 будуть виконувати функцію випрямляча.

В іншому режимі для передавання енергії від акумулятора до ланки постійного струму в інвертора 1 замикаються транзистори VT3 та VT2, діоди які вбудовані в транзистори VT6 та VT7 інвертора 2 будуть виконувати функцію випрямляча.

Для накопичення енергії в акумуляторі, яка буде надходити від ланки постійного струму в інвертора 2 замикаються транзистори VT6 та VT7, діоди які вбудовані в транзистори VT3 та VT2 інвертора 1 будуть виконувати функцію випрямляча.

#### ВИСНОВКИ

У статті запропоновано систему електроживлення тролейбуса з високовольтним акумулятором. Отримані характеристики для різних режимів роботи електроприводу вказують на те, що за для підвищення

ефективності роботи системи та зменшення втрат необхідно використовувати перетворювач з двостороннім передаванням енергії. А також за рахунок підключення гальмівного транзистора вдалося усунути збільшення струму в даній моделі.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] P. A. Bogodisty and A. V. Kovalev, Design and operation of trolleybuses YuMZ-T2, YuMZ-T2P, YuMZ-T2 mod. 7, Bogdan-T70110, Bogdan-T70117. Poltava: ASMI, 2008.
- [2] I. A. Martyukhin and M. V. Bely, "Vehicle with a battery with reduced overall dimensions," *ElectronAccountEng*, vol. 2, no. 1, pp. 16–20, 2019, DOI: [10.20535/2617-0965.2019.2.1.162155](https://doi.org/10.20535/2617-0965.2019.2.1.162155).
- [3] O. Plakhtii, V. Nerubatskyi, D. Sushko, I. Ryshchenko, V. Tsybulnyk, and D. Hordiienko, "Improving energy characteristics of ac electric rolling stock by using the three-level active four-quadrant rectifiers," *Eastern-European J. Enterp. Technol.*, vol. 4, no. 8, pp. 6–14, 2019, DOI: [10.15587/1729-4061.2019.174112](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174112).
- [4] A. S. Sandler and Y. M. Gusyatsky, Thyristor inverters with pulse width modulation for controlling asynchronous motors. Moscow: Energy, 1968.
- [5] R. T. Schreiner, Mathematical modeling of AC drives with semiconductor frequency converters. Ekaterinburg: URO, 2000, ISBN: 5-7691-1111-9.
- [6] G. S. Zinoviev, The basics of power electronics, 3rd ed. Novosibirsk: NSTU, 2004, ISBN: 5-7782-0264-4.
- [7] V. V. Korovin and S. G. Obukhov, "Modulation methods for constructing pulse converters," *Pract. power Electron.*, no. 19, pp. 38–43, 2005.
- [8] B. F. Samoilenko, B. T. Kononov, and P. M. Pushkov, Control systems for power supply and electric drive: textbook. Ministry of Defense of the USSR, 1990.
- [9] B. F. Samoilenko, B. T. Kononov, and Y. A. Skvortsov, Autonomous power supply systems. Ministry of Defense of the USSR, 1990.
- [10] I. O. Hubka and I. V. Verbytskyi, "Combined trolleybus power supply system and economic benefits from its use," *MICROSYSTEMS, Electron. Acoust.*, vol. 4, no. 24, pp. 32–39, 2019, DOI: [10.20535/2523-4455.2019.24.4.183845](https://doi.org/10.20535/2523-4455.2019.24.4.183845).

# A Trolleybus Power System with High-Voltage Battery

I. A. Martiukhin, ORCID [0000-0003-3004-0487](https://orcid.org/0000-0003-3004-0487)

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
Kyiv, Ukraine

**Abstract**—A trolleybus is the most economically advantageous transport because it is cheaper to operate than a bus, and it has no CO<sub>2</sub> emissions, which makes it an eco-friendly vehicle. However, it does have one major drawback, such as the limited mobility that is caused by the connection to the power grid and the line along which it is laid. Therefore, in this case, it is advisable to use a traction system to which a high-voltage battery is connected. The capacity of such a battery is not large compared to the electric bus, so the cost of such a vehicle is low. The structure and modeling of the traction system with a high-voltage battery is developed. The main difference between this scheme and the usual trolleybus is that it can move part of the route autonomously. The energy to power the actuator is taken from a constant voltage source. In this case, the rectifier is required to prevent the emergency mode from occurring when the polarity of the connection can be confused. After the rectifier goes the DC link is a capacitor. The link is connected to a 3-phase inverter, which generates a 3-phase voltage on the motor. The main disadvantages of this scheme is that during start-up power, which is drawn from the network much more than in the steady state. Also, when braking occurs, the energy cannot be transmitted back to the network, because the rectifier does not allow the energy to go back. In this case, an active rectifier consisting of transistors can be used instead of a rectifier. This allows the energy to be recovered back into the grid. For the most part, trolleybus networks are not designed for energy recovery and, as a rule, such circuits install a brake resistor that connects to the DC link during braking, increase in current, but in this case all the useful energy that could be used is dissipated on the resistor. In this case, it is advisable to use an additional converter, which itself will consume this energy and then it can be used when starting the engine. Such a converter is required to charge the battery with the energy released during braking. And after the energy has been accumulated, it is reused to reduce grid load during engine start-up. The control of the actuator and the converter is consistent. When the actuator is braking, it causes an increase in the voltage in the DC link and this excess energy, which caused this increase, must go into the accumulator for energy storage.

**Keywords** —converter; electric drive; PWM vector; 3-phase inverter.

