

УДК 621.314

ДОСЛІДЖЕННЯ АКТИВНОГО ФІЛЬТРА-СТАБІЛІЗАТОРА НА БАЗІ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Кандидати техн. наук О. І. Семененко, Ю. О. Семененко, асист. О. Д. Семененко

RESEARCH OF AN ACTIVE FILTER-STABILIZER BASED ON A PULSE WIDTH CONVERTER

PhD (Tech.) O. I. Semenenko, PhD (Tech.) Y. O. Semenenko, Assistant O. D. Semenenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336535>



Анотація. У статті наведено результати дослідження активного фільтра-стабілізатора на базі широтно-імпульсного перетворювача понижувального типу в складі перетворювального агрегату тягової підстанції постійного струму. Така реалізація силової частини забезпечить значне спрощення будови активного фільтра-стабілізатора та знизить вартість впровадження його на тягових підстанціях. Синтезовано схему та алгоритм

керування активним фільтром-стабілізатором на базі структури широтно-імпульсного перетворювача, перевірено його працездатність і проаналізовано основні характеристики.

Ключові слова: якість електричної енергії, тягова підстанція, перетворювальний агрегат, регулятор напруги.

Abstract. Under the conditions of increasing loads on sections of the direct current traction network, traditional measures no longer ensure high-quality and efficient functioning of the traction power supply system. In previous works, the authors of this article proposed incorporating an active filter-stabilizer based on a single-phase bridge converter circuit into the converter unit of a traction substation. The purpose of this approach is to improve the quality of direct current electrical energy and enhance the electromagnetic compatibility of the direct current traction power supply system with adjacent electrical installations.

The active filter-stabilizer based on the bridge converter circuit can be simplified by implementing it using a buck-type pulse-width modulation (PWM) converter structure. The article presents the results of a study on the active filter-stabilizer based on a buck-type PWM converter within the converter unit of a direct current traction substation. The synthesis of the circuit and control algorithm for the active filter-stabilizer based on the buck-type PWM converter structure has been carried out. A closed-loop automatic output voltage regulation system for the converter unit with the new variant of the active filter-stabilizer is proposed.

Using modeling in the MATLAB environment, the functionality was verified and the quality indicators of the direct current electrical energy of the converter unit with the active filter-stabilizer based on the PWM converter were analyzed.

The research confirmed that implementing the power section based on the PWM converter structure indeed significantly simplifies the design of the previously proposed active filter-stabilizer and reduces the cost of its implementation at traction substations, while maintaining high performance in terms of direct current power quality and electromagnetic compatibility with adjacent electrical installations.

Keywords: quality of electrical energy, traction substation, converter unit, voltage regulator.

Вступ. В умовах збільшення інтенсивності вантажних перевезень і за впровадження швидкісного пасажирського руху на ділянках тягової мережі постійного струму спостерігають значне зниження якості енергії живлення електричного рухомого складу. Ця ситуація є особливо проблематичною для ділянок швидкісного руху, де вимоги щодо якості електричної енергії [1] суттєво підвищені. Можливості застосування традиційних заходів з підсилення контактної мережі постійного струму вичерпані, тому в умовах подальшого зростання струмових навантажень зазначені заходи не забезпечують якісного та ефективного функціонування системи тягового електропостачання постійного струму [2].

Відомо також, що зі зростанням струму в мережі суттєво зростає шкідливий електромагнітний вплив системи тягового електропостачання постійного струму на суміжні електроустановки, у тому числі сучасні системи керування електричного рухомого складу та лінії залізничної автоматики, сигналізації і зв'язку [2, 3]. До сьогодні завдання придушення гармонік випрямленої напруги і струму мережі вирішували з використанням пасивних аперіодичних і резонансних LC фільтрів на виході перетворювального агрегату (ПА) тягової підстанції, що в умовах широкого використання мікропроцесорної техніки в системах керування та автоматики виявилось недостатньо ефективним. Застосування перетворювачів електричної енергії на основі керованих двоопераційних

напівпровідникових приладів створює умови для розроблення та впровадження нових енергоефективних систем тягового електропостачання постійного струму, які мають забезпечувати необхідні показники якості електричної енергії та електромагнітну сумісність із суміжними електроустановками [2, 3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У ряді робіт [3-5] запропоновано застосовувати в складі ПА тягових підстанцій реверсивні вольтододаткові перетворювачі на базі трифазних випрямлячів напруги з широтно-імпульсною модуляцією для підвищення якості електричної енергії постійного струму та поліпшення електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання з суміжними електроустановками. Крім виконання цих завдань, такий вольтододатковий перетворювач з застосуванням основної тиристорної випрямно-інверторної установки ПА може забезпечувати досить якісне повернення рекуперованої електричним рухомим складом енергії до зовнішньої трифазної мережі. Якщо ж на тяговій підстанції використовують накопичувачі такої енергії, а від ПА не потрібна реалізація функції повернення рекуперованої енергії до зовнішньої мережі, то можна застосовувати простіший за будовою активний фільтр-стабілізатор (АФС) на базі однофазної мостової схеми перетворювача з ємнісним накопичувачем енергії [2, 6-8].

На сьогодні відсутні приклади використання обох варіантів згаданих вище перетворювачів у складі ПА тягових підстанцій системи тягового електропостачання постійного струму, що в першу чергу пов'язано зі складністю їхньої конструкції та високою вартістю. Особливо це стосується реверсивного вольтододаткового перетворювача, силова частина якого має схему трифазного мостового випрямляча напруги, де застосовано шість потужних двоопераційних швидкодіючих ключів із

знакозмінною напругою на базі *IGBT*. Що стосується АФС з ємнісним накопичувачем енергії, то він може бути реалізований на базі досить простої структури широтно-імпульсного перетворювача понижувального типу. Така реалізація силової частини забезпечить значне спрощення конструкції АФС і знизить вартість впровадження їх на тягових підстанціях системи тягового електропостачання постійного струму.

Визначення мети та задач дослідження. Метою роботи є дослідження ПА з АФС на базі широтно-імпульсного перетворювача понижувального типу. Основні завдання дослідження:

- синтезувати схему та алгоритм керування АФС на базі структури широтно-імпульсного перетворювача понижувального типу;
- перевірити працездатність і показники якості електричної енергії постійного струму ПА з АФС на базі структури широтно-імпульсного перетворювача понижувального типу.

Основна частина. Запропонована схема ПА тягової підстанції з дванадцятипульсною основною випрямною установкою ОВУ та послідовно приєднаним широтно-імпульсним перетворювачем із ємнісним накопичувачем енергії C_n , що є спрощеною версією АФС, наведена на рис. 1.

Як видно зі схеми (рис. 1), до складу широтно-імпульсного перетворювача АФС входять керований двоопераційний ключ *VT* на базі *IGBT* і некерований діодний ключ *VD*. Для формування вихідної напруги АФС використовує енергію постійного струму ємнісного накопичувача енергії C_n . Як і в попередньому варіанті силової структури АФС [6, 7], для забезпечення необхідної напруги постійного струму на ємнісному накопичувачі енергії U_{Cn} передбачений трифазний мостовий випрямляч заряду ВЗ. На виході ПА застосований полегшений порівняно зі стандартним для ПА з дванадцятипульсною випрямною установкою пасивний аперіодичний *LC* фільтр.

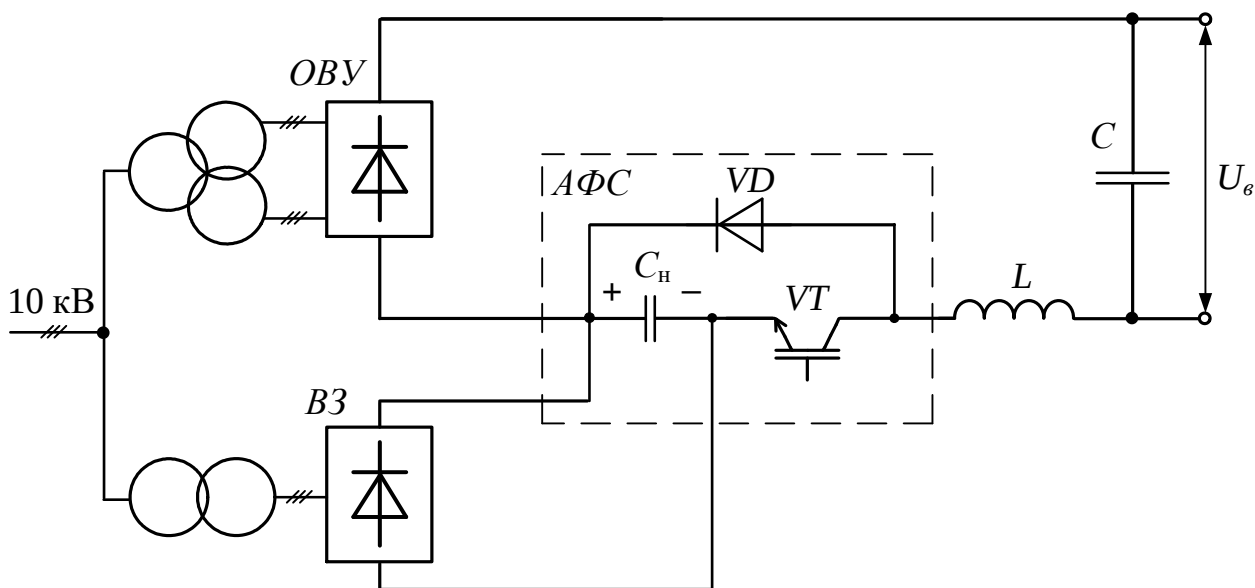


Рис. 1. Схема перетворювального агрегату з АФС на базі широтно-імпульсного перетворювача

Система керування АФС та силові елементи схеми утворюють замкнену систему автоматичного регулювання, яка забезпечує активну фільтрацію і стабілізацію вихідної напруги підстанції. Подібно до описаної в роботах [2, 6] системи

для компенсації пульсацій (активної фільтрації) випрямленої ОВУ напруги u_d і підтримання стабільного значення вихідної напруги підстанції U_e має формуватися напруга u_{a2} (рис. 2).

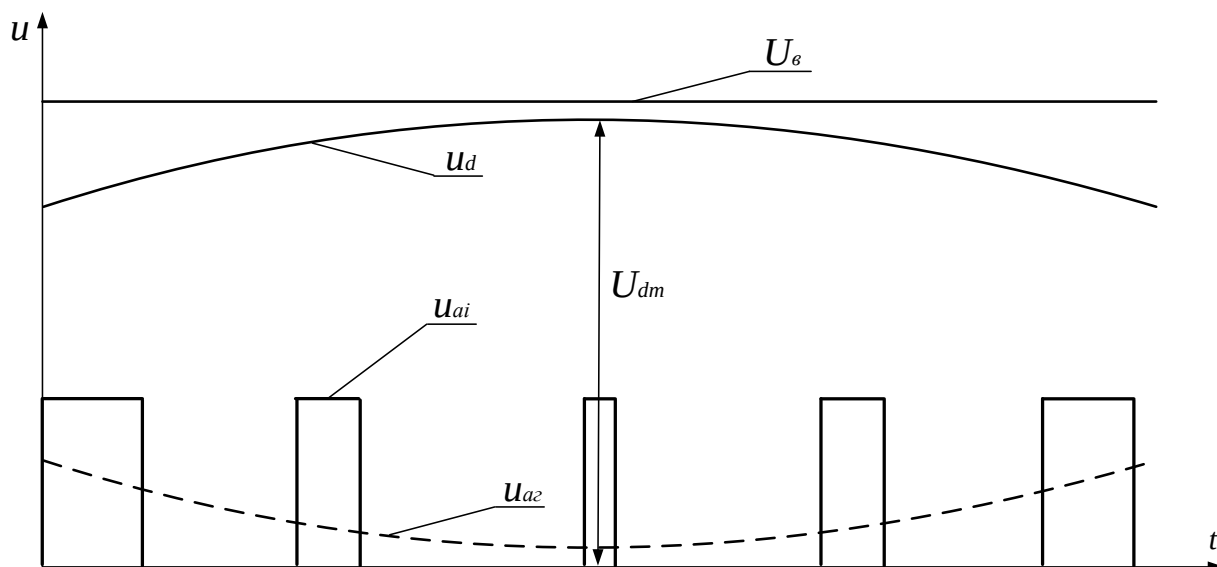


Рис. 2. Діаграми напруги перетворювального агрегату з АФС на базі широтно-імпульсного перетворювача

Для того щоб отримати таку напругу компенсації відповідної форми та амплітуди на вихідному конденсаторі LC фільтра, АФС генерує імпульсну напругу u_{ai} з підвищеною частотою широтно-імпульсної модуляції. При цьому імпульси напруги u_{ai} мають лише позитивну полярність, бо з використанням структури широтно-імпульсного перетворювача понижувального типу неможливо формувати імпульси негативної полярності. Саме в цьому є принципова відмінність роботи широтно-імпульсного перетворювача АФС порівняно з варіантом, виконаним за схемою однофазного мосту [6, 7]. Зрозуміло, що через неможливість формування імпульсів негативної полярності при застосуванні АФС на базі широтно-імпульсного перетворювача для формування напруги компенсації u_{ag} потрібно, щоб значення вихідної напруги U_{θ} (рис. 2) було не менше

амплітудного значення випрямленої напруги U_{dm} .

Щодо системи керування АФС на базі широтно-імпульсного перетворювача, то вона може бути досить просто реалізована (рис. 3) як замкнена система автоматичного регулювання вихідної напруги ПА. Датчик вихідної напруги ДВН, що забезпечує гальванічну розв'язку системи керування та силової схеми, передає сигнал про постійну та змінну складові вихідної напруги перетворювального агрегату. Від датчика сигнал u_v поданий як сигнал негативного зворотного зв'язку за напругою для порівняння з сигналом завдання u_z на вході регулятора напруги РН, який формує сигнал керування u_k . Імпульси керування $u_{кт}$ транзисторним ключем широтно-імпульсного перетворювача ШІП АФС виробляє широтно-імпульсний модулятор ШІМ.

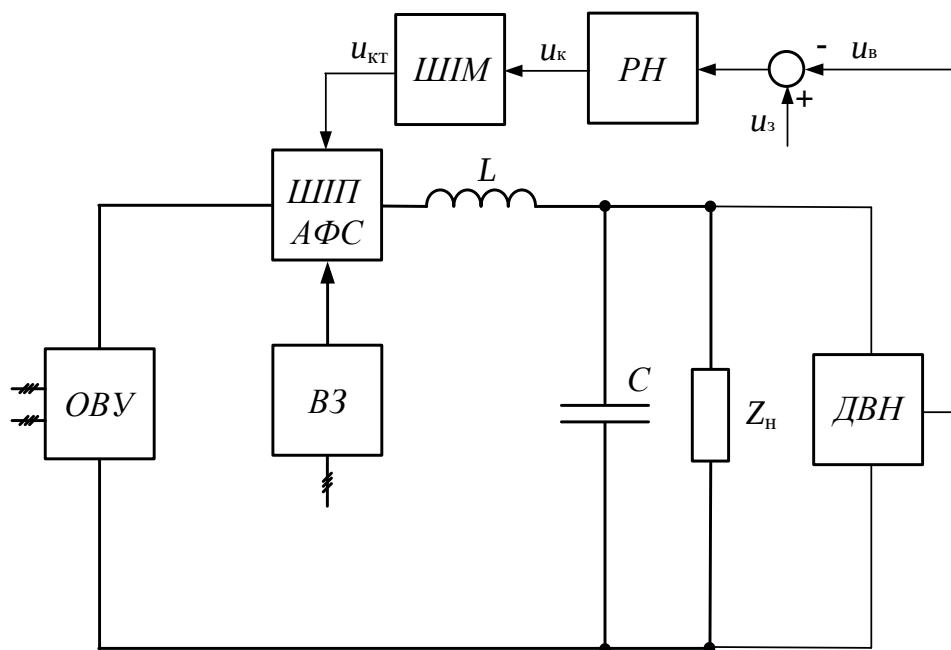


Рис. 3. Замкнена система автоматичного регулювання вихідної напруги перетворювального агрегату з АФС на базі широтно-імпульсного перетворювача

У роботі [9] у результаті аналізу динамічних характеристик була розроблена імпульсна модель мостової схеми

перетворювача напруги АФС з двобічною широтно-імпульсною модуляцією, яка може бути використана для аналізу динамічних

властивостей широтно-імпульсного перетворювача АФС. Такий висновок ґрунтований на значній схожості принципу дії в обох варіантах реалізації АФС і застосуванні одного типу широтно-імпульсної модуляції. Відповідно співпадають узагальнена

еквівалентна схема попереднього мостового варіанта перетворювача (рис. 4), за якою аналізували динамічні характеристики в роботі [9], та узагальнена еквівалентна схема АФС на базі широтно-імпульсного перетворювача (рис. 4).

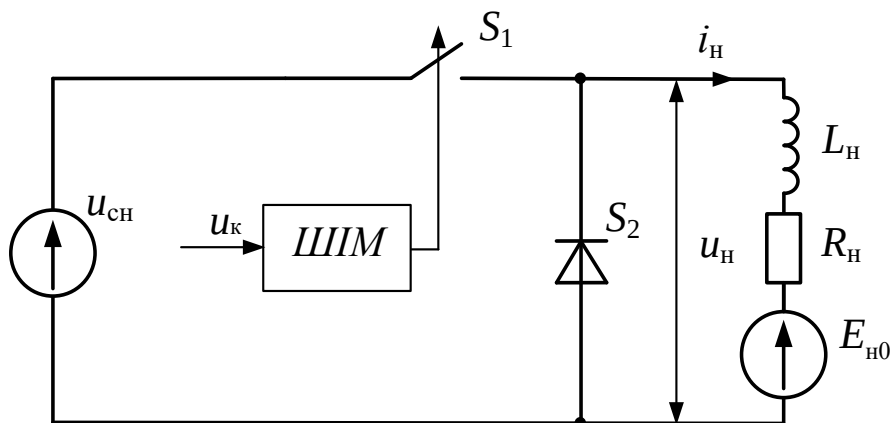


Рис. 4. Узагальнена еквівалентна схема перетворювача АФС з широтно-імпульсною модуляцією

Із використанням імпульсної моделі перетворювача в роботі [10] було синтезовано передавальну функцію регулятора напруги перетворювача АФС, яка може бути записана рівнянням

$$G(p) = \frac{T_2^2 p^2 + 2\mu T_2 p + 1}{T_1 p}, \quad (1)$$

де T_1 , T_2 – постійні часу передавальної функції регулятора;

μ – коефіцієнт демпфування.

Щоб забезпечити реалізацію в замкненій системі автоматичного регулювання ПА тягової підстанції процесів кінцевої тривалості [10], параметри передавальної функції регулятора напруги визначають за формулами

$$T_1 = K_0 K_1 T F_1; \quad (2)$$

$$T_2 = T_\phi \sqrt{1 + K_0 K_1 F_2 \frac{T}{T_1}}; \quad (3)$$

$$\mu = a(T_2^2 - T_\phi^2) T_\phi \frac{\frac{F_1}{F_2} - 1 + e^{\alpha \gamma T} \left(\frac{T_2^2}{T_\phi^2} + 1 \right) \left[\cos \gamma \beta T + \frac{\xi}{a} \cdot \frac{T_2^2 + T_\phi^2}{T_2^2 - T_\phi^2} \sin \gamma \beta T \right]}{2 T_2 (T_2^2 + T_\phi^2) \cdot \sin \gamma \beta T} \left(1 + K_0 K_1 F_2 \frac{T}{T_1} \right), \quad (4)$$

де K_0 – статичний коефіцієнт передачі;

K_1 – коефіцієнт передачі ланцюга зворотного зв'язку;

T – тривалість періоду широтно-імпульсної модуляції;

F_1, F_2 – фактори пульсацій;

γ – відносна тривалість вихідного імпульсу широтно-імпульсної модуляції;

$$\alpha = \frac{\xi}{T_\phi}; \quad \beta = \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T_\phi}; \quad a = \sqrt{1-\xi^2};$$

$T_\phi = \sqrt{LC}$ – постійна часу пасивного фільтра;

$$\xi = \frac{1}{2Z_H(p)} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{– коефіцієнт}$$

демпфування пасивного фільтра.

З урахуванням наведених вище аргументів можна стверджувати, що рівняння передавальної функції (1) дає нам змогу оптимізувати вибір параметрів регулятора напруги, який забезпечить реалізацію процесів кінцевої тривалості в замкненій системі автоматичного регулювання ПА тягової підстанції з АФС на базі широтно-імпульсного перетворювача.

Для перевірки працездатності АФС на базі широтно-імпульсного перетворювача понижувального типу у складі ПА розроблено *MatLab* модель, яка наведена на рис. 5.

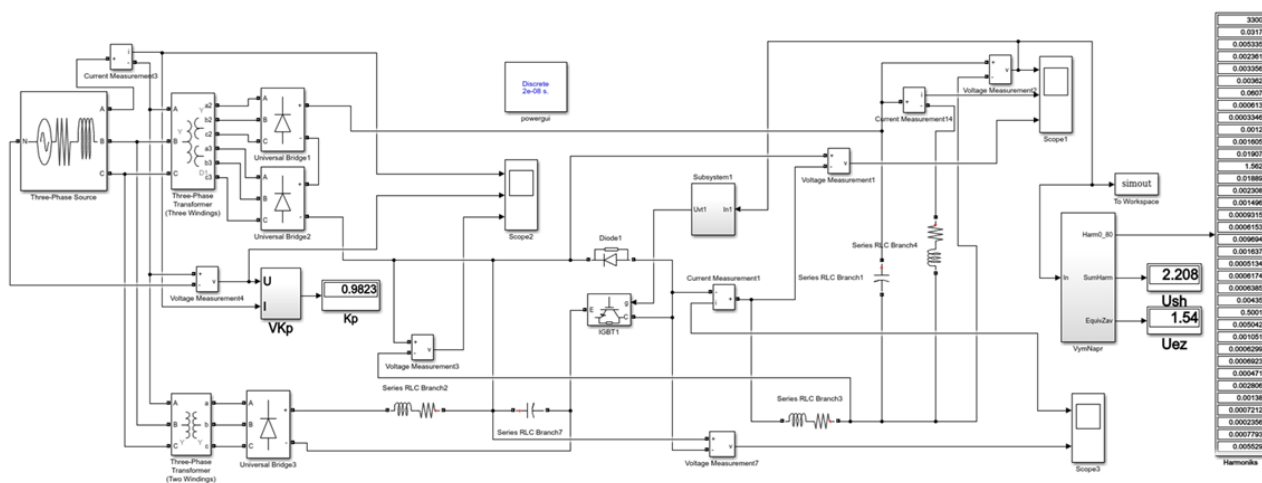


Рис. 5. Модель ПА з АФС на базі широтно-імпульсного перетворювача

У складі моделі ПА з АФС (рис. 5) застосовано елементи, що моделюють функції ОБУ *Universal Bridge 1*, *Universal Bridge 2* і *B3 Universal Bridge 3* ємнісного накопичувача енергії *Series RLC Branche 7*. Блок *Subsystem 1* виробляє сигнал керування $u_{кт}$, за яким широтно-імпульсний перетворювач АФС, зібраний на транзисторному *IGBT 1* і діодному *VD 1* ключах, формує напругу компенсації для стабілізації середнього значення і

подавлення змінної складової вихідної напруги на конденсаторі фільтра *Series RLC Branche 1*. Блок *VKp* визначає коефіцієнт потужності моделі ПА для роботи від трифазного джерела енергії змінного струму *Three-Phase Source* напругою 10 кВ.

Для аналізу основних показників якості електричної енергії постійного струму блок *VymNap* виконує швидке перетворення Фур'є (*FFT* аналіз) вихідної напруги моделі ПА. Далі постійна складова

вихідної напруги і діюче значення гармонік частотами, кратними промисловій частоті 50 Гц, відображує блок *Harmoniks*, а також визначає результуюче середньоквадратичне значення цих гармонік (від першої до вісімдесятої) вихідної напруги U_{sh} і значення еквівалентної заважальної напруги U_{ez} . Як бачимо з рис. 5, постійна складова вихідної напруги складає 3300 В, що є заданим номінальним значенням. Еквівалентна заважальна напруга 1,54 В, що

враховує можливість електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання постійного струму із суміжними електроустановками, суттєво нижче допустимого значення, яке дорівнює 4 В [2].

Ці результати підтверджують отримані під час дослідження осцилограми вихідної напруги (рис. 6, а) і струму (рис. 6, б) моделі ПА з АФС на базі широтно-імпульсного перетворювача.

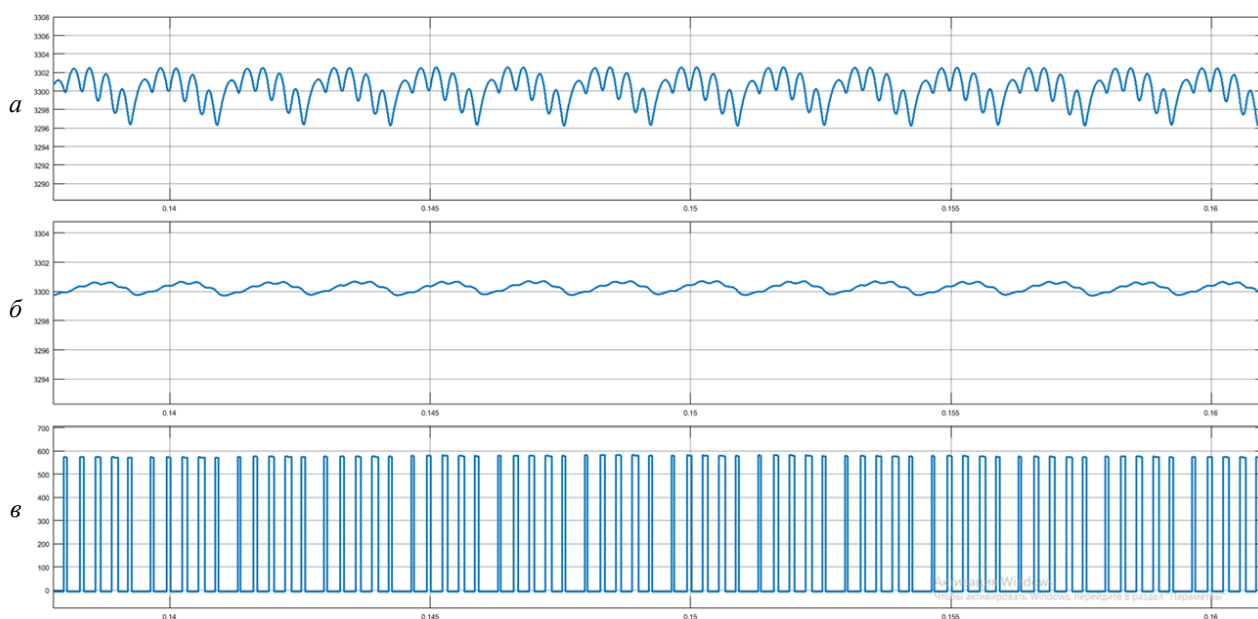


Рис. 6. Осцилограми вихідної напруги (а), струму (б) ПА, вихідної напруги АФС на базі широтно-імпульсного перетворювача (в)

Висновки. Синтезовано схему та алгоритм керування АФС на базі структури широтно-імпульсного перетворювача понижувального типу, яка має зменшену кількість швидкодіючих напівпровідникових ключів, що зменшує втрати енергії та вартість. Перевірено працездатність АФС на базі структури

широтно-імпульсного перетворювача понижувального типу в складі ПА тягової підстанції, яка підтвердила досить високі показники якості електричної енергії та забезпечення електромагнітної сумісності системи тягового електропостачання постійного струму із суміжними електроустановками.

Список використаних джерел

1. Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України. № ЦЕ-0009. Київ: ТОВ «Швидкий рух», 2005. 80 с.

2. Семененко Ю. О. Стабілізуючі силові активні фільтри для підвищення ефективності тягового електропостачання постійного струму: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.09. Харків, 2017. 207 с.
3. Панасенко М. В., Гончаров Ю. П., Сиченко В. Г. Проблеми електромагнітної сумісності підсистем електричної тяги постійного струму і використання засобів силової електроніки для їх вирішення. *Електротехніка та електроенергетика*. 2009. № 2. С. 22-28.
4. Обратимый преобразователь вольтодобавочного типа для тяговых подстанций электрифицированных железных дорог / Н. В. Панасенко, В. В. Божко, Ю. П. Гончаров и др. *Залізничний транспорт України*. 2007. № 4. С.76–80.
5. Гончаров Ю. П., Панасенко М. В., Божко В. В. Тяговий випрямляч з реверсивним вольтододатком на двоопераційних напівпровідникових приладах. Київ: Технічна електродинаміка. Інститут електродинаміки НАН України, 2008. Ч. 2. С. 16-21.
6. Семененко Ю. А. Стабилизация и активная фильтрация выпрямленного напряжения в замкнутой структуре. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2016. Вип. 166. С. 131-140.
7. Семененко О. І., Семененко Ю. О. Активний фільтр-стабілізатор для випрямної установки тягової підстанції. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. Харків: УкрДУЗТ, 2016. № 4(119). С. 29-33.
8. Застосування активних фільтрів-стабілізаторів у розподіленій системі електропостачання / О. І. Семененко, О. Д. Супрун, Ю. О. Семененко, М. М. Одегов. *Електрифікація транспорту*. 2018. № 15. С. 61-67.
9. Shcherbak Ya., Semenenko Yu., Semenenko O. Analysis of dynamic characteristics of the active filter-stabilizer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 2/8(86). P. 10-15.
10. Shcherbak Y., Semenenko Y., Semenenko O., Karpenko N., Suprun O., Plakhtii O., Nerubatskyi V. Synthesis of the transfer function of the voltage controller in an active filter-stabilizer converter. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. № 2 (2 (110)). P. 71-77.

Семененко Олександр Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8885-6783>. Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: semenoi@i.ua.

Семененко Юрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9422-3528>. E-mail: semenenko_jo@kart.edu.ua.

Семененко Ольга Діонісівна, асистент кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут».

ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0001-8425-562X>. E-mail: o.semenenko@khai.edu.

Semenenko Oleksandr, PhD (Tech), Associate Professor, department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8885-6783>. Tel.: (057) 730-10-74. E-mail: semenoi@i.ua.

Semenenko Yuri, PhD (Tech), Associate Professor, department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9422-3528>. E-mail: semenenko_jo@kart.edu.ua.

Semenenko Olha, Assistant of the Department of Theoretical Mechanics, Machine Science and Robotic Systems, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute». ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0001-8425-562X>. E-mail: o.semenenko@khai.edu.

Статтю прийнято 30.06.2025 р.