

УДК 621.314.6

## ЗНИЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВТРАТ В АКТИВНОМУ ОДНОФАЗНОМУ ЧОТИРИКВАДРАНТНОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З ПОКРАЩЕНИМ АЛГОРИТМОМ ГІСТЕРЕЗИСНОЇ МОДУЛЯЦІЇ

О.А. Плахтій<sup>\*</sup>, канд. техн. наук, В.П. Нерубацький<sup>\*\*</sup>, канд. техн. наук, Д.Л. Сушко<sup>\*\*\*</sup>, канд. техн. наук, В.Е. Кавун<sup>\*\*\*\*</sup>, асп.

Український державний університет залізничного транспорту,  
пл. Фейербаха, 7, м. Харків, 61000, Україна

e-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com; nvp9@i.ua ; sushko@kart.edu.ua ; vitaliykavun2014@gmail.com

*Існуючі діоди та тиристорні випрямлячі, які застосовуються в тягових приводах електрорухомого складу змінного струму, є морально застарілими та вимагають модернізації. На сьогодні перспективним є застосування активних чотириквadrантних випрямлячів напруги, перевагою яких є можливість реалізації коефіцієнта потужності, близького до одиниці, можливість формування вхідного струму, наближеного до синусоїди, а також реалізація режиму рекуперації енергії до живильної мережі. Досить широкого поширення набули гістерезисні системи керування (СК) цих перетворювачів. Проте, незважаючи на розвиток гістерезисної модуляції в активних випрямлячах є необхідність реалізації змінної і досить високої частоти комутації в силових ключах: від одиниць до десятків кілогерц. У статті запропонована покращена гістерезисна СК, яка завдяки удосконаленому алгоритму комутації силових ключів дає змогу в порівнянні з відомими гістерезисними СК знизити динамічні втрати до 33%. Отримані теоретичні положення співпадають з результатами імітаційного моделювання, виконаного в середовищі Matlab. Бібл. 16, рис. 6, табл. 3.*

**Ключові слова:** активний чотириквadrантний перетворювач, 4QS-перетворювач, гістерезисна модуляція, динамічні втрати, якість електроенергії.

**Вступ.** Більшість електрорухомого складу (ЕРС) України є морально та технічно застарілою та потребує модернізації. Зокрема, діодні та тиристорні чотиризонні випрямлячі, які застосовуються в ЕРС змінного струму, обумовлюють значну емісію вищих гармонік струму та реалізують досить низький коефіцієнт потужності, який лежить у межах від 0,65 до 0,85, що значно знижує енергоефективність як самого ЕРС, так і усієї системи тягового електропостачання [1, 2, 3]. У свою чергу наявність у тяговій електричній мережі значної реактивної складової потужності призводить до необхідності використання досить дорогих компенсаторів реактивної потужності, виконаних за пасивною або активною топологією [4]. Перспективним є застосування в електрорухомому складі активних чотириквadrантних випрямлячів з корекцією коефіцієнта потужності відомих у зарубіжній літературі як 4QS-перетворювачі [5, 6]. На відміну від традиційних тиристорних випрямлячів 4QS-перетворювачі мають ряд суттєвих переваг: вони забезпечують форму спожитого струму, близьку до синусоїди, реалізують коефіцієнт потужності, близький до одиниці, забезпечують низький рівень емісії вищих гармонік спожитого струму в живлячу мережу (коефіцієнт гармонічних спотворень може бути забезпечений нижче за 5 %), реалізують двостороннє передавання електричної енергії, а також забезпечують регулювання та стабілізацію напруги в ланці постійного струму [7]. Силова схема тягового електроприводу електрорухомого складу змінного струму з 4QS-перетворювачем, який живить автономний інвертор напруги (АІН) та тяговий асинхронний двигун (АД), показана на рис. 1.

На схемі, зображеній на рис. 1, активний чотириквadrантний випрямляч складається з дроселя  $L1$ , який виконує функцію буферного реактора для підвищення вихідної напруги, IGBT транзисторів  $VT1-VT4$ , ємнісного фільтра  $C1$ , призначеного для зменшення амплітуди пульсацій вихідної напруги та режекторного фільтра  $C2-L2$ , який застосовується для подавлення у вихідній напрузі гармоніки 100 Гц.

Найбільшого поширення в 4QS-перетворювачах набули системи керування, побудовані на основі широтно-імпульсної та гістерезисної модуляції. Кожна з цих систем має свої переваги та недоліки. Перевагою систем керування, побудованих на базі ШІМ, є можливість

задання постійної частоти модуляції, проте є і недоліки, а саме зниження діапазону регулювання вихідної напруги та погіршені показники якості електричної енергії [8–11]. Перевагою гістерезисних систем керування є їх

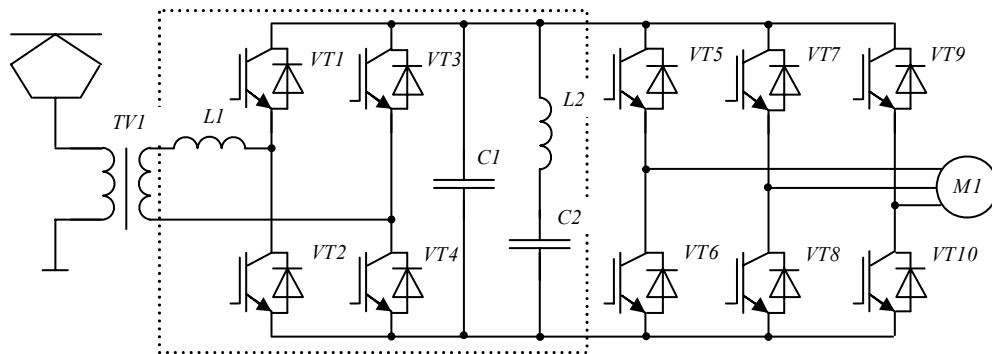


Рис. 1

відносна простота та можливість реалізації досить високих показників якості електричної енергії. Недоліком існуючих гістерезисних СК є наявність досить високої і у той же час змінної частоти комутації силових ключів, що зумовлює високі динамічні втрати в перетворювачі [12]. У цьому випадку частота комутації 4QS-перетворювача з гістерезисною системою керування залежить від багатьох факторів: значення вхідної індуктивності перетворювача, струму навантаження та величини уставки гістерезису [13, 14].

**Постановка задачі.** Задачею дослідження є розробка алгоритму комутації силових ключів 4QS – перетворювача, який реалізує формування вхідного струму, наближеного до синусоїди, зі зниженим числом перемикачів силових ключів і відповідно зі зниженими динамічними втратами та покращеним ККД. Підтвердити достовірність зниження динамічних втрат та реалізації необхідно шляхом імітаційного моделювання в середовищі Matlab.

**Базова гістерезисна система керування.** Структурна схема базової гістерезисної системи керування показана на рис. 2, на якій прийнято такі позначення:  $u_{ex}$  – миттєве значення вхідної напруги;  $U_{вих}$  – середньоквадратичне значення вихідної напруги;  $i_{ex}$  – миттєве значення вхідного струму;  $i_{ex}^*$  – сигнал задання миттєвого значення вхідного струму;  $U_{вих\ завд}$  – сигнал задання вихідної напруги;  $\xi$  – регульовальний коефіцієнт системи керування,  $I_{вих}$  – середньоквадратичне значення вихідного струму;  $S_{VT1}, S_{VT2}, S_{VT3}, S_{VT4}$  – сигнали керування відповідних транзисторів (згідно з рис. 1).

Принцип формування синусоїдального вхідного струму 4QS –перетворювача з базовою (відомою) гістерезисною СК наведено на рис. 3 та полягає в порівнянні сигналу задання вхідного струму  $i_{ex}^*$ , отриманого як миттєве значення масштабованої за допомогою регульовального коефіцієнта  $\xi$  вхідної напруги  $u_{ex}$ , з миттєвим значенням вхідного струму  $i_{ex}$  та отримання сигналу похибки  $\Delta i$ . Далі в блоці гістерезисного модулятора реалізується порівняння сигналу похибки  $\Delta i$  з заданою уставкою гістерезису  $h$ . За умови  $\Delta i > h$ , тобто коли миттєве значення струму перевищує його сигнал задання на величину  $h$ , тоді система керування подає сигнали ввімкнення на пару силових транзисторів VT1 і VT4, що зумовлює комутацію вхідного струму зі спадом (зниженням) його миттєвого значення. І далі, за умови  $\Delta i < -h$ , тобто значення миттєвого значення вхідного струму відносно його сигналу задання на величину  $h$ , система керування подає сигнали ввімкнення на пару силових транзисторів VT2 і VT3, що зумовлює зростання миттєвого значення  $i_{ex}$ . Таким чином, досягається створення синусоїдального струмового коридору.

У разі ввімкнення пари транзисторів VT1 і VT4 до вхідного дроселя з боку активного перетворювача прикладається напруга ланки постійного струму  $+U_{вих}$ , яка є вищою за амплітудне значення вхідної напруги, що спричиняє спадання миттєвого значення вхідного струму. І навпаки, ввімкнення пари транзисторів VT2 і VT3 спричиняє зростання миттєвого значення вхідного струму. Таким чином, у разі кожної комутації вхідного струму перемикаються всі чотири силові ключі, що за умови досить високої частоти

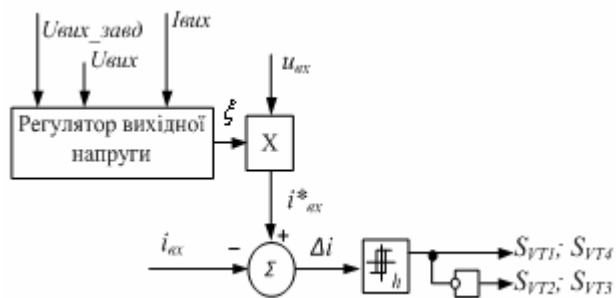


Рис. 2

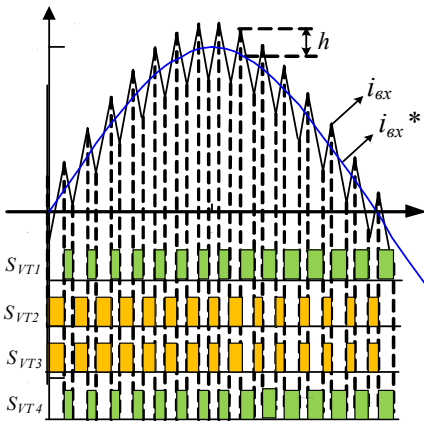


Рис. 3

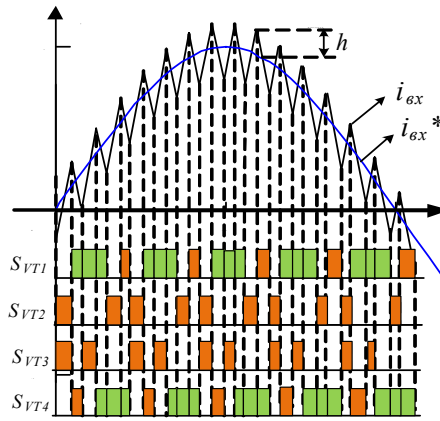


Рис. 4

комутації зумовлює досить значні динамічні втрати в перетворювачі.

**Покращена гістерезисна система керування.** Синтезовано покращений алгоритм гістерезисної модуляції в активному чотириквadrантному перетворювачі, який дає змогу знизити число перемикань сило-

вих ключів і тим самим знизити динамічні втрати в перетворювачі до 33 % (відносно базового алгоритму). Запропоновано в послідовність комутацій силових ключів додати комутаційні стани одночасного вмикання пари транзисторів VT1 і VT3 та пари VT2 і VT4, які за позитивної полярності вхідної напруги спричиняють зростання миттєвого значення вхідного струму, а у разі негативної полярності викликають його спадання. Це дає змогу протягом позитивної напівхвилі вхідної напруги здійснювати перемикання з комутаційного положення VT1-VT4 у стан VT1-VT3. У цьому разі миттєве значення вхідного струму змінюється зі спадаючого стану на зростаючий, проте на відміну від базового алгоритму комутації, у цьому випадку перемикаються лише два силові ключі. У разі негативної полярності  $U_{ex}$  також можна використовувати короткозамкнені положення: перемикання з комутаційного положення VT2-VT3 в VT1-VT3.

Запропонований покращений алгоритм комутації силових ключів ітераційно складається з шести комутаційних положень, які наведено в табл. 1 та графічно представлено на рис. 4. У табл. 1 сірим кольором позначено етапи комутацій вхідного струму, за яких не відбувається комутація відповідних силових ключів.

Таблиця 1

Силовий ключ	Комутаційні положення силових ключів у разі позитивної полярності вхідної напруги						Комутаційні положення силових ключів у разі негативної полярності вхідної напруги					
	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0
VT1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0
VT2	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1
VT3	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1
VT4	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0
$i_{ex}(t)$	Зростає	Спадає	Зростає	Спадає	Зростає	Спадає	Спадає	Зростає	Спадає	Зростає	Спадає	Зростає
Крок	Крок 1	Крок 2	Крок 3	Крок 4	Крок 5	Крок 6	Крок 1	Крок 2	Крок 3	Крок 4	Крок 5	Крок 6

Варто зазначити, що перевагою запропонованого алгоритму є те, що всі чотири ключі у разі запропонованого алгоритму модуляції мають однакові динамічні втрати.

Як видно з рис. 4 та табл. 1, запропонований алгоритм комутації дає змогу знизити кількість перемикань ключів, що зменшує загальні динамічні втрати в ключах 4QS-перетворювача з гістерезисною системою керування до 33 %, що збільшує його ККД.

**Імітаційне моделювання.** Для підтвердження запропонованих теоретичних засад, зменшення динамічних втрат та порівняння реалізованих показників якості електричної енергії, в активному чотириквadrантному перетворювачі з базовою та покращеною гістерезисною модуляцією, в середовищі Matlab була розроблена імітаційна модель електромеханічної системи 4QS-АПН-АД, яку показано на рис. 5. В імітаційній моделі реалізовано базову та покращену гістерезисні системи керування активним чотириквadrантним перетворювачем. Основні параметри імітаційної моделі наведені в табл. 2.

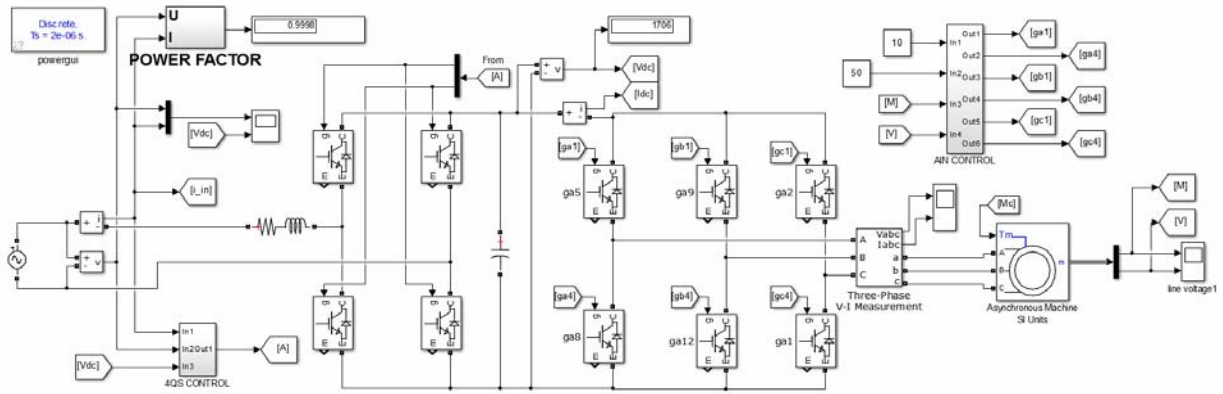


Рис. 5

Для оцінки динамічних втрат у силових транзисторах активного чотириквadrантного перетворювача в моделі вставлено лічильник сигналів вмикання та вимикання силових ключів [15, 16].

Варто зазначити, що використання запропонованого алгоритму комутації силових ключів для реалізації гістерезисної модуляції призводить до зменшення амплітуд вищих гармонік вхідного струму та одночасного розширення його спектра. Результати імітаційного моделювання системи тягового електропривода наведені на рис. 6: *a* – Фур'є-аналіз вхідного струму активного випрямляча з базовою гістерезисною СК; *б* – Фур'є-аналіз вхідного струму активного випрямляча з покращеною гістерезисною СК.

Таблиця 2

Параметр	Значення
Дискретизації часу розрахунку імітаційної моделі, мкс	1
Допустима похибка моделювання, %	0,1
Амплітудне значення вхідної напруги активного чотириквadrантного перетворювача, В	600
Значення регульовального коефіцієнта $\zeta$	2,5
Вхідна індуктивність, мГн	0,8
Активний опір вхідної індуктивності, мОм	15
Ємність фільтра в ланці постійного струму, мФ	3
Номинальна напруга в ланці постійного струму, В	1500
Середньоквадратичне значення струму навантаження активного перетворювача, А	590
Параметри тягового двигуна за типом	СТА1200

Отримані результати імітаційного моделювання підтвердили зниження кількості пе-

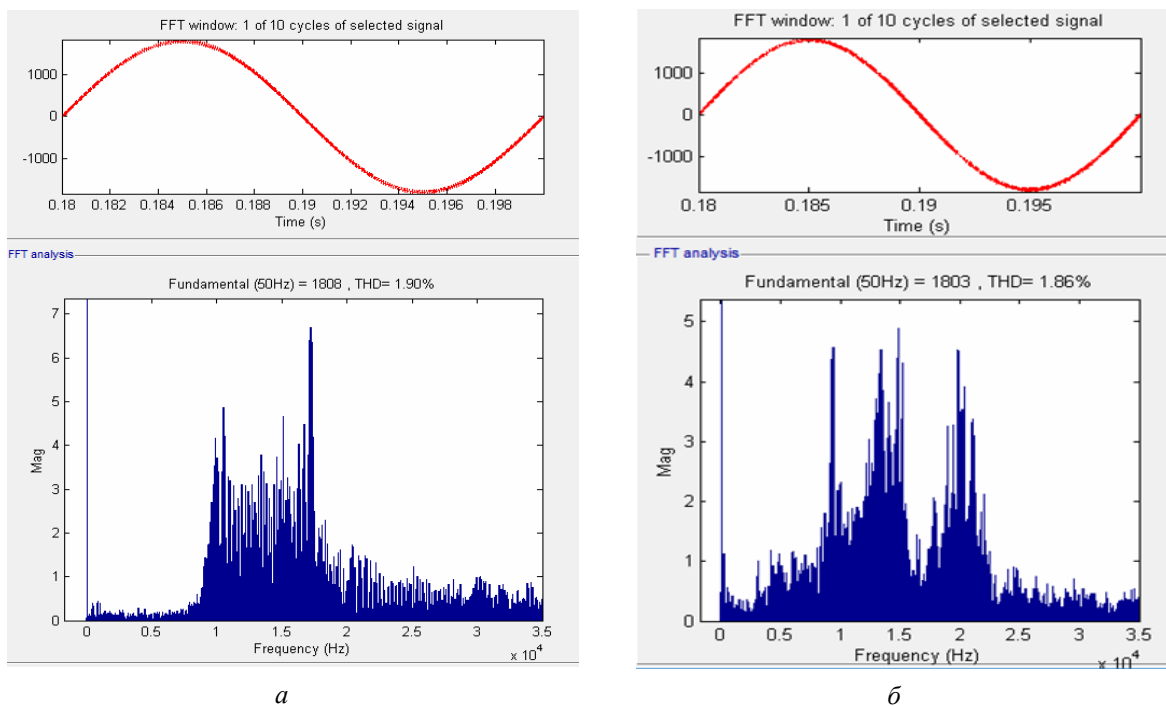


Рис. 6

ремикань силових ключів, а відповідно і зниження динамічних втрат. У зв'язку з тим, що частота комутації силових ключів є змінною, оцінка її була виконана за значення усередненим на періоді живлячої напруги. У разі класичної гістерезисної СК середня на періоді живлячої напруги частота комутації силових ключів склала 14,2 кГц, а для покращеної гістерезисної СК – 10,22 кГц. Більш детально результати імітаційного моделювання наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Параметр	Базова гістерезисна СК	Запропонована гістерезисна СК
Коефіцієнт гармонічних спотворень вхідного струму, %	1,90	1,86
Середня на періоді живлячої напруги частота комутації силових ключів, кГц	14,21	10,22
Коефіцієнт потужності, %	99,96	99,98

**Висновки.** Запропонована покращена гістерезисна система керування активного чотириквadrантного перетворювача за рахунок використання короткозамкнених станів силових ключів дає змогу знизити загальну кількість комутацій силових ключів, а відповідно і динамічні втрати в активному перетворювачі (згідно з алгоритмом, запропонованим у табл. 1), що дає змогу збільшити ККД вхідного перетворювача ЕРС. Результати імітаційного моделювання підтвердили ефективність запропонованого алгоритму модуляції, а саме зниження числа перемикачів силових ключів на 28,07 %. Крім того, під час реалізації запропонованого алгоритму комутації спостерігається невелике покращення гармонічного складу вхідного струму, а саме зниження амплітуд вищих гармонік вхідного струму та зниження результуючого коефіцієнта гармонічних спотворень.

1. Евдокимов С.А., Мятаж С.В., Зотова Е.В. Исследование зонного выпрямителя. *Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета*. Новосибирск, 2011. № 1. С. 105–112.
2. Евстафьев А.М., Сычугов А.Н. Повышение энергетической эффективности электровозов переменного тока. *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2013. № 1. С. 22–30.
3. Широченко Ю.Н. Входные преобразователи современного электроподвижного состава переменного тока. *Электроника и электрооборудование транспорта*. Московская обл., п. Томилино. 2010. № 1. С. 15–18.
4. Кулинич Ю.М., Савоськин А.Н. Повышение эффективности работы активного компенсатора реактивной мощности. *Электроника и электрооборудование транспорта*, 2010. № 3. С. 29–33.
5. Stihl O., Ooi B. T. A single phase controlled-current PWM rectifier. *IEEE Trans. Power Electr.* Vol. 3, No.4, Oct 1988. P. 453–459. DOI: <https://doi.org/10.1109/63.17967>
6. L'ubomir Grman, Martin Hrasko, Jozef Kuchta, Jozef Buday. Single phase pwm rectifier in traction application. *Journal of electrical engineering*. 2011. Vol. 62, no. 4. P. 206–212. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10187-011-0033-z>
7. Щербак Я.В., Плахтий А.А., Цеховской М.В. Улучшение электромагнитной совместимости преобразователей частоты путем применения активных выпрямителей. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. Київ: Техніка, 2014. № 15 (91). С. 344–347.
8. Щербак Я.В., Плахтий А.А., Нерубацький В.П. Регулювальні характеристики активного чотириквadrантного перетворювача в режимах випрямлення і рекуперації. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 6. С. 26–31.
9. Щербак Я.В., Плахтий А.А., Нерубацький В.П. Анализ энергетических характеристик активного четырехквadrантного выпрямителя с различными типами широтно-импульсной модуляции. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. 2017. Вип. 27 (1249). С. 221–225.
10. Rodriguez J. R., Dixon J. W., Espinoza J. R., Pontt J., and Lezana P.. PWM regenerative rectifiers: State of the art. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2005. Vol. 52, no. 1. P. 5–22. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2004.841149>
11. Fen Li, Yunping Zou, Wei Chen, Jie Zhang. Comparison of Current Control Techniques for Single-phase Voltage source PWM Rectifiers. *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. April 2008. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/5.771073>
12. Arpit Bohra, Divya Sajeesh, Chintan Patel and Michael Saldanha. Modulation Techniques in Single Phase PWM Rectifier. *IJCA Proceedings on International Conference on Advances in Science and Technology, (IC-AST)*. 2015 (3): 5-7, 2016. P. 5–7.
13. Zheng Jun, Feng Xiaoyun, Xie Wangyu, Zhang Junling. The Transient Current Control for Single Phase PWM Rectifiers. *Power Electronics*. 2009. Vol. 43, No. 12. P. 2–4.
14. Жемеров Г.Г., Ковальчук О.И. Автономный выпрямитель – источник напряжения с гистерезисной системой управления. *Технічна електродинаміка: Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність»*. 2011. Ч. 2. С. 75–82.

15. Жемеров Г.Г., Колесник Ю.В. Частота модуляції сетевого тока в активном управляемом выпрямителе – источнике напряжения с гистерезисной системой. *Технічна електродинаміка*. Тематичний вип. 2008. Ч. 3, С. 79–84.
16. Замаруев В.В., Ивахно В.В. Определение динамических потерь в полупроводниковых ключах устройств силовой электроники в среде MATLAB/Simulink. *Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB*: материалы V Международной научной конференции. Харьков, 2011. С. 623–631. URL: <https://matlab.ru/upload/resources/EDU%20Conf/pp%20623-631%20Zamaruiev.pdf> (дата обращения 13.04.2018).

УДК 621.314.6

**А.А. Плахтий**, канд. техн. наук, **В.П. Нерубацкий**, канд. техн. наук, **Д.Л. Сушко**, канд. техн. наук, **В.Е. Кавун**, асп.  
Украинский государственный университет железнодорожного транспорта,  
пл. Фейербаха, 7, Харьков, 61000, Украина

### **СНИЖЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В АКТИВНОМ ОДНОФАЗНОМ ЧЕТЫРЕХКВАДРАНТНОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ С УЛУЧШЕННЫМ АЛГОРИТМОМ ГИСТЕРЕЗИСНОЙ МОДУЛЯЦИИ**

*В составе тяговых электроприводов все шире применяются активные четырехквadrантные преобразователи, преимуществом которых является возможность реализации коэффициента мощности, близкого к единице, формирования входного тока, близкого к синусоиде, а также реализации режима рекуперации энергии в питающую сеть. Достаточно широко распространены гистерезисные системы управления (СУ) активных четырехквadrантных преобразователей, недостатком которых является необходимость реализации достаточно высокой и переменной частоты коммутации силовых ключей: от единицы до десятков килогерц. В статье предложена улучшенная гистерезисная СУ, которая позволяет в сравнении с известными гистерезисными СУ снизить динамические потери в силовых ключах до 33 %. Предложенные теоретические положения подтверждены результатами имитационного моделирования, выполненного в среде Matlab. Библи. 16, рис. 6, табл. 3.*

**Ключевые слова:** активный четырехквadrантный преобразователь, гистерезисная модуляция, динамические потери, качество электроэнергии.

**O.A. Plakhtiy, V.P. Nerubatskiy, D.L. Sushko, V.E. Kavun**

Ukrainian State University of Railway Transport,  
Feuerbach Square 7, 61000, Kharkiv, 61000, Ukraine

### **REDUCTION OF DYNAMIC LOSSES IN THE ACTIVE ONE-PHASE FOUR-QUADRANT CONVERTER WITH THE IMPROVED ALGORITHM OF HYSTERESIS MODULATION**

*Diodes and thyristor rectifiers used in traction drives of electric traction (EMF) alternatives are obsolete and require modernization. At the same time, it is promising to use in traction drives the active four-quadrant voltages rectifier. The advantage of which is the ability to implement a unity power factor, the formation of an sinusoid input current, and also the implementation of the mode of energy recovery into the power grid. Hysteresis control systems have been widely used for active four-quadrant converters. However, the lack of hysteresis modulation in active rectifiers is the need to implement a variable and a fairly high switching frequency in power switches: from kHz to tens of kHz. . The paper proposes an improved hysteresis control system, which allows to reduce dynamic losses in power convertor up to 33%. Proposed theoretical positions are confirmed by the results of simulation performed in the Matlab. References 16, figures 6, table 3.*

**Key words:** active four-quadrant converter, hysteresis modulation, dynamic losses, power quality.

1. Evdokimov S. A., Myatezh S. V., Zotova E. V. Zone Rectifier Study. *Collection of proceedings of the Novosibirsk State Technical University*. Novosibirsk, 2011. № 1. P. 105–112. (Rus.).
2. Evstafiev A. M., Sychugov A. N. Increase of power efficiency of electric locomotives of an alternating current. *Proceedings of Peterburgh University of Railways*. 2013. № 1. P. 22–30 (Rus.).
3. Shirochenko Yu. N. Input converters of the modern electric rolling stock of alternating current, *Electronics and electrical equipment of transport*. Moskovskaya obl., p. Tomilino. 2010. № 1. P. 15–18. (Rus.).
4. Kulnich Yu. M., Savoskin A.N. Increase in the efficiency of the active reactive power compensator. *Electronics and electrical equipment of transport*. 2010. № 3. P. 29–33. (Rus.).
5. Stihl O., Ooi B. T. A single phase controlled-current PWM rectifier. *IEEE Trans. Power Electr.* Vol. 3, No.4, Oct 1988. P. 453–459. (Eng.). DOI: <https://doi.org/10.1109/63.17967>
6. L'ubomir Grman, Martin Hrasko, Jozef Kuchta, Jozef Buday. Single phase pwm rectifier in traction application. *Journal of electrical engineering*. 2011. Vol. 62, no. 4. P. 206–212. (Eng.). DOI: <https://doi.org/10.2478/v10187-011-0033-z>
7. Scherback Ya. V., Plakhtiy A. A., Tsekhovskoy M. V. Improvement of frequency converter electromagnetic compatibility with active rectifiers. Kyiv: *Electrical and computer systems*. Kyiv: Tekhnika. 2014. №.15 (91). P. 344–347. (Rus.).
8. Shcherbak Ya.V., Plakhtiy A.A., Nerubatsky V.P. Regulatory characteristics of the active four-quadrature converter in regimens and recuperation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. № 6. P. 26–31. (Rus.).
9. Shcherbak Y.V., Plakhtiy A.A., Nerubatsky V.P. Analysis of the energy characteristics of an active four-quadrant rectifier with different types of pulse-width modulation. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskyy politekhnichnyy instytut»*. Kharkiv. 2017. 27 (1249). P. 221–225. (Rus.).

10. Rodriguez J. R., Dixon J. W., Espinoza J. R., Pontt J., and Lezana P. PWM regenerative rectifiers: State of the art. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2005. Vol. 52, no. 1. P. 5–22. (Eng.). DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2004.841149>
11. Fen Li, Yunping Zou, Wei Chen, Jie Zhang. Comparison of Current Control Techniques for Single-phase Voltage source PWM Rectifiers. *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, April 2008. P. 1–4. (Eng.). DOI: <https://doi.org/10.1109/5.771073>
12. Arpit Bohra, Divya Sajeesh, Chintan Patel and Michael Saldanha. Modulation Techniques in Single Phase PWM Rectifier. *IJCA Proceedings on International Conference on Advances in Science and Technology (ICAST)*, 2015 (3):5-7, February 2016. P. 5–7. (Eng.).
13. Zheng Jun, Feng Xiaoyun, Xie Wangyu, Zhang Junling. The Transient Current Control for Single Phase PWM Rectifiers. *Power Electronics*. 2009. Vol. 43, No. 12. P. 2–4. (Eng.).
14. Gernerov G.G., Kovalchuk O.V. Active rectifier – voltage source with hysteresis control system. *Tekhnichna Elektrodynamika: Tematichnyy vipusk «Silova elektronika ta energoefektivnist'»*. 2011. CH. 2. P. 75–82. (Rus.).
15. Gernerov G.G., Kolesnic Y.V. Modulation frequency of input current in active rectifier-voltage source with hysteresis control system. *Tekhnichna elektrodynamika*. Kyiv. 2008. T. 3, Tematichnyy vip. P. 79–84. (Rus.).
16. Zamaruev V.V., Ivakhno V.V. Determination of dynamic losses in semiconductor switches of power electronics devices in the Matlab / Simulink environment. *Designing engineering and scientific applications in the MATLAB environment: materials of the V International Scientific Conference*. Kharkiv, 2011. P. 623–631. (Rus.). URL: <https://matlab.ru/upload/resources/EDU%20Conf/pp%20623-631%20Zamaruev.pdf> (Accessed 13.04.2018).

Надійшла 16.04.2018  
Received 16.04.2018

УДК 621.316.721

## ОСОБЛИВОСТІ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОННИМИ КЛЮЧАМИ В КВАЗІРЕЗОНАНСНИХ ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ

О.М. Городній\* , канд. техн. наук

Чернігівський національний технологічний університет,  
вул. Шевченка, 95, Чернігів, 14035, Україна  
e-mail: [aleksey.gorodny@gmail.com](mailto:aleksey.gorodny@gmail.com)

Проаналізовано особливості керування квазірезонансними імпульсними перетворювачами (КРІП), що перемикаються при нульовому струмі (КРІП-ПНС) та КРІП, що перемикаються при нульовій напрузі (КРІП-ПНН), описано шляхи зменшення динамічних втрат у разі перемикання електронних ключів. Також обґрунтовано причини зміни параметрів струмів та напруг у резонансних контурах цих перетворювачів, у результаті яких змінюються їх власна частота та наслідки цього явища. Розглянуто принципи автоматичного квазікерування електронними ключами цих перетворювачів, завдяки яким спрощується синтез систем керування та зменшуються динамічні втрати в електронних ключах. Бібл. 10, рис. 4, таблиця.

**Ключові слова:** квазірезонансний імпульсний перетворювач, резонансний струм, резонансна напруга, електронний ключ, комутаційні втрати.

**Вступ.** Сучасні перетворювачі електричної енергії за своїм складом мають послідовні або паралельні імпульсні перетворювачі (ІП) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) [1–3]. Для поліпшення масогабаритних показників таких перетворювачів необхідно збільшувати частоту їх роботи. Підвищення частоти роботи перетворювачів пов'язано зі збільшенням комутаційних втрат. Ця проблема частково вирішується за рахунок використання електронних ключів з більшою швидкістю та використання снаберних схем [2, 3]. Це дає змогу збільшити частоту роботи ІП з ШІМ до 300 кГц. Більш продуктивним способом підвищення частоти до одиниць та десятків мегагерц є використання КРІП з частотно-імпульсною модуляцією (ЧІМ) [1, 4–10]. У роботах [1, 4, 5, 7] наведено метод розрахунку комутаційних втрат в електронних ключах ІП з ШІМ та КРІП з ЧІМ. Зміну власної частоти резонансного контура необхідно враховувати у разі синтезу систем керування, оскільки це може призвести до збільшення комутаційних втрат та розширення спектрів струмів споживання перетворювачів.