

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. Бекетова

НЕРУБАЦЬКИЙ ВОЛОДИМИР ПАВЛОВИЧ



УДК 621.337.5

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО
РУХОМОГО СКЛАДУ В РЕЖИМАХ ТЯГИ І РЕКУПЕРАЦІЇ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор,
Щербак Яків Васильович,
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова МОН України,
завідувач кафедри електричного транспорту.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор,
Афанасов Андрій Михайлович,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна МОН України, декан факультету «Управління енергетичними процесами»;

кандидат технічних наук, доцент,
Кутовий Юрій Миколайович,
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут" МОН України, професор кафедри автоматизованих електромеханічних систем.

Захист відбудеться «27» грудня 2017 р. о 13³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.089.02 в Харківському національному університеті міського господарства імені О. М. Бекетова за адресою: 61002, м. Харків, вул. Маршала Бажанова, 17.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова за адресою: 61002, м. Харків, вул. Маршала Бажанова, 17.

Автореферат розісланий «27» листопада 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В. М. Поліщук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Енергозбереження в Україні на сьогоднішній день визнано одним із пріоритетних напрямів економічного розвитку держави. Особливо це стосується транспортної галузі. Укрзалізниця є потужним споживачем електроенергії у масштабах цілої держави. Близько 75 % електроенергії, що споживається Укрзалізницею, витрачається на тягові потреби електричного рухомого складу (ЕРС). Одним із основних шляхів покращання енергоефективності систем тягового електроспоживання є ефективне використання режимів тяги і рекуперації електричного рухомого складу. Згідно з існуючим досвідом застосування рекуперативного гальмування дає змогу суттєво зменшити загальні тягові витрати на електроенергію. Проте на значній частині електрорухомого складу України режим рекуперативного гальмування не використовується з причини того, що електрорухомий склад у більшості випадків не оснащено системами рекуперативного гальмування, а відомі системи рекуперативного гальмування мають вхідні напівпровідникові перетворювачі, які зумовлюють значну емісію в живильну мережу вищих гармонік струму та реактивної складової потужності, що значно знижує енергоефективність системи тягового електропостачання. У зв'язку з вищесказаним, актуальним завданням є покращання енергоефективності та показників електромагнітної сумісності ЕРС із системою тягового електропостачання шляхом удосконалення вхідних перетворювачів ЕРС.

Питанням покращання енергоефективності електрорухомого складу шляхом поліпшення якості електроенергії в режимах тяги і рекуперації присвячені роботи відомих вчених, зокрема Шидловського А. К., Козлова А. В., Солодунова А. М., Гончарова Ю. П., Панасенка М. В., Жемерова Г. Г., Буткевича О. Ф., Волкова І. В., Долбні В. Т., Домніна І. Ф., Жежеленка І. В., Щербака Я. В., Akagi H., Dixon J. W., Hernandez J., Kanazawa Y., Kolar J., Nabaе A., Moran L., Rodr'iguez J., Silva L., Tsukamoto Y., Ziogas P. та інших.

Перспективним є застосування у складі ЕРС активних чотириквadrантних випрямлячів (4QS) з корекцією коефіцієнта потужності, що дасть змогу у значній мірі покращити показники електромагнітної сумісності (ЕМС) ЕРС в режимах тяги та рекуперації. Проте відомі алгоритми керування 4QS-перетворювачами зумовлюють необхідність реалізації досить високої частоти комутації силових ключів, які у свою чергу мають досить обмежені частотні властивості. Крім того, необхідність реалізації високої частоти комутації ключів зумовлює значні динамічні втрати та знижує загальну енергоефективність ЕРС. У зв'язку з цим науково-прикладна задача забезпечення якості вхідного струму при використанні силових транзисторів з обмеженими частотними властивостями шляхом застосування покращених алгоритмів модуляції є актуальною та визначила напрям дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» Українського державного університету залізничного транспорту (УкрДУЗТ) згідно з Державною цільовою програмою реформування

залізничного транспорту на 2010–2019 роки (Постанова Кабінету Міністрів України № 1390 від 16.12.2009 р.) та Стратегією розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року, яку схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 16.01.2009 р. № 1555-р.

Науково-дослідні роботи за темою дисертації за участю здобувача проводилися на кафедрі автоматизованих систем електричного транспорту Українського державного університету залізничного транспорту з такими темами: «Поліпшення якості електричної енергії на виході випрямної установки тягової підстанції постійного струму» (ДРН 0111U002244); «Оптимізація витрат електричної енергії рухомим складом з напівпровідниковими перетворювачами» (ДРН 0115U000281).

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження – підвищення енергетичної ефективності режимів тяги і рекуперації електричного рухомого складу постійного і змінного струмів шляхом упровадження новітніх систем керування (СК) напівпровідниковими перетворювачами.

Для досягнення мети в дисертації поставлено такі задачі:

- провести аналіз існуючих систем рекуперативного гальмування на ЕРС постійного і змінного струмів. Виявити їх недоліки та можливі шляхи удосконалення;

- отримати аналітичні вирази, що описують умови процесу кінцевої тривалості в системі автоматичного регулювання (САР), що регулює струм якоря тягового двигуна постійного струму (ДПС) в режимі рекуперації, з метою отримання максимальної швидкодії цієї САР. Провести імітаційне моделювання;

- виконати розробку та дослідження системи керування вхідного 4QS-перетворювача на основі покращеної гістерезисної модуляції. Визначити регульовальні характеристики та залежність середньої на періоді частоти комутації силових ключів від уставки гістерезису СК та параметрів силової частини. Виконати розробку імітаційних моделей та провести дослідження параметрів якості електричної енергії 4QS-перетворювача в режимах випрямлення, який відповідає режиму тяги ЕРС, та рекуперації;

- виконати розробку та дослідження системи керування вхідного 4QS-перетворювача ЕРС на основі двосторонньої ШІМ-модуляції. Визначити аналітичні вирази, що описують залежність спектрів вхідного струму та вихідної напруги 4QS-перетворювача, як функцію від частоти живильної мережі, частоти ШІМ та електричних параметрів перетворювача (активний опір вхідного дроселя, індуктивність вхідного дроселя, ємність вхідного фільтра);

- виконати розробку та дослідження системи керування вхідного 4QS-перетворювача ЕРС на основі компенсаційних методів з двосторонньою ШІМ. Визначити значення компенсаційних кутів.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси в електричних колах вхідних перетворювачів ЕРС.

Предмет дослідження – силові кола та системи автоматичного регулювання вхідних перетворювачів ЕРС, що забезпечують покращені енергетичні показники в режимах тяги і рекуперації.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених задач використовувалися: класична теорія електричних кіл; математичний апарат Z-перетворення; метод параметричного формування процесу кінцевої тривалості; чисельні методи розв'язання систем диференціальних і алгебраїчних рівнянь при аналізі електромагнітних процесів і характеристик; методи рядів Фур'є для визначення величини гармонік випрямленої напруги і струму мережі; частотні методи теорії автоматичного керування для синтезу передавальної функції регулятора вихідної напруги, а також імітаційне моделювання перетворювачів із запропонованими системами керування.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше отримано аналітичні вирази, що описують умови процесу кінцевої тривалості при регулюванні струму обмотки якоря тягового двигуна постійного струму, який живиться від тиристорного випрямляча чи широтно-імпульсного перетворювача в режимі електричного гальмування, які дають змогу отримати оптимізовану за критерієм швидкодії систему автоматичного регулювання.

2. Вперше отримано регульовальну характеристику 4QS-перетворювача ЕРС змінного струму з гістерезисною системою керування, яка визначає залежність вихідної напруги від параметрів живильної мережі, регульовального коефіцієнта ξ і струму навантаження і дає можливість виконувати регулювання вихідної напруги із забезпеченням стійкості процесів випрямлення і рекуперації в зазначеному діапазоні струму навантаження.

3. Вперше запропоновано покращений алгоритм гістерезисної модуляції 4QS-перетворювача, який шляхом додавання в алгоритм комутації станів силових ключів, що спричиняють одночасне вмикання пар ключів VT1-VT3 та VT2-VT4, дає можливість знизити число комутації силових ключів та динамічні втрати в активному випрямлячі до 33 %.

4. Отримано залежність середньої на періоді частоти комутації силових ключів 4QS-перетворювача з базовою гістерезисною системою керування у функції струму навантаження, параметрів силової схеми, значення живильної напруги і значення регульовального коефіцієнта системи керування ξ , яка дає змогу оцінити втрати потужності в перетворювачі та визначити його ККД.

5. Набули подальшого розвитку компенсаційні системи керування вхідними 4QS-перетворювачами ЕРС змінного струму, які за рахунок синхронізації паралельних каналів керування та взаємного зсуву опорних ШІМ-сигналів на заданий електричний кут дозволяють отримати ефект взаємної компенсації вищих гармонік струмів, спожитих тяговим приводом, чим досягається покращання показників електромагнітної сумісності та зменшення додаткових втрат у системі тягового електропостачання від вищих гармонік, та дають змогу знизити частоту комутації силових ключів, що збільшує коефіцієнт корисної дії електричного рухомого складу.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що теоретичні та експериментальні дослідження формують науково-технічну базу для створення нових систем електричного гальмування. Результати дисертаційної роботи рекомендуються для практичного використання при

модернізації та розробленні нового електрорухомого складу з метою підвищення якості застосування рекуперативного гальмування. Практичну цінність підтверджено актами про впровадження результатів дисертаційного дослідження у навчальний процес кафедри «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» при підготовці бакалаврів і магістрів за освітніми програмами «Електричний транспорт» та «Електричні системи і комплекси транспортних засобів» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»; Навчально-наукового інституту перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів Українського державного університету залізничного транспорту при підготовці фахівців служб електропостачання та локомотивного господарства, сигналізації та зв'язку (відділ СЦБ), інженерів, начальників дільниць, старших електромеханіків СЦБ; Харківського центру професійної освіти регіональної філії «Південна залізниця» ПАТ «Укрзалізниця» при проведенні занять під час отримання робітничих професій «Електромонтер з ремонту та обслуговування пристроїв сигналізації, централізації і блокування», «Електромонтер зв'язку», «Поїзний електромеханік». Результати дисертаційної роботи були використані під час розроблення перетворювачів частоти та імпульсних джерел живлення з корекцією коефіцієнта потужності, що виконувались співробітниками ТОВ «ВО ОВЕН» (м. Харків). Основні результати дисертаційної роботи передані для використання до регіональної філії «Південна залізниця» ПАТ «Укрзалізниця», що підтверджується відповідними актами впровадження, які наведені в додатках до дисертаційної роботи.

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати, подані в дисертації, отримані здобувачем особисто. Серед них: аналіз систем рекуперативного гальмування тягового електропривода ЕРС постійного та змінного струмів; умови реалізації граничної швидкодії САР електричним гальмуванням; розроблення методики розрахунку коефіцієнта корисної дії 4QS-перетворювача з гістерезисною системою керування залежно від струму навантаження, значення вхідної індуктивності, амплітуди живильної напруги, ємності вихідного конденсатора та значення регульовального коефіцієнта системи керування ξ ; визначення регульовальної характеристики вихідної напруги 4QS-перетворювача з гістерезисною системою керування залежно від параметрів живильної мережі, регульовального коефіцієнта ξ та струму навантаження (вихідної потужності); отримання аналітичних виразів, що описують залежність спектрів вхідного струму та вихідної напруги 4QS-перетворювача із системою автоматичного регулювання на основі двосторонньої ШІМ-модуляції.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідалися й обговорювалися на Міжнародних науково-практичних і науково-технічних конференціях «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития '2010» (Одесса: Черноморье, 2010); «Перспективные компьютерные, управляющие и телекоммуникационные системы для железнодорожного транспорта Украины» (Алушта, 2010); «Современные проблемы и пути их решения в науке,

транспорте, производстве и образовании '2010» (Одесса: Черноморье, 2010); «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології» (Київ: ДЕТУТ, 2011); «Современные направления теоретических и прикладных исследований '2011» (Одесса: Черноморье, 2011); Міжнародна науково-технічна конференція кафедр академії, інженерно-технічних працівників залізниць, підприємств та організацій України та інших країн (Харків: УкрДАЗТ, 2010, 2011); «Інформаційна техніка, електромеханіка та електротехніка» (ІТЕМЕТ-2011) (Луганськ, 2011); «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків: НТУ «ХП», 2011); «Інноваційні технології на залізничному транспорті» (м. Красний Лиман, 2011); «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании '2011» (Одесса: Черноморье, 2011); «Современные направления теоретических и прикладных исследований» (Одесса, 2012); «Залізничний транспорт: сучасні проблеми науки» (Київ: ДЕТУТ, 2012); «Проблеми и перспективы развития железнодорожного транспорта» (Днепропетровск: ДИИТ, 2012); «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (Харків: УкрДАЗТ, 2015); «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика» (Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2017); «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (Харків: УкрДУЗТ, 2017), а також на щорічних семінарах НАН України «Проблеми перетворення електроенергії у системах електричного транспорту» (Харків, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015, 2016, 2017 рр.).

Публікації. Основний зміст дисертації викладено у 22 наукових публікаціях, з них: 8 статей у наукових фахових виданнях України, (1 – у виданні, включеному до міжнародних наукометричних баз), 14 опубліковані в тезах доповідей і матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку джерел інформації та додатків. Повний обсяг дисертації становить 186 сторінок основного тексту, включаючи: 91 рисунок по тексту, 10 таблиць по тексту, 195 найменувань використаних джерел інформації на 21 сторінках, 5 додатків на 5 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі наукового дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, подано дані про зв'язок роботи з науковими програмами, показано наукову новизну, практичне значення і шляхи реалізації результатів дисертаційних досліджень, а також містяться дані про їх апробацію, публікацію і впровадження.

У **першому розділі** визначено, що одним із найбільш перспективних шляхів покращання енергоефективності ЕРС є використання режиму рекуперативного гальмування (РГ). Проте встановлено, що на значній частині ЕРС України режим РГ не використовується. Основною причиною цього є те, що ЕРС не оснащено системами РГ, а існуючі системи мають низку недоліків.

Одним із недоліків системи РГ на ЕРС постійного струму є неоптимізованість параметрів систем автоматичного регулювання, що призводить у ряді випадків до значних перерегулювань та збільшеного часу відпрацювання сигналів завдань. Для забезпечення стійкості процесу регулювання струмів якоря та обмотки збудження тягового двигуна постійного струму (ДПС) в режимі рекуперації було поставлено задачу оптимізації САР за параметром її швидкодії, що можна досягти реалізацією процесу кінцевої тривалості.

Системи РГ на ЕРС змінного струму зумовлюють значну емісію в живильну мережу вищих гармонік та реактивної складової потужності, що значно знижує енергоефективність системи електропостачання. Виконано аналіз шляхів покращання ЕМС ЕРС змінного струму. Запропоновано впровадження у структуру тягового електропривода 4QS-перетворювачів, перевагою яких є можливість реалізації форми вхідного струму, близької до синусоїди з коефіцієнтом гармонічних спотворень (КГС) < 5 %, та коефіцієнта потужності (КП) > 99 %, низький рівень пульсації вихідної напруги та можливість двонапрявленої передачі потужності. Проте системи керування цими перетворювачами для систем електричної тяги є недостатньо дослідженими і потребують подальшого вдосконалення.

У **другому розділі** виконано синтез двоконтурної САР із застосуванням імпульсної моделі перетворювача, що забезпечує регулювання струмів якоря $I_{я}$ та обмотки збудження $I_{з}$ тягового ДПС послідовного збудження типу ЕД141АУ1 в режимі електричного гальмування (рисунк 1), яка за рахунок виконання умов процесів кінцевої тривалості (ПКТ) забезпечує її максимальну швидкодію регулювання $I_{я}$. Параметри ТЕД: $R_{я} = 0,0638$ Ом, $R_{з} = 0,0269$ Ом, $L_{я} = 1,4 \cdot 10^{-3}$ Гн, $L_{з} = 5,2 \cdot 10^{-3}$ Гн. При цьому ТЕД в режимі електричного гальмування переходить у режим незалежного збудження, при якому обмотка збудження ДПС живиться від напівпровідникового перетворювача, яким на різних моделях ЕРС є тиристорний випрямляч або понижувальний ШПП, що реалізовано для забезпечення автоматичного регулювання.

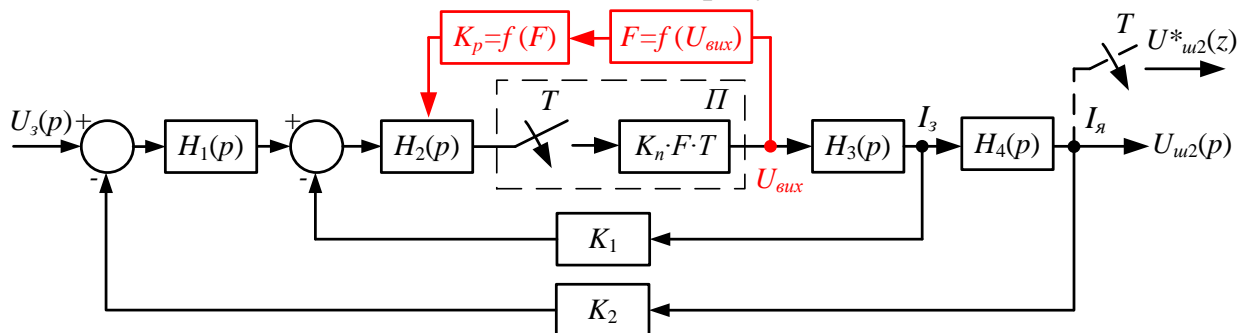


Рисунок 1 – Структурна схема САР струмів якоря та обмотки збудження

На рисунку 1 запропоновано такі позначення: $H_1(p)$ і $H_2(p)$ – передавальні функції регулятора струму якоря та регулятора струму обмотки збудження відповідно; Π – імпульсна модель перетворювача; T – період дискретності перетворювача; $H_3(p)$ і $H_4(p)$ – передавальні функції обмотки збудження та якійного кола двигуна відповідно; K_n – статичний коефіцієнт передачі перетворювача; F – фактор пульсації; K_1 і K_2 – коефіцієнти каналу зворотного зв'язку за струмом обмотки збудження і за струмом якоря відповідно.

Вирази, що описують передавальні функції САР (рисунок 1), мають вигляд:

$$H_1(p) = \frac{T_2 \cdot p + 1}{T_1 \cdot p}; \quad H_2(p) = K_p; \quad H_3(p) = \frac{K_3}{T_3 \cdot p + 1}; \quad H_4(p) = \frac{K_4}{T_n \cdot p + 1};$$

$$K_3 = \frac{R_{u1}}{R_3 + R_{u1}}; \quad K_4 = \frac{K_2 \cdot (R_3 + R_{u1}) \cdot R_{u2}}{(R_я + R_n + R_{u2}) \cdot R_{u1}}. \quad (1)$$

У роботі отримані вирази, що описують умови процесу кінцевої тривалості при регулюванні струму якоря ДПС:

$$K_p \cdot K_3 \cdot K_n \cdot F \cdot K_1 \cdot \frac{T}{T_3} = 1; \quad T_1 = T_3 \cdot \frac{K_2 \cdot K_4}{K_1} \cdot \left(1 - e^{-\frac{T}{T_n}}\right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{T}{T_3}}\right);$$

$$T_2 = \frac{T_n \cdot \left[e^{-\frac{T}{T_n}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{T}{T_n}}\right) - e^{-\frac{T}{T_3}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{2T}{T_n}}\right) \right] - T_3 \cdot e^{-\frac{2T}{T_n}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{T}{T_3}}\right)}{e^{-\frac{T}{T_n}} - e^{-\frac{T}{T_3}}}. \quad (2)$$

За результатами аналітичного розрахунку та імітаційного моделювання перехідного процесу при ступінчатій зміні сигналу завдання струму якоря, наведеними на рисунку 2, видно, що перехідний процес завершується за три тактових інтервали тиристорного випрямляча, що відповідає умовам реалізації процесів кінцевої тривалості.

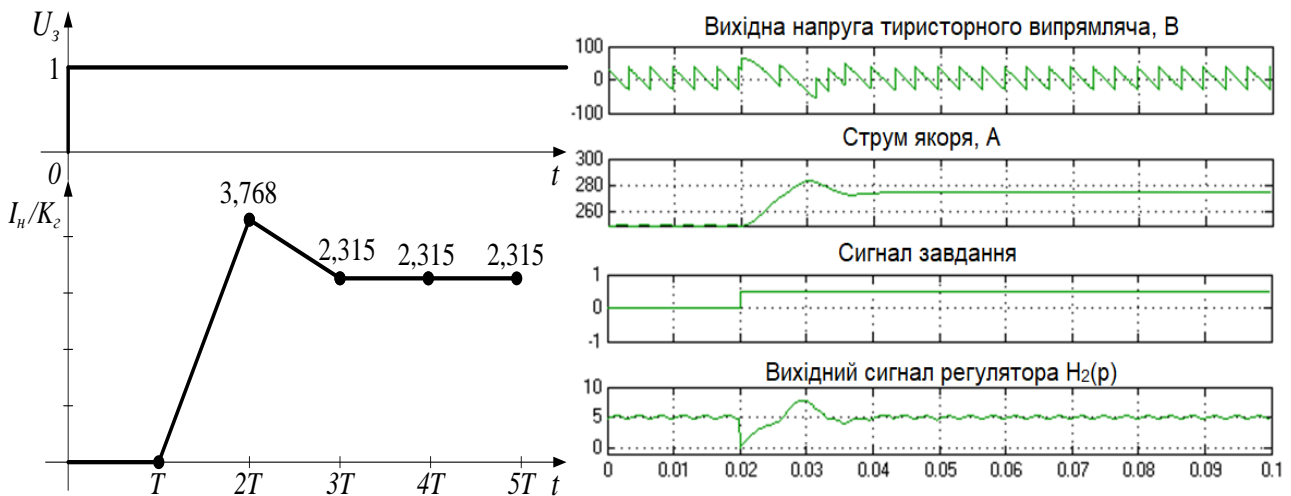


Рисунок 2 – Результати аналітичного розрахунку та імітаційного моделювання перехідного процесу при ступінчатій зміні сигналу завдання струму якоря

Отримано вирази фактора пульсацій САР із тиристорним випрямлячем –

$$F^{-1} = 1 + K_n \cdot K_0 \cdot \left\{ \frac{K_1 \cdot T}{2 \cdot T_3} + \frac{K_2 \cdot T}{T_1} \cdot \frac{K_2}{T_1 \cdot (T_n - T_2)} \cdot \left[T \cdot (T_3 - T_n) + T_n \cdot (T_2 - T_n) \cdot \frac{\omega_0 \cdot T_n \cdot \text{ctg} \alpha_0 - 1}{1 + \omega_0^2 \cdot T_n^2} \times \right. \right.$$

$$\times \left. \left(\frac{T}{2 \cdot T_n} \cdot \text{cth} \frac{T}{2 \cdot T_n} - \frac{\pi}{m} \cdot \text{ctg} \frac{\pi}{m} \right) \right] + \left[\frac{K_2 \cdot T_3 \cdot (T_3 - T_2) + K_1 \cdot T_1 \cdot (T_n - T_2)}{T_1 \cdot (T_n - T_2)} \right] \times$$

$$\times \frac{\omega_0 \cdot T_3 \cdot \text{ctg} \alpha_0 - 1}{1 + \omega_0^2 \cdot T_3^2} \cdot \left(\frac{T}{2 \cdot T_3} \cdot \text{cth} \frac{T}{2 \cdot T_3} - \frac{\pi}{m} \cdot \text{ctg} \frac{\pi}{m} \right) + \frac{\text{ctg} \alpha_0}{\omega_0 \cdot T_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi}{m} \cdot \text{ctg} \frac{\pi}{m} \right) \left. \right\}, \quad (3)$$

та з широтно-імпульсним перетворювачем –

$$F^{-1} = 1 + K_n \cdot K_0 \cdot \left[\frac{K_1 \cdot T}{T_3} \cdot \frac{e^{-\gamma \frac{T}{T_3}} - e^{-\frac{T}{T_3}}}{1 - e^{-\frac{T}{T_3}}} + \frac{K_2 \cdot T}{T_1} \cdot (1 - \gamma) + \frac{K_2 \cdot T \cdot (T_2 - T_n)}{T_1 \cdot (T_n - T_2)} \times \right. \\ \left. \times \frac{e^{-\gamma \frac{T}{T_n}} - e^{-\frac{T}{T_n}}}{1 - e^{-\frac{T}{T_n}}} + \frac{K_2 \cdot T \cdot (T_3 - T_2)}{T_1 \cdot (T_n - T_2)} \cdot \frac{e^{-\gamma \frac{T}{T_3}} - e^{-\frac{T}{T_3}}}{1 - e^{-\frac{T}{T_3}}} \right]. \quad (4)$$

Сімейства характеристик залежності F від кута керування α тиристорного випрямляча і керуючого параметра γ широтно-імпульсного перетворювача при ustalених значеннях швидкості руху поїзда показані на рисунку 3.

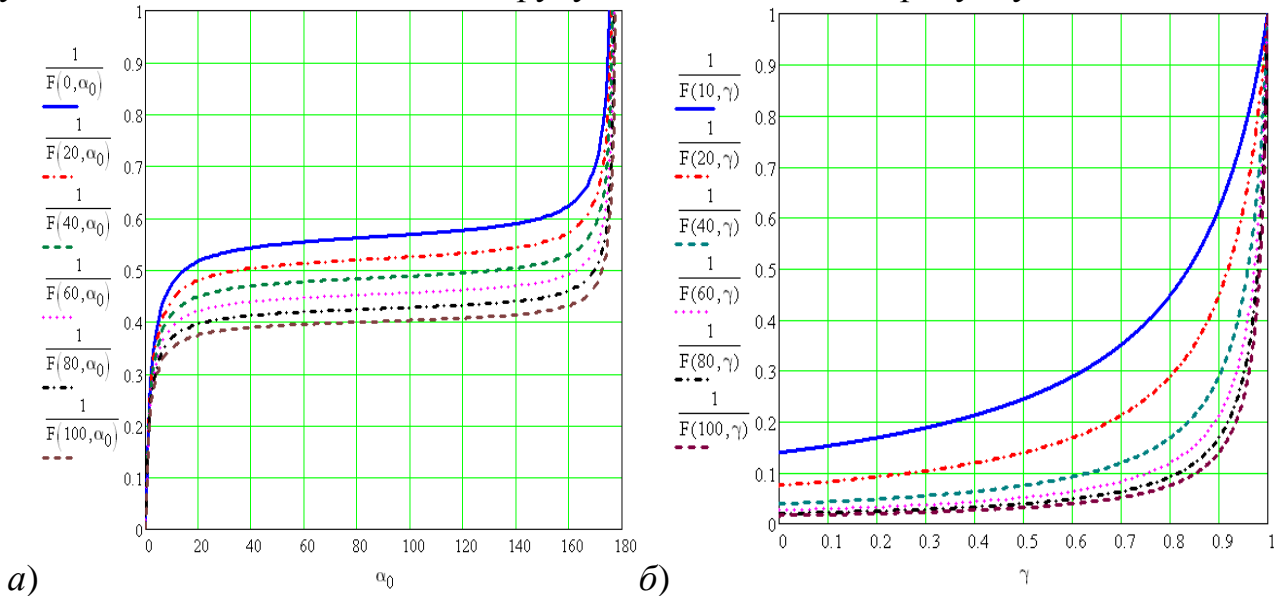


Рисунок 3 – Сімейства характеристик залежності фактора пульсацій при ustalених значеннях швидкості руху поїзда: *a* – від кута керування α тиристорного випрямляча; *б* – від керуючого параметра γ ШПІ

Встановлено, що на ПКТ суттєво впливають зміни значення фактора пульсацій у процесі регулювання електричного гальмування. Забезпечення однозначності реалізації ПКТ при змінах режиму електричного гальмування досягається застосуванням адаптивного регулятора струму обмотки збудження.

У **третьому розділі** виконано розробку та дослідження активного чотириквadrантного випрямляча у складі ЕРС змінного струму (рисунок 4) з СК, побудованою на гістерезисній модуляції (рисунок 5), яка забезпечує реалізацію форми спожитого струму в режимах тяги і рекуперації, наближену до синусоїди, та коефіцієнт потужності (КП), близький до одиниці.

У ході досліджень були отримані залежності середньої на періоді живильної напруги частоти комутації силових ключів від значення уставки гістерезису та величини вхідної індуктивності (рисунок 6).

Таким чином, регулювання величини уставки гістерезису струму Δh дає змогу забезпечити регулювання частоти комутації силових ключів. З отриманих залежностей було зроблено висновок, що оптимальним для забезпечення КГС < 5 % при реалізації середньої частоти комутації силових ключів до 8 кГц

є реалізації величини уставки гістерезису від 100 до 200 А, тобто від 5 до 10 % від максимального амплітудного значення 2000 А.

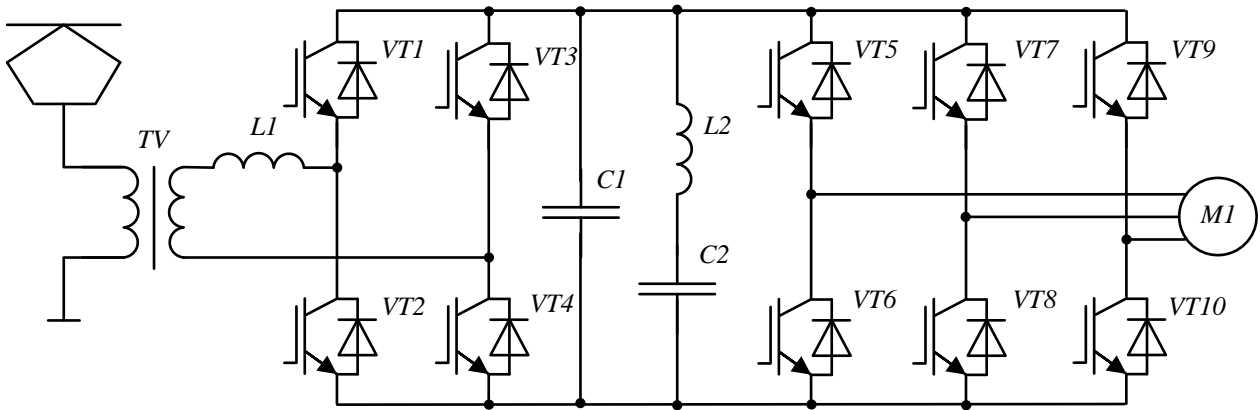


Рисунок 4 – Тяговий електропривод ЕРС змінного струму з 4QS-випрямлячем, автономним інвертором напруги та асинхронним двигуном

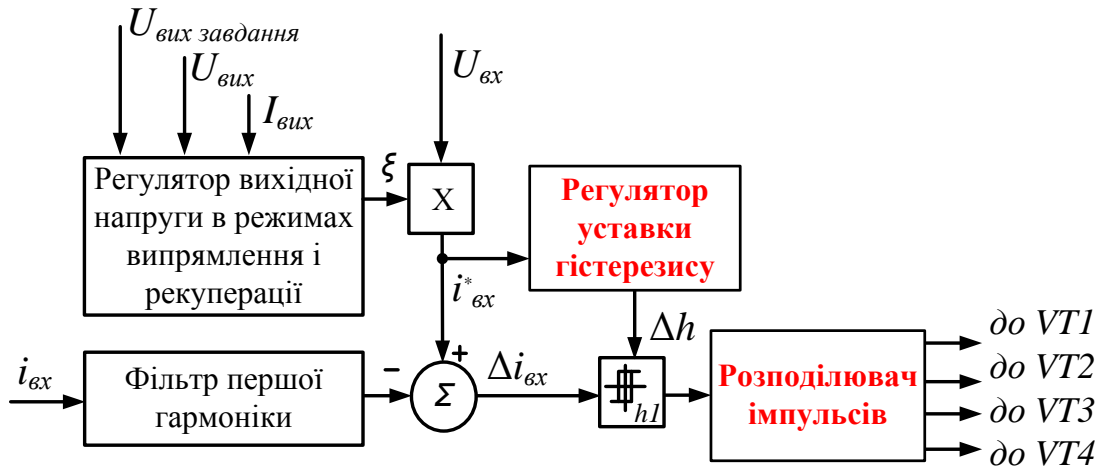
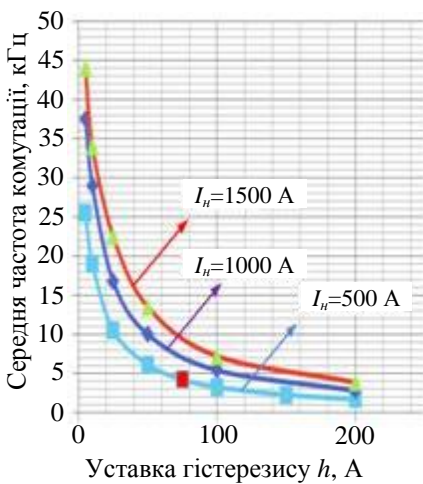
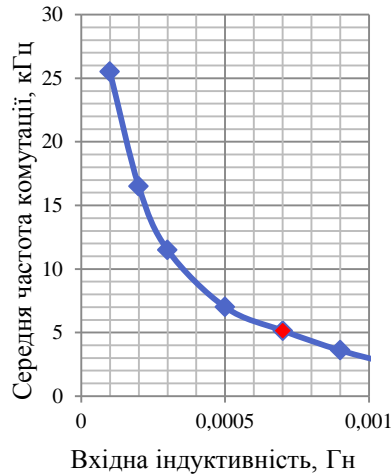


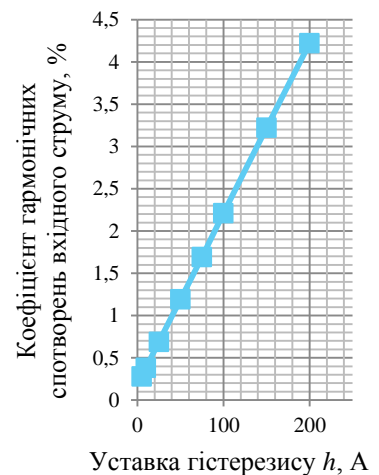
Рисунок 5 – Гістерезисна система керування 4QS-випрямлячем



а)



б)



в)

Рисунок 6 – Залежності 4QS-випрямляча: а – залежність середньої частоти комутації силових ключів від Δh ; б – залежність середньої частоти комутації силових ключів від вхідної індуктивності; в – залежність КГС від Δh

На основі рівнянь енергетичного балансу 4QS-перетворювача отримані аналітичні вирази, які описують його регульовальну характеристику

(рисунок 7), яка визначає залежність вихідної напруги $U_{вих}$ 4QS-перетворювача від середньоквадратичних значень струму навантаження $I_{вих}$ і живильної напруги $U_{вх}$ та регулювального коефіцієнта ξ :

$$U_{вих}(U_{вх}; \xi; I_{вих}) = \frac{U_{вх}^2 \cdot \eta \cdot \xi}{I_{вих}}; \quad \xi = I_{вх}^* / U_{вх}, \quad (5)$$

де η – коефіцієнт корисної дії; $I_{вх}^*$ – середньоквадратичне значення сигналу завдання вхідного струму 4QS-перетворювача; $I_{вих}$ – середньоквадратичне значення струму навантаження 4QS-перетворювача; ξ – регулювальний коефіцієнт системи керування.

Отримана регулювальна характеристика дозволяє оцінити діапазон стійкості регулювання 4QS-перетворювача за критерієм втрати стійкості регулювання, яке відбувається при зменшенні амплітуди вихідної напруги нижче амплітудного значення вхідної напруги.

Недоліком відомих алгоритмів гістерезисної модуляції однофазних 4QS-перетворювачів є досить великі динамічні втрати в силових ключах. При кожній комутації вхідного струму відомі гістерезисні системи керування реалізують почергову комутацію пар ключів «VT1-VT4» і «VT2-VT3» (згідно з рисунком 4), тобто при кожній комутації перемикаються всі чотири силові ключі.

Запропоновано покращений алгоритм комутації, який реалізує формування синусоїдального вхідного струму зі зниженим числом перемикань силових ключів, що зумовлює зменшення динамічних втрат у перетворювачі. Зменшення динамічних втрат досягається за рахунок додавання в послідовність комутаційних положень короткозамкнених комутаційних станів «VT1-VT3» і «VT2-VT4», які при позитивній полярності вхідної напруги спричиняють зростання миттєвого значення вхідного струму, а при негативній полярності вхідної напруги спричиняють його спад. Тобто при перемиканні з комутаційного положення «VT1-VT4» в «VT1-VT3» комутація струму відбувається, а ключі VT1 та VT2 при цьому не перемикаються.

Запропонований покращений алгоритм комутації силових ключів наведено в таблиці 1 та графічно показано на рисунку 8. В таблиці 1 сірим кольором зображено етапи комутацій вхідного струму, при яких не відбувається комутація відповідних ключів.

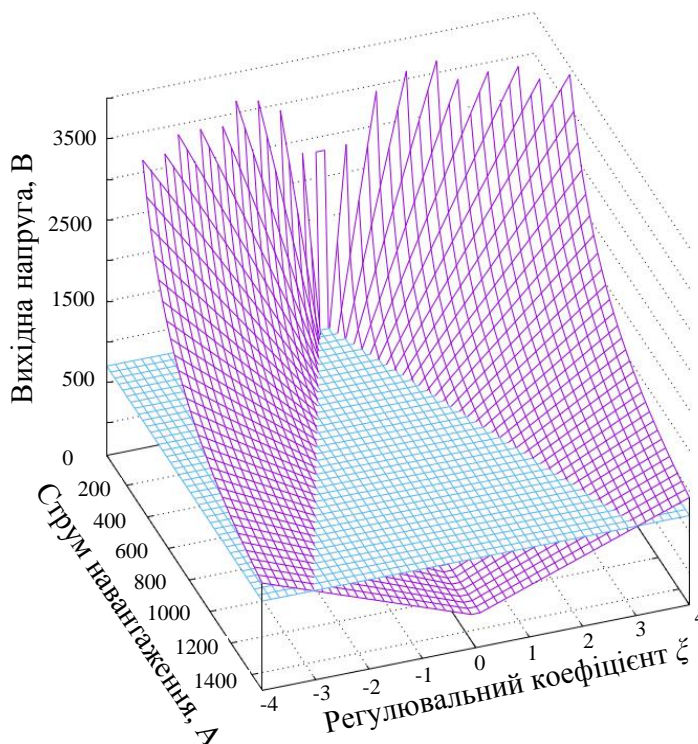


Рисунок 7 – Регулювальна характеристика 4QS-перетворювача

Таблиця 1 – Комутаційні положення силових ключів при покращеній гістерезисній модуляції

Силовий ключ	Комутаційні положення силових ключів при позитивній полярності вхідної напруги						Комутаційні положення силових ключів при негативній 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
Номер кроку	Крок 1	Крок 2	Крок 3	Крок 4	Крок 5	Крок 6	Крок 1	Крок 2	Крок 3	Крок 4	Крок 5	Крок 6

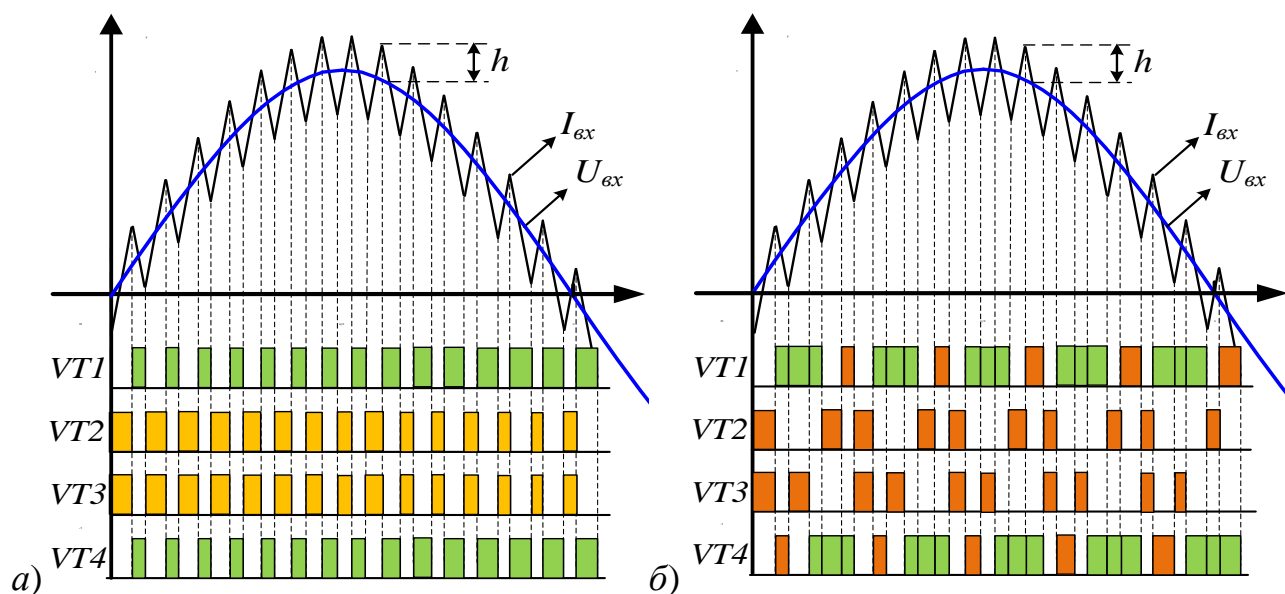


Рисунок 8 – Процес формування синусоїдального вхідного струму та сигнали включення ключів: *а* – при класичній гістерезисній модуляції; *б* – при покращеній гістерезисній модуляції

Як видно з рисунка 8 і таблиці 1, запропонований алгоритм комутації дає змогу знизити кількість перемикачів ключів, що зменшує загальні динамічні втрати в ключах 4QS-перетворювача з гістерезисною системою керування до 33 %, що збільшує його ККД.

Проведені дослідження на імітаційній моделі підтвердили теоретичні положення зниження динамічних втрат та реалізації високих показників ЕМС (рисунок 9). При величині вхідної індуктивності 0,2 мГн за час 0,2 с число перемикачів кожного ключа чотириквадрантного випрямляча з класичною гістерезисною системою керування в режимах випрямлення та рекуперації склало 2961, а з покращеною гістерезисною системою керування – 1954. З приведеного Фур'є-аналізу випливає, що коефіцієнт гармонічних спотворень форми вхідного струму в режимі випрямлення для покращеної гістерезисної СК склав 1,86 %, що є досить високим показником, проте широкий спектр вищих гармонік значно ускладнює ЕМС тягових струмів з електричними колами залізничної автоматики. Дослідження також виявили і недолік гістерезисної системи керування, а саме високу частоту комутації ключів 4QS-перетворювача (декілька десятків кілогерців), яка є змінною в процесі роботи перетворювача,

що відповідно спричиняє досить широкий спектр вищих гармонік вхідного струму та вихідної напруги.

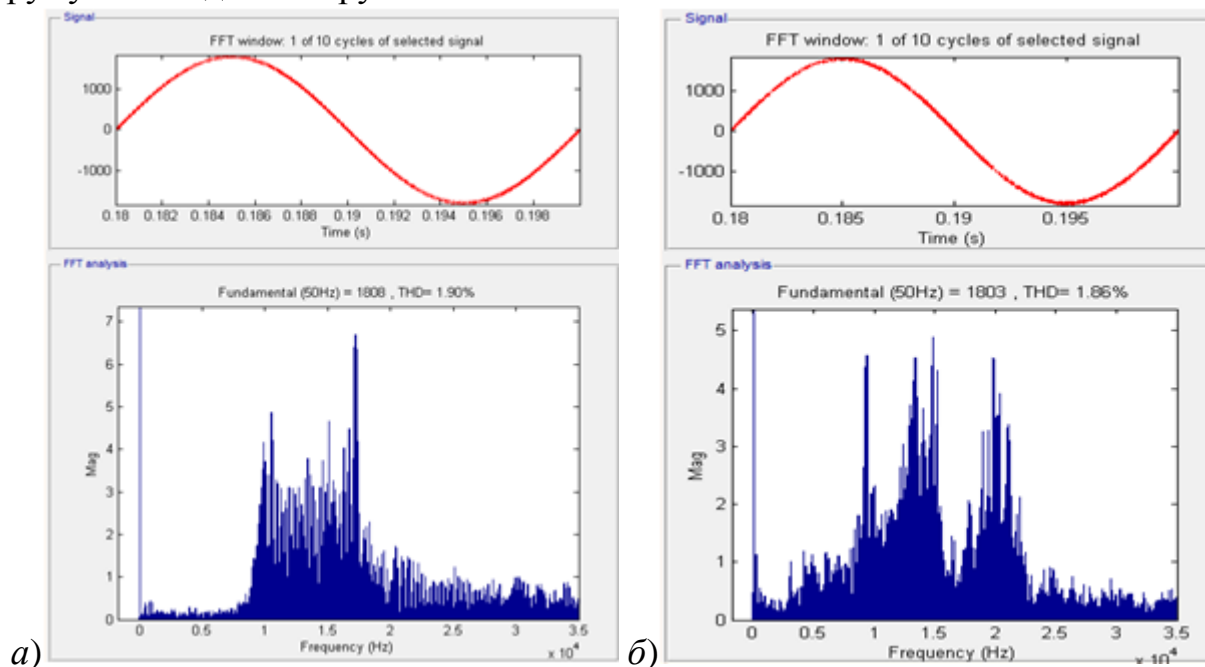


Рисунок 9 – Фур'є-аналіз вхідного струму 4QS-перетворювача в режимі випрямлення: *a* – з класичною гістерезисною СК; *б* – з покращеною гістерезисною СК

У **четвертому розділі** виконано розробку та дослідження двоканального 4QS-перетворювача із системою керування на базі двоканальної ШІМ (рисунок 10). Вагомою перевагою 4QS-перетворювача з СК на базі ШІМ, у порівнянні з СК з гістерезисною модуляцією, є реалізація значно меншої і постійної частоти комутації ключів, яка дорівнює 2 кГц.

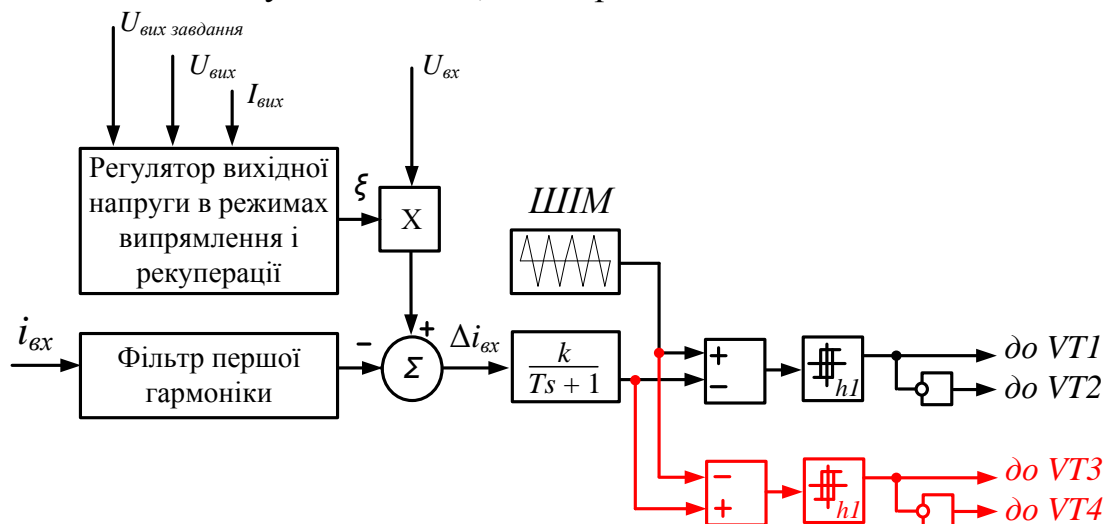


Рисунок 10 – СК 4QS-перетворювача, побудована на базі двоканальної ШІМ

Запропонована двоканальна СК забезпечує індивідуальне керування кожним ключем перетворювача і, на відміну від відомих одноканальних СК з ШІМ, забезпечує подвоєну, відносно частоти ШІМ, частоту комутації вхідного струму. Подвоєння частоти комутації вхідного струму відносно частоти ШІМ дає можливість значно знизити рівень вищих гармонік струму в живильну мережу (рисунок 11).

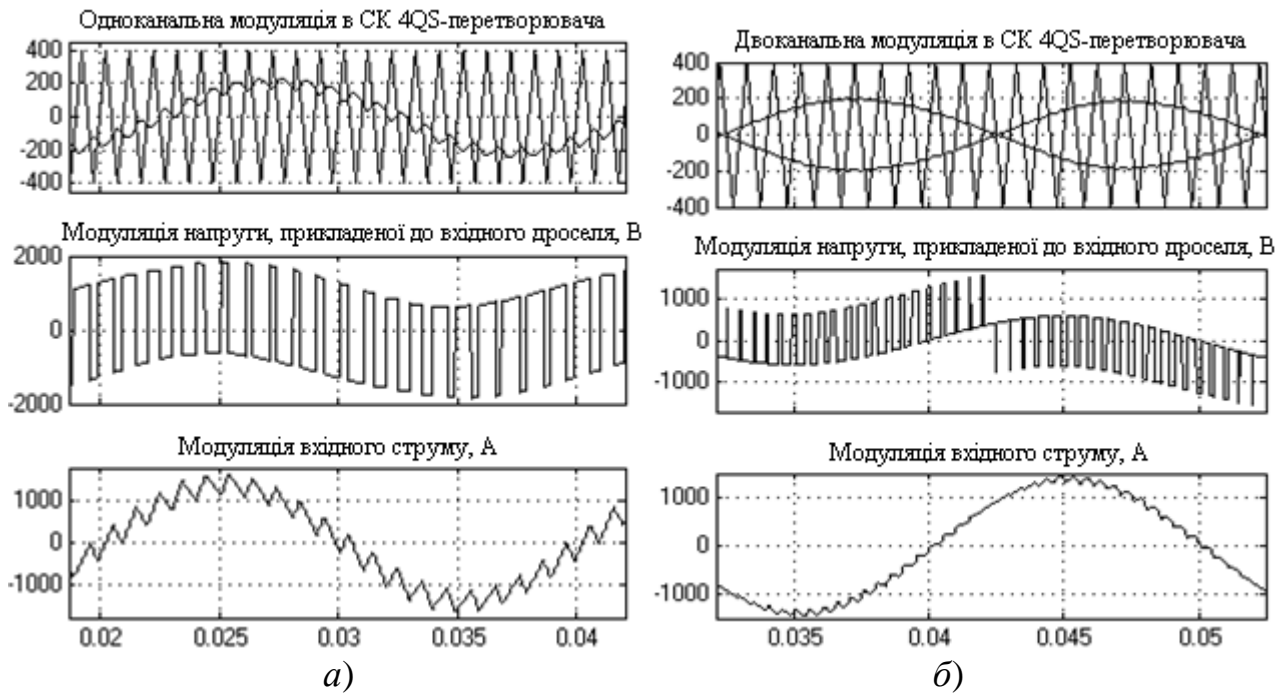


Рисунок 11 – Процеси модуляції та сигнали вмикання ключів 4QS-перетворювача: *а* – в одноканальній ШІМ; *б* – у двоканальній ШІМ

У середовищі Matlab розроблено імітаційну модель 4QS-перетворювача із системою керування на базі ШІМ, навантаженням якого є автономний інвертор напруги та асинхронний двигун. На розробленій імітаційній моделі досліджені процеси випрямлення та рекуперації енергії при застосуванні двоканальної системи керування. Результати імітаційного моделювання подано на рисунках 12 і 13.

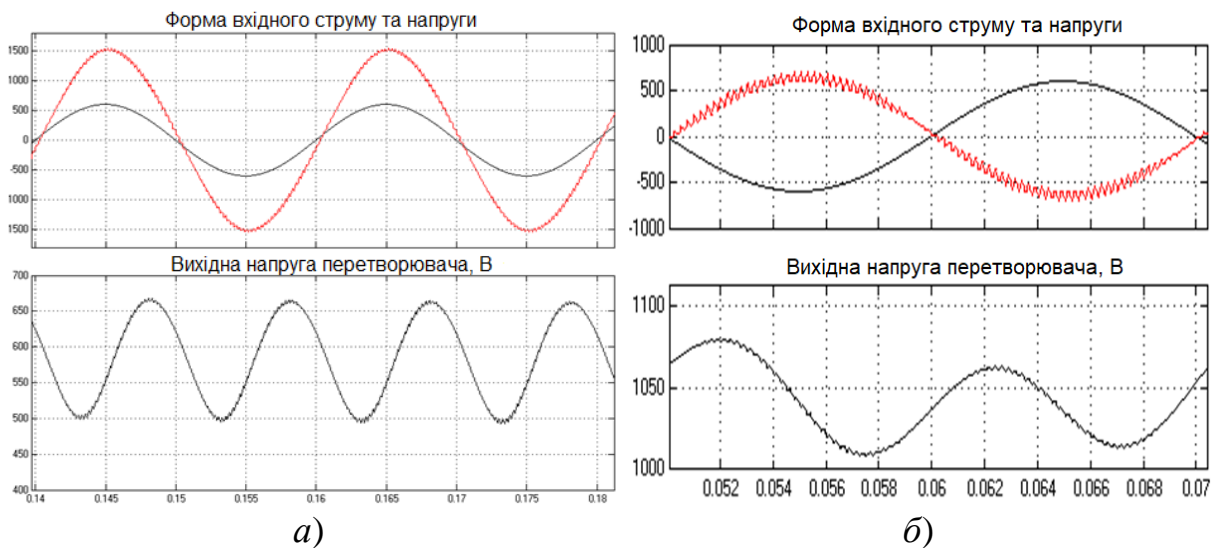


Рисунок 12 – Форми вхідного струму, вхідної напруги та вихідної напруги активного випрямляча: *а* – в режимі випрямлення; *б* – в режимі рекуперації

З проведеного Фур'є-аналізу визначено, що основний спектр вищих гармонік вхідного струму 4QS-перетворювача з двосторонньою двоканальною ШІМ залежить від частоти мережі $f_{\text{мережі}}$ і частоти ШІМ $f_{\text{ШІМ}}$.

Встановлено, що у спектрі вхідного струму відсутні вищі гармоніки, непарні частоти ШІМ.

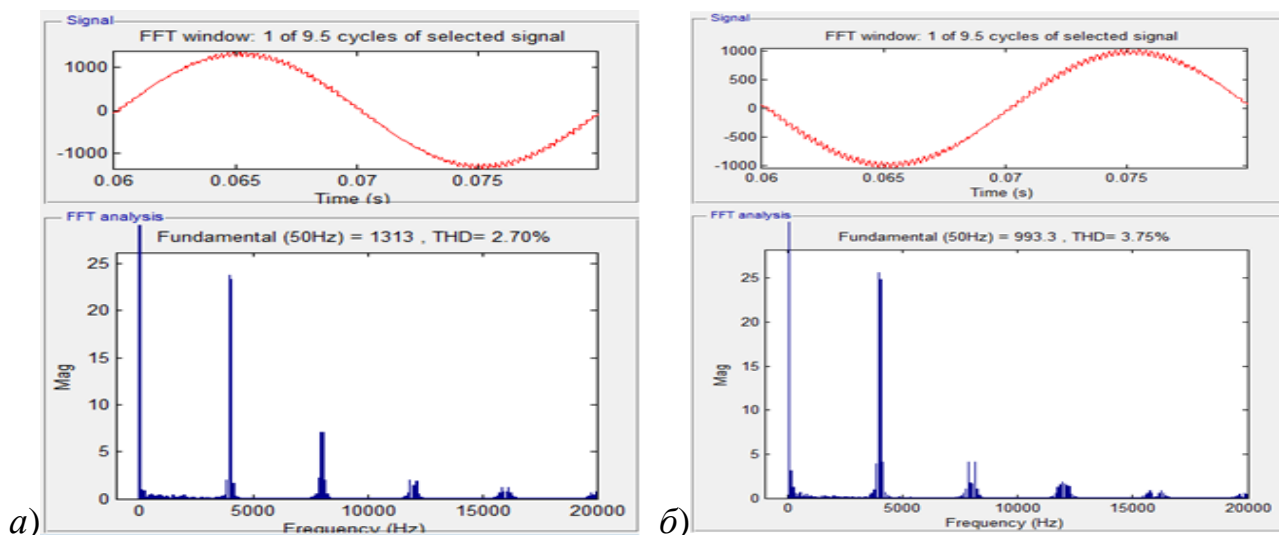


Рисунок 13 – Фур’є-аналіз вхідного струму 4QS-перетворювача з двоканальною ШІМ системою керування: *а* – в режимі випрямлення; *б* – в режимі рекуперації

У п’ятому розділі розглянуто можливість компенсації вищих гармонік вхідного струму в ЕРС змінного струму, у складі якого реалізовано паралельне живлення декількох вхідних 4QS-перетворювачів. Запропоновано компенсаційну СК 4QS-перетворювача (рисунок 14), в якій реалізовано синхронізацію каналів керування паралельних мостів 4QS-перетворювача із зсувом опорного сигналу ШІМ на кут зсуву φ .

При цьому визначено, що при реалізації в кожному 4QS-перетворювачі з двоканальною СК (рисунок 10) кут зсуву має дорівнювати $\varphi = 180^\circ/n$, де n – кількість паралельних 4QS-перетворювачів. Запропонований захід дає можливість

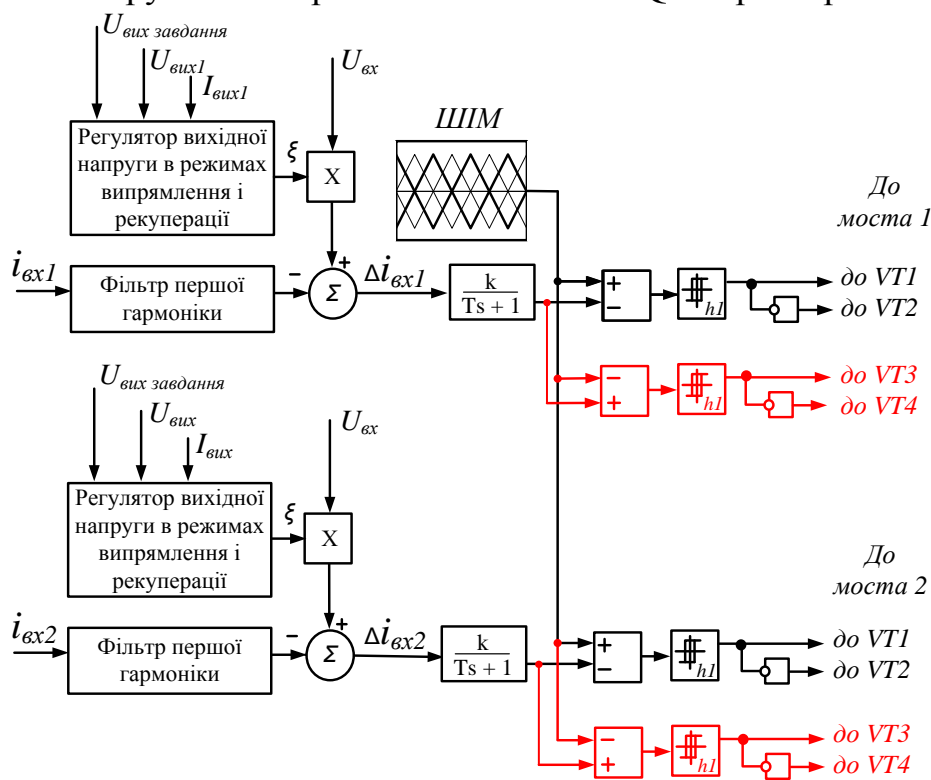


Рисунок 14 – СК компенсаційного 4QS-перетворювача

реалізувати взаємну компенсацію вищих гармонік вхідних струмів та вихідної напруги окремих мостів, що забезпечує покращання якості електричної енергії.

Для дослідження процесів, що відбуваються у компенсаційному 4QS-перетворювачі з розробленою СК, у середовищі Matlab розроблено імітаційну модель компенсаційного 4QS-перетворювача з двома паралельними мостами.

Принцип компенсації вищих гармонік вхідного струму подано на рисунку 15, з якого випливає, що зсув опорного сигналу ШІМ у СК компенсаційного 4QS-перетворювача забезпечує компенсацію високочастотних складових вхідного струму. При цьому при збільшенні числа паралельно підключених мостів у компенсаційному 4QS-перетворювачі якість електричної енергії буде покращуватись.

Виконано Фур'є-аналіз вхідного струму одного моста та Фур'є-аналіз загального спожитого струму (рисунк 16). Визначено, що у формі вихідної напруги та

вхідного струму компенсаційного 4QS-перетворювача скомпенсовані гармоніки непарні частоті ШІМ і залишилися некомпенсованими гармоніки, які є парними частоті ШІМ. Зроблено висновок, що при побудові тягових випрямлячів на основі компенсованих 4QS-перетворювачів і синхронізації їх систем керування можна отримати значне покращання показників ЕМС.

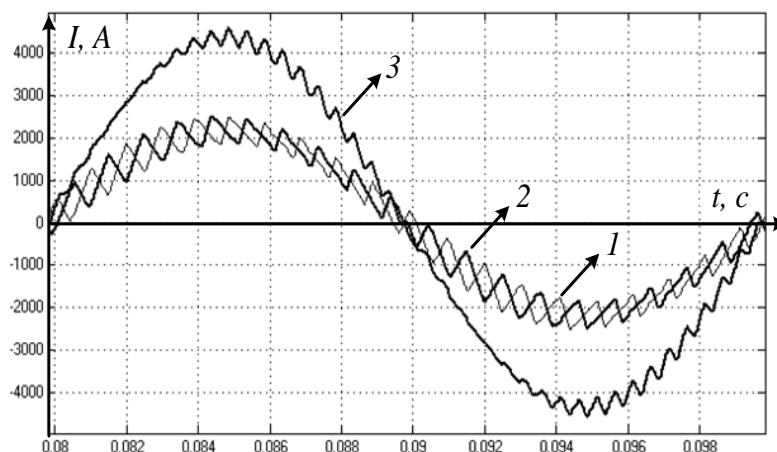


Рисунок 15 – Осцилограма вхідного струму: 1 – першого моста; 2 – другого моста; 3 – загального спожитого струму

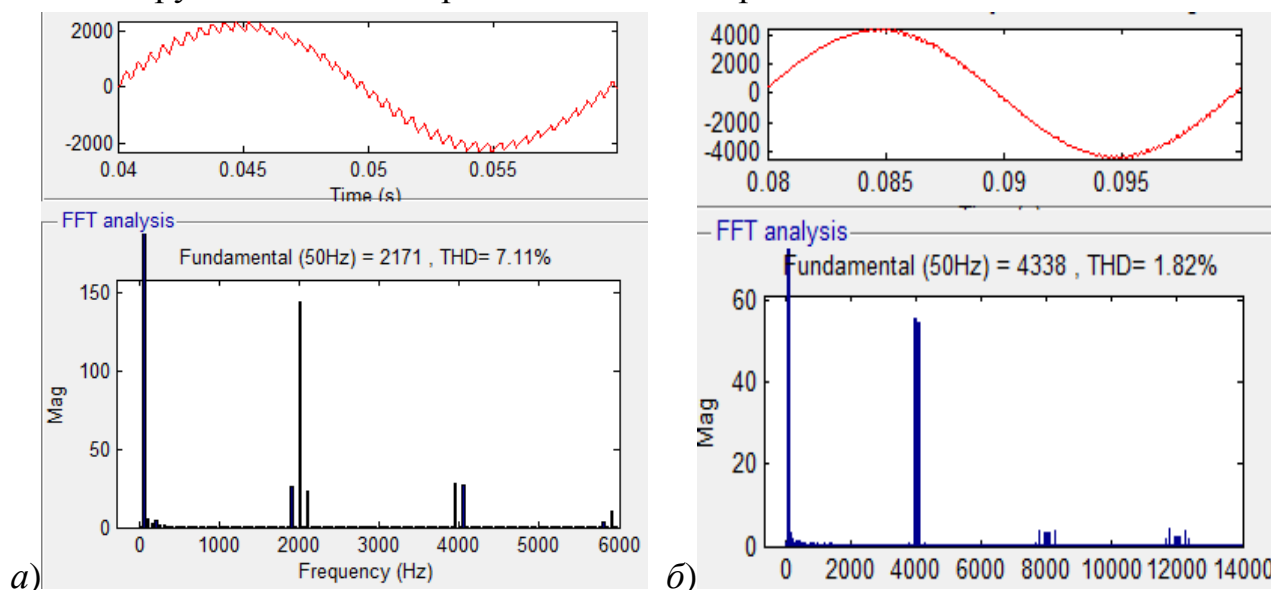


Рисунок 16 – Фур'є-аналіз струмів компенсаційного 4QS-перетворювача в режимі випрямлення: а – вхідного струму одного моста; б – загального спожитого струму компенсованим 4QS-перетворювачем

Порівняння отриманих результатів енергоефективності досліджуваних структур активних випрямлячів наведено в таблиці 2. Визначено, що для розв'язання поставлених задач оптимальним є застосування компенсаційних 4QS-перетворювачів з ШІМ, в яких реалізується взаємокомпенсація вищих гармонік вхідного струму та вихідної напруги, за рахунок чого досягається покращання показників ЕМС та енергоефективності.

Таблиця 2 – Порівняльний аналіз показників якості електричної енергії вхідних перетворювачів

Параметр	Чопіризонний випрямляч	Класична гістерезисна СК	Покращена гістерезисна СК	Одноканальна ШІМ	Двоканальна ШІМ	Компенсацій-на ШІМ (2 мости)	Компенсацій-на ШІМ (4 мости)
Коефіцієнт корисної дії, (при вхідній потужності 1200 кВт), %	98,5	82,2	88,74	96,26	96,26	97,9	98,75
Динамічні втрати в IGBT CM1200HC-90R (при струмі навантаження одного ключа 1000 А, RMS), Вт	Застосовує тиристорні модулі	26760	18049	5606,04	5606,04	3117,29	1872,91
Частота комутації, Гц	50	15000*	10500*	2000	2000	1000	500
Спектр гармонік вхідного струму відносно частоти ШІМ	-	широкий спектр вхідного струму	широкий спектр гармонік вхідного струму	(1, 2, 3, 4) $f_{ШІМ}$	(2, 4, 6, 8) $f_{ШІМ}$	(4, 8, 12, 16) $f_{ШІМ}$	(8, 16, 24, 32) $f_{ШІМ}$
Коефіцієнт потужності λ в режимі випрямлення, %	84	99,98	99,99	99,63	99,87	99,86	99,92
Коефіцієнт потужності λ в режимі рекуперації, %	65	99,97	99,89	99,23	99,74	99,74	99,89
КГС вхідного струму в режимі випрямлення, %	24,3	1,90	1,86	14,55	2,70	7,11 \rightarrow 1,82	11,14 \rightarrow 1,27
КГС вхідного струму в режимі рекуперації, %	31,5	3,96	3,57	15,10	3,75	17,5 \rightarrow 3,57	12,4 \rightarrow 2,71
Коефіцієнт пульсації вихідної напруги, %	12,2	2,69	2,94	3,12	2,85	2,85	2,85
* середня на періоді живильної напруги в режимі випрямлення							

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі теоретичних і експериментальних досліджень вирішується науково-технічна задача покращання енергоефективності вхідних перетворювачів ЕРС в режимах тяги та рекуперативного гальмування шляхом упровадження новітніх алгоритмів керування. В ході роботи отримані такі результати.

1. Встановлено, що відомі системи рекуперативного гальмування на ЕРС постійного струму мають значні недоліки, одним з яких є те, що САР струму якоря тягового двигуна в режимі електричного гальмування є не оптимізованими, що в ряді випадків призводить до значних затримок відпрацювання сигналів завдання, нестабільності САР та її виходу з ладу. Показано, що для ЕРС змінного струму перспективним шляхом покращання системи рекуперації є застосування у складі тягового електропривода активних чотириквADRантних перетворювачів, які дають можливість реалізувати режими тяги та рекуперативного гальмування з коефіцієнтом потужності, близьким до одиниці, та формою спожитого струму, близькою до синусоїди, що значно покращує енергетичні показники.

2. Встановлено, що на реалізацію процесу кінцевої тривалості регулювання струму якоря тягового двигуна суттєво впливають зміни значення фактора пульсацій вихідної напруги перетворювача, що живить обмотку збудження ТЕД під час електричного гальмування. Для забезпечення однозначності реалізації ПКТ при зміні керуючого параметру перетворювача та зміні швидкості руху ЕРС запропоновано застосування регулятора струму обмотки збудження, адаптивного до значення фактора пульсації. Показано, що синтезована двоконтурна система автоматичного регулювання струму якоря тягового двигуна постійного струму в режимі електричного гальмування задовольняє умовам процесу кінцевої тривалості, дозволяє отримати максимальну швидкодію системи регулювання і забезпечує стабільність її роботи в широкому діапазоні зміни значень фактора пульсації перетворювача та швидкості руху ЕРС. Проведене імітаційне моделювання підтвердило отримані теоретичні засади.

3. Визначено регулювальну характеристику 4QS-перетворювача, яка відображає залежність вихідної напруги від регулювального коефіцієнта СК ζ та середньоквадратичного значення струму навантаження і дає можливість виконати регулювання та стабілізацію вихідної напруги в режимах тяги та рекуперативного гальмування, а також оцінити діапазон стійкості 4QS-перетворювача при зміні струму навантаження. Встановлено, що запропонована гістерезисна система керування 4QS-перетворювача у порівнянні з відомими гістерезисними СК дозволяє знизити динамічні втрати в перетворювачі до 33 % та реалізує режими тяги і рекуперативного гальмування з покращеними показниками: коефіцієнтом потужності, коефіцієнтом гармонічних спотворень вхідного струму, який становить в режимі випрямлення 1,86 %, а в режимі рекуперативного гальмування 3,57 %.

4. Встановлено, що запропонована двоканальна система керування 4QS-перетворювача дає змогу подвоїти частоту комутації вхідного струму відносно частоти ШІМ, чим досягається покращення коефіцієнта потужності та забезпечення покращених показників електромагнітної сумісності в режимах тяги та рекуперативного гальмування при частоті комутації в 2 кГц: коефіцієнт гармонічних спотворень спожитого струму 2,70 %; коефіцієнт потужності 99,87 %; коефіцієнт пульсацій вихідної напруги 2,85 %. Розрахункове значення ККД при застосуванні високовольтних IGBT-модулів типу CM1200HC-90R склало 96,26 %.

5. Показано, що розроблена система керування компенсаційного 4QS-перетворювача з двосторонньою ШІМ із синхронізацією каналів керування паралельних мостів та зсувом у них опорних сигналів ШІМ на кут $180^\circ/n$ дає можливість реалізувати зсув фаз вищих гармонік в окремих мостах, чим досягається взаємна компенсація вищих гармонік у загальному спожитому струмі, що зумовлює значне покращення енергетичних показників.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації.

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Щербак Я. В. Динамічний коефіцієнт передачі статичного перетворювача системи автоматичного регулювання електричним гальмуванням / Я. В. Щербак, В. П. Нерубацький // Харків: Зб. наук. праць УкрДАЗТ, 2015. – Вип. 153. – С. 5-12.

Здобувачем отримані аналітичні вирази для фактора пульсацій, які дозволяють аналізувати вплив його змін на якість електричного гальмування для систем з тиристорним випрямлячем та з широтно-імпульсним перетворювачем.

Статті у фахових виданнях:

2. Нерубацький В. П. Визначення оптимального за рівнем енергоспоживання керування тяговим двигуном електрорухомого складу залізниць постійного струму / В. П. Нерубацький // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011. – № 1. – С. 59-64.

3. Щербак Я. В. Аналіз застосування рекуперативного гальмування на залізницях України / Я. В. Щербак, В. П. Нерубацький // Залізничний транспорт України. – 2011. – № 2. – С. 30-34.

Здобувачем визначено особливості, переваги та недоліки застосування рекуперативного гальмування на залізницях України.

4. Нерубацький В. П. Збільшення кількості енергії рекуперації при застосуванні електричного гальмування на шкідливих ухилах / В. П. Нерубацький // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011. – № 6. – С. 27-30.

5. Щербак Я. В. Вибір раціональних режимів ведення поїздів з метою зниження витрат електроенергії на тягу / Я. В. Щербак, В. П. Нерубацький // Залізничний транспорт України. – 2011. – № 5. – С. 16-19.

Здобувачем досліджено зниження витрат електроенергії на тягу поїздів за рахунок застосування бортового комп'ютера та вибору раціональних режимів ведення поїздів при заданому часі ходу поїзда по дільниці та впливі швидкісних обмежень.

6. Щербак Я. В. Аналіз варіантів вибору критерію оптимізації енерговитрат на тягові потреби рухомого складу залізниць / Я. В. Щербак, В. П. Нерубацький // Харків: Зб. наук. праць УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 127. – С. 137-142.

Здобувачем проаналізовано критерії оптимізації та головні результати досліджень у галузі оптимізації руху поїзда з енергетичної точки зору.

7. Нерубацький В. П. Рекуперативне гальмування на залізничному транспорті як один з видів енергозбереження в системі тяги змінного струму / В. П. Нерубацький // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2012. – № 2. – С. 11-15.

8. Щербак Я. В. Динамічні характеристики системи автоматичного регулювання струму в режимі електричного гальмування / Я. В. Щербак, В. П. Нерубацький // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2013. – № 1. – С. 58-63.

Здобувачем отримано умови процесу кінцевої тривалості системи автоматичного регулювання струму в режимі електричного гальмування.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

9. Нерубацький В. П. Зниження витрат електроенергії на тягу шляхом оптимізації руху поїздів / В. П. Нерубацький // XXXV научно-технічна конференція преподавателей, аспирантов и сотрудников Харьковской национальной академии городского хозяйства. Ч. 2. Городской электротранспорт, электроснабжение и освещение городов. – Харьков, 2010. – С. 35-36.

10. Нерубацький В. П. Удосконалення процесу рекуперації енергії в системі тягового електропостачання залізниць постійного струму / В. П. Нерубацький // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития '2010». Т. 1. Транспорт, Туризм и рекреация. Физическое воспитание и спорт. – Одесса: Черноморье, 2010. – С. 28-30.

11. Нерубацький В. П. Застосування MathCad для розв'язання оптимізаційної задачі керування рухом поїзда / В. П. Нерубацький // Матеріали докладів 23-й міжнародної конференції «Перспективні комп'ютерні, управляючі та телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України» (Алушта, 2010) // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 5-6. – С. 84-85.

12. Нерубацький В. П. Розробка математичної моделі для розрахунку енергооптимальних траєкторій руху поїзда / В. П. Нерубацький // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании '2010». Т. 1. Транспорт. – Одесса: Черноморье, 2010. – С. 48-49.

13. Нерубацький В. П. Пошук оптимальних законів керування тяговим електроприводом електрорухомого складу в режимах тяги та електричного гальмування / В. П. Нерубацький, Я. В. Щербак // Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології: Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції. – Сер. «Техніка, технологія». – К.: ДЕДУТ, 2011. – С. 112-113.

Здобувачем визначено оптимальні закони керування тяговим електроприводом електрорухомого складу залізниць постійного струму, розроблено математичні моделі, які підтвердили перспективність використання принципу максимуму для синтезу оптимального керування поїздом в режимах тяги та електричного гальмування.

14. Нерубацький В. П. Імітаційне моделювання руху електровоза постійного струму при різних режимах його роботи / В. П. Нерубацький // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований '2011». Т. 1. Транспорт. – Одесса: Черноморье, 2011. – С. 20-21.

15. Нерубацький В. П. До питання електромагнітної сумісності системи «електровоз – контактна мережа» / В. П. Нерубацький // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XIX міжнародної науково-практичної конференції, Ч. I (01-03 червня 2011 р., Харків) / за ред. проф. ТОВАЖНЯНСЬКОГО Л. Л. – Харків: НТУ «ХПІ». – С. 252.

16. Нерубацький В. П. Проблеми застосування рекуперативного гальмування на залізниці / В. П. Нерубацький // II Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених з міжнародною участю «Інноваційні технології на залізничному транспорті»: збірник наукових праць конф., 15-17 вересня 2011 р., м. Красний Лиман / відп. ред. Н. Б. Чернецька-Білецька. – Луганськ: СНУ імені В. Даля, 2011. – С. 75-78.

17. Нерубацький В. П. Визначення допустимої області керування електровозом постійного струму в режимі рекуперативного гальмування / В. П. Нерубацький // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании '2011». – Одесса: Черноморье, 2011. – Вып. 4. Т. 3. – С. 60-62.

18. Нерубацький В. П. Розробка імітаційної моделі для вирішення рівняння руху поїзда / В. П. Нерубацький // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований '2012». – Одесса: КУПРИЕНКО, 2012. – Вып. 1. Т. 2. – С. 44-45.

19. Нерубацький В. П. Аналіз існуючих критеріїв для дослідження стійкості систем рекуперативного гальмування / В. П. Нерубацький // Збірник тез ХІІ науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Залізничний транспорт: сучасні проблеми науки». – Ч. 1. – К.: ДЕТУТ, 2012. – С. 180-181.

20. Нерубацький В. П. Аналіз динамічних характеристик системи автоматичного регулювання струму в режимі електричного гальмування / В. П. Нерубацький // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Тезисы 72 Международной научно-практической конференции (19-20 апреля 2012 г., Днепропетровск) – Днепропетровск: ДИИТ, 2012. – С. 98-99.

21. Нерубацький В. П. Рациональне використання енергії рекуперації в системі тягового електропостачання / В. П. Нерубацький // 77 міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті». – Харків: Зб. наук. праць УкрДАЗТ, 2015. – Вип. 151. – Т. 1. – С. 88.

22. Нерубацький В. П. Регулювальні характеристики 4QS-перетворювача з гістерезисною системою керування / В. П. Нерубацький // ІІІ Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених, фахівців, аспірантів «Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика»: Зб. тез доповідей. – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2017. – С. 112-114.

АНОТАЦІЯ

Нерубацький В. П. Підвищення енергоефективності електричного рухомого складу в режимах тяги і рекуперації. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт. – Український державний університет залізничного транспорту МОН України, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова МОН України, Харків, 2017.

Дисертація присвячена дослідженню електромагнітних процесів в активних випрямлячах напруги з корекцією коефіцієнта потужності з системами автоматичного керування, побудованих на базі гістерезисної та широтно-імпульсної модуляції, які забезпечують високі показники електромагнітної сумісності з живильною та контактною мережами.

Отримано регулювальні характеристики 4QS-перетворювача з гістерезисною системою керування, на основі яких розроблена система автоматичного керування з реалізацією двонапрявленої передачі енергії. Дослідження активних випрямлячів із гістерезисною системою керування показали реалізацію високих показників електромагнітної сумісності, проте і виявили її принципові недоліки, а саме високу і змінну частоту комутації, що значно ускладнює її фізичну реалізацію на існуючій базі IGBT-транзисторів та зумовлює значні втрати в перетворювачі. Визначені аналітичні співвідношення максимальної частоти комутації ключів 4QS-перетворювача з гістерезисною

системою керування від параметрів живильної мережі, схеми заміщення 4QS-перетворювача, навантаження та величини уставки гістерезису.

Розроблено системи керування дворівневим 4QS-перетворювачем. Розроблені імітаційні моделі, які підтверджують реалізацію коефіцієнта потужності, близького до одиниці. Перевагою розроблених систем на основі ШІМ є реалізація постійної і значно нижчої частоти комутації, що обумовлює можливість їх фізичної реалізації, зниження динамічних втрат у перетворювачі та підвищення ККД перетворювача.

Розроблено систему керування компенсаційного активного випрямляча напруги, який складається із чотирьох паралельних мостів, які заживлені від однієї мережі живлення і працюють на одне навантаження. Синхронізація каналів керування окремих мостів з реалізацією зсуву опорного сигналу ШІМ на кут зсуву φ дає змогу реалізувати взаємну компенсацію вищих гармонік вхідного струму та вихідної напруги, чим досягається покращання показників електромагнітної сумісності: коефіцієнт потужності 99,92 %; коефіцієнт гармонічних спотворень 1,27 %; коефіцієнт пульсацій вихідної напруги 2,85 %.

Ключові слова: електротранспорт, енергоефективність, умови процесу кінцевої тривалості, 4QS-перетворювач, гістерезисна модуляція, широтно-імпульсна модуляція, компенсація вищих гармонік.

АННОТАЦИЯ

Нерубацкий В. П. Повышение энергоэффективности электрического подвижного состава в режимах тяги и рекуперации. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 – электротранспорт. – Украинский государственный университет железнодорожного транспорта Министерства науки и образования Украины, Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова Министерства науки и образования Украины, Харьков, 2017.

Диссертация посвящена исследованию электромагнитных процессов в активных четырёхквadrантных выпрямителях с системами управления, построенных на базе гистерезисной и широтно-импульсной модуляции, которые обеспечивают высокие показатели электромагнитной совместимости с питающей и контактной сетями.

Выполнен анализ путей улучшения энергетической эффективности электроподвижного состава путём реализации рекуперации в выпрямительных установках. Сделан вывод, что наиболее перспективной схемой выпрямительного агрегата тягового электропривода ЭПС является схема активного четырёхквadrантного выпрямителя, позволяющая обеспечить коэффициент мощности, близкий к единице, а также форму входного тока, приближенную к синусоиде.

Получены регулировочные характеристики 4QS-преобразователя с гистерезисной модуляцией, на основании которых разработана система автоматического управления с реализацией двунаправленной передачи энергии.

Исследования 4QS-преобразователя с гистерезисной модуляцией показали реализацию высоких показателей электромагнитной совместимости и выявили её принципиальные недостатки, а именно переменную и высокую частоту коммутации, что усложняет её физическую реализацию на существующей базе IGBT-транзисторов. Разработаны аналитические соотношения, выражающие зависимость максимальной частоты коммутации для 4QS-преобразователя с гистерезисной модуляцией от параметров питающей сети, параметров схемы замещения 4QS-преобразователя, параметров нагрузки и параметров величины уставки гистерезиса.

Разработаны системы управления двухуровневого 4QS-преобразователя с реализацией широтно-импульсной модуляции. Преимуществом разработанных систем управления на основе ШИМ является постоянная и значительно меньшая частота коммутации ключей, что обуславливает физическую реализуемость системы, а также снижение динамических потерь в преобразователе и, как следствие, повышение КПД преобразователя. При этом 4QS-преобразователь в сравнении с двухуровневым обладает большим числом ступеней модуляции напряжения, что обуславливает улучшенные показатели качества электроэнергии.

Разработана система управления компенсационного 4QS-преобразователя, состоящего из четырёх параллельных мостов, которые запитаны от одной сети и работают на одну нагрузку. Синхронизация каналов управления отдельных мостов с реализацией сдвига опорного сигнала ШИМ на угол сдвига φ обеспечивает взаимную компенсацию высших гармоник входных токов и выходного напряжения, чем достигается улучшение параметров электромагнитной совместимости: коэффициент мощности 99,92 %; коэффициент гармонических искажений 1,27 %; коэффициент пульсаций выходного напряжения 2,85 %.

Ключевые слова: электротранспорт, энергоэффективность, условия процесса конечной длительности, 4QS-преобразователь, гистерезисная модуляция, широтно-импульсная модуляция, компенсация высших гармоник.

ABSTRACT

Nerubatskyi V. P. Increases the energy efficiency of electric rolling stock in traction and regenerative braking modes. – Qualification research work as a manuscript.

Thesis for candidate degree of technical sciences of speciality 05.22.09 – electric transport. Ukrainian State University of Railway Transport MES of Ukraine, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv MES of Ukraine, Kharkiv, 2017.

The dissertation is devoted to the investigation of electromagnetic processes in active voltage rectifiers with the correction of the power factor with systems of automatic control, built on the basis of hysteresis and broadband impulse modulation, which provide high indicators of electromagnetic compatibility with power supplying and contact networks.

The regulation parameters of the 4QS-converter with a hysteresis control system are obtained, on the basis of which an automatic control system with the implementation of bi-directional energy transmission is developed. The research of active rectifiers with a hysteresis control system showed the realization of high indicators of electromagnetic compatibility and revealed their fundamental shortcoming that is high and variable switching frequency, which greatly complicates its physical implementation on the existing base of IGBT transistors and causes significant losses in the transducers. The analytical relations of the maximum switching frequency of the 4QS-converter keys with a hysteresis control system from the parameters of the power supplying network, the 4QS-converter substitution scheme, the load and the value of the hysteresis set point are determined.

Control systems for two-level 4QS-converter are designed. The simulation models are developed, which confirm the implementation of the power factor close to one. The advantage of developed systems based on PWM is the implementation of a constant and significantly lower switching frequency, which makes it possible for them to be physically implemented, reducing the dynamic losses in the converter, and increasing the efficiency of the converter.

The control system of a compensatory 4QS-converter, is developed that consists of four parallel bridges, which are powered from one network and operate on the same load. The synchronization of the control channels of individual bridges with the implementation of the shift of the PIM reference signal to the angle of displacement φ allows for the mutual compensation of higher harmonics of the input current and output voltage, which improves the indicators of electromagnetic compatibility: a power factor of 99,92 %; harmonic distortion factor 1,27 %; output pulsation coefficient of output voltage 2,85 %.

Key words: electric transport, energy efficiency, conditions of the process of finite duration, 4QS-converter, hysteresis modulation, broadband impulse modulation, compensation of higher harmonics.

Підписано до друку 08.11.2017 р. Формат 60×90/16.
Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний.
Друк – цифровий. Ум. друк. аркушів 0,9.
Наклад 110 прим. Зам. № 575738

Надруковано у ФЛ-П Черняк Л. О.
61002, м. Харків, вул. Багалія, 16
Свідоцтво № 24800000000079553, від 16.05.2007 р.