

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Краснова Олексія Олександровича

**«Активний тяговий перетворювач для електровозів змінного струму
з колекторними тяговими двигунами»,**

представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт

Актуальність теми дисертації

Електрифіковані залізниці на сьогодні складають майже половину експлуатаційної довжини мережі «Укрзалізниці», при цьому близько 90 % загального вантажообігу виконується на цих ділянках. Разом з тим, оплата електроенергії формує значну частину експлуатаційних витрат, тому раціональне використання енергоресурсів в системах електропостачання залізниць має надзвичайно важливе значення. Одним з найбільших резервів енергозбереження в системах електричної тяги є зниження споживання реактивної потужності та покращення показників якості електроенергії.

Більша частина електрорухомого складу змінного струму АТ «Укрзалізняця» обладнана колекторними тяговими двигунами та діодними або тиристорними перетворювачами. Дослідження показали, що такі електровози не відповідають сучасним європейським нормам щодо енергоефективності та показників якості електроенергії і є однією з причин низької енергетичної ефективності системи електричної тяги змінного струму.

Відповідно до «Правил улаштування системи тягового електропостачання залізниць України», нормативний коефіцієнт потужності електрорухомого складу з колекторним тяговим приводом складає для тривалого режиму роботи 0,8 в режимі тяги та 0,7 в режимі рекуперації. При потужності електровоза, відмінній від номінального значення, коефіцієнт потужності може бути значно нижчим нормативного. При цьому нормативне значення для електрорухомого складу з безколекторним тяговим приводом – 0,92 в режимі тяги.

Високий коефіцієнт потужності електровозів та електропоїздів з безколекторним тяговим приводом обумовлений, зокрема, тим, що тягові асинхронні двигуни отримують живлення від перетворювачів на повністю керованих напівпровідникових приладах (активних перетворювачів). Застосування в таких перетворювачах пасивних індуктивно-ємнісних фільтрів та широтно-імпульсної модуляції на високій частоті дає змогу забезпечувати практично нульовий фазовий зсув між векторами напруги контактної мережі та

струму електровоза, що відповідає коефіцієнту потужності, близькому до одиниці. Крім того, активні перетворювачі можуть забезпечувати практично синусоїдальну форму струму живлення. Зважаючи на неможливість швидкого масового переходу залізниць України на електровози з безколекторними тяговими двигунами, модернізація існуючого парку електровозів шляхом застосування активних перетворювачів є раціональним рішенням.

Таким чином, тема дослідження, проведеного в дисертаційній роботі та направленою на підвищення енергетичної ефективності електрорухомого складу змінного струму з колекторними тяговими двигунами за рахунок вдосконалення тягових перетворювачів, є актуальною.

Актуальність теми та вагомість результатів дисертації підтверджується тим, що вона виконувалась відповідно до Державної цільової програми реформування залізничного транспорту на 2010–2019 роки (Постанова Кабінету Міністрів України від 16.12.2009 № 1390) та Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року (схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 16.01.2009 № 1555-р).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертації, засновані на результатах детального вивчення та критичного аналізу публікацій за темою дослідження за останні роки, застосуванні сучасних методів дослідження, порівнянні результатів досліджень, проведених на імітаційних моделях, з результатами теоретичних та експериментальних досліджень, проведених іншими авторами. Припущення та спрощення, прийняті при проведенні досліджень, є допустимими для розв'язання задач, які розглядалися в дисертації.

Результати досліджень доповідались та обговорювались на міжнародних науково-технічних конференціях, а також опубліковані в наукових фахових виданнях та іноземних спеціалізованих виданнях.

Достовірність результатів досліджень

Достовірність отриманих наукових результатів підтверджується коректністю постановки завдань дослідження, відповідністю результатів математичного моделювання фізичній суті описуваних об'єктів. Отримані результати, висновки і рекомендації є логічно обґрунтованими, а їх достовірність забезпечується сходженням результатів з раніше отриманими

даними інших авторів, використанням в теоретичних дослідженнях апробованих методик, несуперечливістю результатів роботи загальновідомим фізичним сутностям процесів.

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

1. Отримали подальшого розвитку теоретичні дослідження режимів роботи тягових перетворювачів на повністю керованих напівпровідникових приладах в електроприводі електровозів змінного струму з колекторними тяговими двигунами, що дозволило встановити основні розрахункові співвідношення для системи «трансформатор – однофазний активний випрямляч струму – двигун постійного струму» з урахуванням взаємної індуктивності між обмотками трансформатора і магнітної характеристики двигуна.

2. Вперше розроблено уніфікований опис алгоритмів широтно-імпульсної модуляції з синусоїдальним, трапецеїдальним та прямокутно-ступінчастим модуляційним сигналом на основі математичного апарату алгебри логіки і методу комутаційних функцій, що дозволило застосувати єдиний підхід до розробки комп'ютерних моделей перетворювачів і спростити цей процес.

3. Вперше отримано порівняльні енергетичні характеристики однофазного активного випрямляча струму при роботі на електродвигун постійного струму для трьох алгоритмів однополярної ШІМ: з синусоїдальним, трапецеїдальним та прямокутно-ступінчастим модуляційним сигналом, що дозволило обрати раціональний варіант ШІМ для реалізації в тяговому електроприводі електровозів змінного струму.

4. Вперше отримано залежність коефіцієнта потужності від випрямленої напруги для електровоза змінного струму з двозонним активним тяговим перетворювачем з широтно-імпульсною модуляцією, що дозволило оцінити енергетичну ефективність активного тягового перетворювача в усьому діапазоні навантаження.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання

Результати дисертаційної роботи мають важливе практичне значення, яке полягає у використанні запропонованих технічних рішень для розробки тягових напівпровідникових перетворювачів при виготовленні нових та модернізації існуючих електровозів змінного струму з колекторними тяговими двигунами. Результати досліджень доцільно враховувати при проєктуванні систем тягового

електропостачання залізниць, зокрема, при виборі пристроїв фільтрації вищих гармонік і компенсації реактивної потужності для тягових підстанцій.

Теоретичні положення і комп'ютерні моделі, розроблені в дисертації, можуть використовуватись в навчальному процесі при підготовці фахівців локомотивного господарства та господарства електропостачання.

Практична цінність дисертації підтверджена актами використання результатів досліджень в регіональній філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця» та в Дніпровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях

Основні положення та результати дисертаційної роботи достатньо повно опубліковані в 15 наукових працях: 7 статей в наукових фахових виданнях України (з них 6 статей у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз); 8 матеріалів і тез доповідей науково-технічних конференцій. У цілому, рівень і кількість публікацій та апробації матеріалів дисертації на конференціях повністю відповідають вимогам МОН України.

Оцінка змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку джерел інформації та додатків.

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, поставлено мету дослідження, сформульовано задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, показано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, наведено відомості про апробацію результатів дисертації і список публікацій за темою дослідження.

У **першому розділі** автором проаналізовано публікації, в яких розглядаються питання енергетичної ефективності електровозів змінного струму з колекторними тяговими двигунами та шляхи її підвищення. Підвищення коефіцієнта потужності електровоза може бути досягнуто шляхом застосування вдосконалених схем тягових перетворювачів та алгоритмів подачі імпульсів на тиристори, застосування компенсаторів реактивної потужності та активних фільтрів, а також шляхом заміни діодів або тиристорів на повністю керовані напівпровідникові прилади (IGBT). Аналіз публікацій, присвячених режимам роботи активного випрямляча струму на електрорухомому складі змінного струму з колекторними тяговими двигунами, показав, що такий перетворювач розглядається в основному в якості активного фільтра, а режими

регулювання випрямленої напруги залишаються вивченими недостатньо. Оскільки швидкий масовий перехід електровозного парку «Укрзалізниці» та підприємств промислового залізничного транспорту на асинхронний тяговий привод не є можливим, виникає потреба в модернізації існуючого парку електровозів та тягових агрегатів змінного струму. Тому дослідження режимів роботи тягового електроприводу електровоза з активним випрямлячем струму можна вважати перспективним напрямком.

У **другому розділі** обґрунтовано вибір силової схеми і алгоритму управління активного тягового перетворювача для електровозів змінного струму (на базі електровоза 2ЕЛ5). Для цього були проведені теоретичні дослідження режимів роботи активного випрямляча струму, який є базовою ланкою активного тягового перетворювача, з навантаженням у вигляді двигуна постійного струму послідовного збудження. Розроблено уніфікований математичний опис алгоритмів широтно-імпульсної модуляції з синусоїдальним, трапецеїдальним та прямокутно-ступінчастим модуляційним сигналом. У програмному пакеті MATLAB виконано імітаційне моделювання кола з активним випрямлячем струму при частоті модуляції 900, 1200 і 1800 Гц. При моделюванні оцінювались такі показники, як випрямлена напруга, коефіцієнт потужності, коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривих напруги та струму живлення та ін. За результатами моделювання схему тягового перетворювача з двозонним широтно-імпульсним регулюванням випрямленої напруги (прямокутно-ступінчастий модуляційний сигнал, частота модуляції 1200 Гц) обрано базовою для реалізації в тяговому електроприводі електровоза змінного струму, як найбільш раціональний варіант.

У **третьому розділі** розроблено математичну модель системи «тягова мережа – електровоз» змінного струму напруги 25 кВ, 50 Гц з реалізацією в програмному пакеті *MATLAB / Simulink*. На основі схем заміщення тягової підстанції, контактної мережі, тягового трансформатора, перетворювача та тягового електродвигуна складено системи рівнянь, які характеризують електромагнітні процеси в системі. Робота тягового перетворювача та його системи управління описана логічними рівняннями. Модель електровоза розроблена з урахуванням застосування як тиристорного, так і активного тягового перетворювача на *IGBT*. Параметри моделі відповідають вантажному електровозу 2ЕЛ5, який знаходиться на фідерній зоні довжиною 10 км з одностороннім живленням від тягової підстанції. Проведені експерименти і порівняння їх результатів з даними, отриманими іншими дослідниками, показали, що модель дозволяє адекватно відображувати електромагнітні процеси в силовому колі електровоза змінного струму з урахуванням

нелінійності магнітної характеристики тягового двигуна електровоза та несинусоїдальності напруги і струму в тяговій мережі.

У **четвертому розділі** проведено імітаційне моделювання електромагнітних процесів в системі «тягова мережа – електровоз» за допомогою *MATLAB* моделі. Порівняння енергетичної ефективності електровоза з тиристорним і активним тяговим перетворювачем проводилось в усьому діапазоні навантаження за критеріями споживання реактивної потужності (величина споживаної реактивної потужності та коефіцієнт потужності), а також спотворення синусоїдальності кривих напруги та струму на струмоприймачі електровоза. Проведено гармонічний аналіз первинної напруги та струму електровоза при потужності, яка відповідає тривалому режиму його роботи. У результаті моделювання встановлено, що електровоз, обладнаний активним тяговим перетворювачем з широтно-імпульсною модуляцією, має коефіцієнт потужності 0,83...0,99 в усьому діапазоні навантажень, що вище, ніж при використанні тиристорного перетворювача. Використання широтно-імпульсної модуляції, на відміну від фазового регулювання, дозволяє наблизити форму струму, що споживає електровоз із мережі, до синусоїдальної. Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму електровоза з активним перетворювачем складав до 17%, що в 2...3 рази менше, ніж для тиристорного випрямляча. У подальшому доцільно було б дослідити роботу активного тягового перетворювача в режимі рекуперації та в аварійних режимах.

Висновки до кожного розділу та за результатами всієї роботи сформульовано достатньо чітко. Висновки відповідають змісту дисертаційної роботи і відображують її найбільш важливі результати.

У **додатках** представлено розрахунок економічної ефективності рішень, запропонованих в дисертації, список публікацій та відомості про апробацію результатів, а також наведено акти впровадження результатів дисертації.

Список використаних джерел є досить повним і охоплює сучасні вітчизняні та зарубіжні публікації (всього 124 найменування).

Зміст **автореферату** відображає основний зміст дисертації та в достатній мірі розкриває особистий внесок здобувача в наукові результати та практичну цінність роботи.

Зауваження щодо змісту дисертації

1. У анотації та вступі (с. 2, 6) використовується фраза «за сучасними світовими нормами **високим** вважається коефіцієнт потужності не нижче 0,95». На мій погляд, слід було говорити, що «...загальний коефіцієнт потужності

поїзда (включаючи електрообладнання електровоза і вагонів) повинен бути не нижче 0,95», як сказано у авторефераті.

2. За результатами комп'ютерного моделювання стверджувати про те, що «... встановлено закономірності розподілу вищих гармонік напруги та струму за амплітудою» без попередньо проведеного аналітичного дослідження передчасно, тому п. 5 наукової новизни слід скасувати.

3. При аналізі застосування гібридних фільтрів та активних перетворювачів для електрорухомого складу змінного струму в першому розділі не потрібно було приводити таку велику кількість варіантів реалізації. Потрібно приводити лише такі, в яких використовуються принципово нові рішення, і аналізувати їх дещо детальніше з приведенням схем, алгоритмів керування та ін.

4. Частота ШІМ повинна бути кратною з частотою мережі, щоб не виникала додаткова генерація перетворювачем низькочастотних гармонік напруги та струму. Тому сумнівним є можливість «не використовувати в системі управління АВС генератори модуляційного та опорного сигналів і таким чином знизити обчислювальну потужність цієї системи» (с. 72), адже параметри тривалості імпульсів ШІМ та пауз нестабільні через неможливість забезпечити стабільність частоти мережі.

5. На схемі рис. 2.24 показано чотири, а по тексту вказано, що «на секції електровоза встановлено два тягові перетворювачі $U1, U2$, які забезпечують регулювання випрямленої напруги тягових двигунів $M1-M4$ ».

6. Не зрозуміло, чому при моделюванні схем перетворювачів використовувались для діодів, тиристорів та *IGBT* не порогові значення падіння напруги в прямому напрямку, а максимальні.

7. Не зрозуміло також, чому при моделюванні схем перетворювачів ємність демпфуючого кола *IGBT* C_s прийнята рівною ∞ (табл. 3.4), адже при цьому силовий транзистор буде зашунтований резистором R_s .

ВИСНОВОК

Дисертація Краснова Олексія Олександровича на тему «Активний тяговий перетворювач для електровозів змінного струму з колекторними тяговими двигунами» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.22.09 – електротранспорт. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка розв'язує важливу науково-практичну задачу підвищення енергетичної ефективності електрорухомого складу змінного струму з колекторними тяговими двигунами шляхом вдосконалення тягових напівпровідникових перетворювачів. Дисертаційна робота відповідає вимогам

пп. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 (зі змінами), а здобувач Краснов Олексій Олександрович заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт.

Офіційний опонент:

доцент кафедри електроенергетики,
електротехніки та електромеханіки

Українського державного

університету залізничного транспорту,

кандидат технічних наук, доцент



Особистий підпис

засвідкую 10.11 2020 р.

Завідуючий канцелярією
УкрДУЗТ

Олександр СЕМЕНЕНКО

Олександр Семенов
Олександр Овховський