

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

КРАСНОВ ОЛЕКСІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 629.423.1:621.314.58

**АКТИВНИЙ ТЯГОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ
ДЛЯ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ЗМІННОГО СТРУМУ З КОЛЕКТОРНИМИ
ТЯГОВИМИ ДВИГУНАМИ**

Спеціальність 05.22.09 — електротранспорт

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків — 2020

Дисертація є рукописом.

Робота виконана у АТ «Українська залізниця», філія «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту», Харківське відділення, м. Харків.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Панасенко Микола Васильович,
Державний науково-дослідний центр
залізничного транспорту України,
Міністерство інфраструктури України,
головний науковий співробітник.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Хворост Микола Васильович,
Харківський національний університет міського
господарства імені О. М. Бекетова,
директор центру заочного навчання;

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

Захист відбудеться «25» листопада 2020 р. о 12:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.15 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут»: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий «23» жовтня 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Дмитро ЯКУНІН

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Залізничний транспорт є провідною галуззю економіки України і забезпечує потреби у пасажирських та вантажних перевезеннях у внутрішньому та міжнародному сполученні. На електрифікованих дільницях, які складають 47,3 % загальної експлуатаційної довжини залізниць України, виконується 91,2 % загального вантажообороту. За даними 2015 р., загальне річне споживання електроенергії на тягу поїздів становить 4,04 млрд. кВт·год. Тому раціональне використання енергоресурсів в системах електричної тяги (СЕТ) має надзвичайно важливе значення. Разом з тим, енергетична ефективність традиційних для вітчизняних залізниць СЕТ є порівняно низькою. Так, для СЕТ змінного струму напруги 25 кВ, 50 Гц коефіцієнт корисної дії системи «тягова підстанція — тягова мережа — електрорухомий склад» оцінюється на рівні 0,7. При цьому основними складовими непродуктивних втрат енергії є реактивна потужність та втрати від вищих гармонік напруги та струму.

Для електровозів з колекторними тяговими двигунами (ТЕД) і діодними випрямлячами (ВЛ80К, ВЛ80Т, ВЛ80С) коефіцієнт потужності становить 0,65...0,85, а з тиристорними перетворювачами (2ЭС5К, 2ЕЛ5) — 0,3...0,84 в режимі тяги і 0,3...0,7 в режимі рекуперації. Такі показники не відповідають сучасним світовим нормам, згідно з якими коефіцієнт потужності повинен бути на рівні 0,9...0,95. Напруга на струмоприймачі та струм електровоза є несинусоїдальними.

Одним з напрямків підвищення енергетичної ефективності електроприводу є застосування активних випрямлячів струму. Слід відмітити, що режими роботи таких перетворювачів як регуляторів постійної напруги, а також їх енергетичні характеристики при різних варіантах силових схем і алгоритмів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) залишаються дослідженими недостатньо. Таким чином, підвищення енергоефективності електрорухомого складу (ЕРС) змінного струму з колекторними тяговими двигунами шляхом впровадження активних випрямлячів струму є актуальною науково-практичною задачею, що і визначило напрям дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Робота виконана у Харківському відділенні філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» АТ «Укрзалізниця» 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).

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення енергоефективності електрорухомого складу змінного струму з колекторними тяговими двигунами шляхом вдосконалення тягових напівпровідникових перетворювачів.

Для досягнення мети в дисертації поставлено такі завдання:

1. Провести аналіз існуючих схемотехнічних рішень, направлених на підвищення енергоефективності ЕРС змінного струму з колекторними тяговими двигунами, виявити можливі шляхи вдосконалення цих рішень.

2. Розробити математичну модель системи «трансформатор — однофазний активний випрямляч струму — двигун постійного струму» з урахуванням взаємної

індуктивності між обмотками трансформатора і магнітної характеристики двигуна.

3. Розробити уніфікований математичний опис алгоритмів однополярної широтно-імпульсної модуляції для випадку синусоїдального, трапецеїдального та прямокутно-ступінчатого модуляційних сигналів.

4. Виконати комп'ютерне моделювання електромагнітних процесів в однофазному активному випрямлячі струму з ШІМ при частоті модуляції 900 Гц, 1200 Гц і 1800 Гц. Оцінити характер зміни коефіцієнта потужності а також вплив частоти модуляції і коефіцієнта модуляції на спотворення синусоїдальності напруги та струму в мережі живлення.

5. Розробити силову схему активного тягового перетворювача з двозонним регулюванням випрямленої напруги для електровоза змінного струму з колекторними тяговими двигунами (на базі електровоза 2ЕЛ5) та алгоритм управління транзисторами.

6. Розробити математичну модель системи «тягова мережа — електровоз» для режиму тяги (з реалізацією у вигляді імітаційної моделі) з урахуванням застосування на електровозі тиристорного тягового перетворювача з зонно-фазовим регулюванням та активного тягового перетворювача з ШІМ.

7. Провести комп'ютерне моделювання і дослідження електромагнітних процесів в системі «тягова мережа — електровоз», порівняти енергетичну ефективність тиристорного тягового перетворювача і активного тягового перетворювача з ШІМ.

Об'єкт дослідження — електромагнітні процеси в силових електричних колах електрорухомого складу змінного струму з колекторними тяговими двигунами.

Предмет дослідження — однофазний активний тяговий перетворювач з широтно-імпульсною модуляцією і двозонним регулюванням випрямленої напруги.

Методи дослідження. Положення теорії електричної тяги, силовій електроніки та перетворювальної техніки для розробки силовій схеми активного тягового перетворювача; апарат алгебри логіки для розробки математичного опису алгоритмів ШІМ; теорія лінійних та нелінійних електричних кіл для розробки математичної моделі системи електричної тяги; імітаційне комп'ютерне моделювання для дослідження електромагнітних процесів та показників якості електроенергії; метод спектрального аналізу для оцінки гармонічного складу напруги та струму електровоза.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Отримали подальшого розвитку теоретичні дослідження режимів роботи тягових перетворювачів на повністю керованих вентилях в електроприводі електровозів змінного струму з колекторними тяговими двигунами, що дозволило отримати 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-ступінчатим модуляційним сигналом, а також фазового регулювання (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 електровоза.

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

5. Досліджено гармонічний склад напруги на струмоприймачі та струму електровоза з двозонним активним тяговим перетворювачем при широтно-імпульсній модуляції, що дозволило встановити закономірності розподілу вищих гармонік напруги та струму за амплітудою та визначити напрямки подальших досліджень активних тягових перетворювачів.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дисертаційної роботи використовуються для розробки тягових напівпровідникових перетворювачів при випуску нових та модернізації існуючих електровозів змінного струму, а також при виборі схемних і конструктивних рішень з компенсації реактивної потужності та підвищення якості електроенергії на електрорухомому складі та в контактній мережі. Основні результати дисертації впроваджено в навчальний процес при підготовці фахівців локомотивного господарства та господарства електропостачання залізниць.

Практичну цінність дисертації підтверджено актом про використання результатів роботи в навчальному процесі кафедри інтелектуальних систем електропостачання Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна під час вивчення дисциплін «Перетворювальна техніка», «Системи силової електроніки» та «Електромагнітна сумісність електроенергетичних об'єктів» при підготовці бакалаврів і магістрів за освітньою програмою «Електротехнічні системи електроспоживання» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Результати досліджень передано для використання до регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця», що підтверджено відповідним актом.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати, винесені на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: аналіз енергетичної ефективності сучасних систем тягового електроприводу електровозів змінного струму з колекторними тяговими двигунами, аналітичне дослідження і математичне моделювання електромагнітних процесів в однофазному активному випрямлячі струму при різних алгоритмах ширино-імпульсної модуляції і навантаженні у вигляді двигуна постійного струму, схема і алгоритм управління активного тягового перетворювача з двозонним регулюванням напруги, комп'ютерні моделі електровозів змінного струму з колекторними тяговими двигунами, результати експериментальних досліджень електровоза змінного струму з активним тяговим перетворювачем.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на науково-технічних

і науково-практичних конференціях: «Безопасность и электромагнитная совместимость на железнодорожном транспорте» (Чинадієво, 2012 р.); «Электрификация транспорта “ТРАНСЭЛЕКТРО”» (Місхор, 2012 р.; Одеса, Дніпропетровськ, 2014 р.; Одеса, 2015 р.; Дніпро, 2017 р.); «Энергосбережение на железнодорожном транспорте и в промышленности» (Воловець, 2012 р., 2014 р.); «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології» (Київ, 2013 р.).

Публікації. Основні положення дисертації викладено в 15 публікаціях, у тому числі, в 7 статтях у фахових наукових виданнях, у 8 матеріалах і тезах науково-практичних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку джерел посилання і додатків. Загальний обсяг дисертації — 176 сторінок; з них 57 рисунків по тексту; 14 рисунків на 12 сторінках; 20 таблиць по тексту; 124 найменування джерел на 15 сторінках; 3 додатки на 14 сторінках.

Автор висловлює глибоку подяку доктору технічних наук, професору Валерію Григоровичу Ягупу та кандидату технічних наук, старшому науковому співробітнику Володимирі Вячеславовичу Божку за допомогу і консультації, надані при написанні дисертації.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і 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, подано відомості про апробацію результатів дисертації і публікації за темою дослідження.

У **першому розділі** дисертації проведено аналіз публікацій, присвячених ефективності сучасних систем тягового електроприводу електровозів змінного струму з колекторними тяговими двигунами. На ЕРС з діодними випрямлячами та тиристорними випрямно-інверторними перетворювачами (ВІП) зниження коефіцієнта потужності та несинусоїдальна форма напруги і струму зумовлені процесами фазового регулювання та комутації вентилів, а також перехідними процесами в системі «контактна мережа — електровоз». Серед відомих технічних рішень, які забезпечують підвищення енергетичних характеристик електровозів, можна виділити: 1) удосконалені схеми тягових перетворювачів та алгоритми управління; 2) пасивні та активні компенсатори реактивної потужності на ЕРС; 3) перетворювачі на повністю керованих напівпровідникових приладах (активні перетворювачі). Останній напрямок є перспективним, оскільки при широтно-імпульсній модуляції такі перетворювачі забезпечують високі енергетичні показники електровоза без суттєвого ускладнення його силової схеми та системи управління.

У **другому розділі** проведено дослідження та вибір силової схеми активного випрямляча струму та алгоритму його управління для подальшої реалізації в тяговому електроприводі електровоза змінного струму з колекторними ТЕД.

Оскільки двигун постійного струму з послідовно ввімкненим згладжувальним реактором за своїми властивостями є джерелом постійного струму, його живлення можна забезпечувати від однофазного активного випрямляча струму (АВС). Такий перетворювач (рис. 1) побудований на повністю керованих ключах $K1-K4$ з односторонньою провідністю струму і може працювати у випрямному та інверторному режимах, а фазовий зсув першої гармоніки струму мережі відносно напруги живлення може бути як відстаючим, так і випереджаючим.

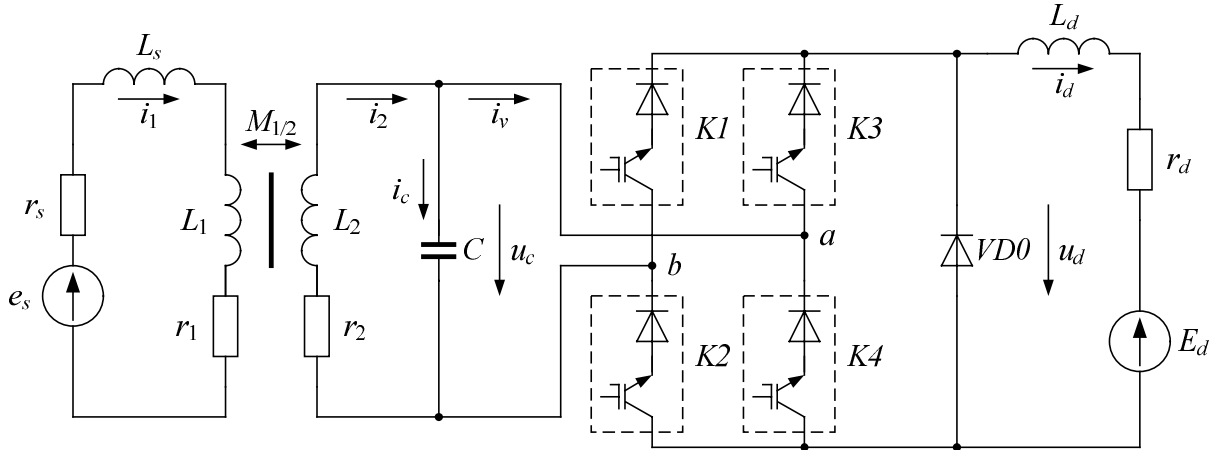


Рисунок 1 — Розрахункова схема активного випрямляча струму

Роботу АВС в режимі випрямлення можна описати системами рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} e_s = \sqrt{2}E_s \cdot \sin \omega t; \\ \frac{di_1}{dt} = \frac{L_2}{L_2(L_s + L_1) - M_{1/2}^2} \left[e_s - (r_s + r_1)i_1 + \frac{M_{1/2}r_2}{L_2}i_2 + \frac{M_{1/2}}{L_2}u_c \right]; \\ \frac{di_2}{dt} = \frac{1}{L_2} \left(-M_{1/2} \frac{di_1}{dt} - r_2i_2 - u_c \right); \\ \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} (S^* u_c - r_d i_d - E_d); \\ \frac{du_c}{dt} = \frac{1}{C} i_c; \\ i_2 - i_c - S^* i_d = 0. \end{array} \right. \quad (1)$$

$$S^* = \begin{cases} (s_2^* = 1) \wedge (s_3^* = 1) \rightarrow 1; \\ (s_1^* = 1) \wedge (s_4^* = 1) \rightarrow -1; \\ (s_1^* = 0) \wedge (s_2^* = 0) \wedge (s_3^* = 0) \wedge (s_4^* = 0) \rightarrow 0, \end{cases} \quad (2)$$

де e_s, L_s, r_s — відповідно, еквівалентні е. р. с., індуктивність і активний опір мережі змінного струму; E_d, L_d, r_d — еквівалентні е. р. с., індуктивність і активний опір кола випрямленого струму; i_d — випрямлений струм, S^* — комутаційна функція одиничної амплітуди; s_{1-4}^* — комутаційні функції ключів АВС.

Середнє значення випрямленої напруги у випадку її регулювання методом ШІМ визначається за формулою

$$U_d = \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^n \left(\int_{\alpha_i}^{\beta_i} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t \, dt \right) = \frac{\sqrt{2} U_2}{\pi} \sum_{i=1}^n (\cos \alpha_i - \cos \beta_i), \quad (3)$$

де U_2 — діюче значення напруги вторинної обмотки трансформатора; α_i, β_i — відповідно, моменти (кути) переходу транзисторів у відкритий і закритий стан; n — кількість імпульсів за розрахунковий період.

Якщо розглянути спрощену еквівалентну схему кола з АВС (рис. 2), де випрямляч представлений джерелом струму I_v , амплітуду I_{sm} і фазу φ 1-ї гармоніки струму мережі $i_1 = i_s$ та кут θ можна визначити за формулами:

$$I_{sm} = \sqrt{\left[\left(E_{sm} + \frac{I_{vm} \sin \theta}{\omega C} \right)^2 + \left(\frac{I_{vm} \cos \theta}{\omega C} \right)^2 \right] / \left[r_s^2 + \left(\omega L_s - \frac{1}{\omega C} \right)^2 \right]}; \quad (4)$$

$$\varphi = \arctg \frac{-I_{vm} \cos \theta}{\omega C E_{sm} + I_{vm} \sin \theta} - \arctg \frac{\omega L_s - 1 / \omega C}{r_s}; \quad (5)$$

$$\theta = \arccos \frac{(\omega C E_s)^2 + (\omega^2 L_s C I_s)^2 + (\omega r_s C I_s)^2 - I_s^2 - I_v^2}{2 I_s I_v}. \quad (6)$$

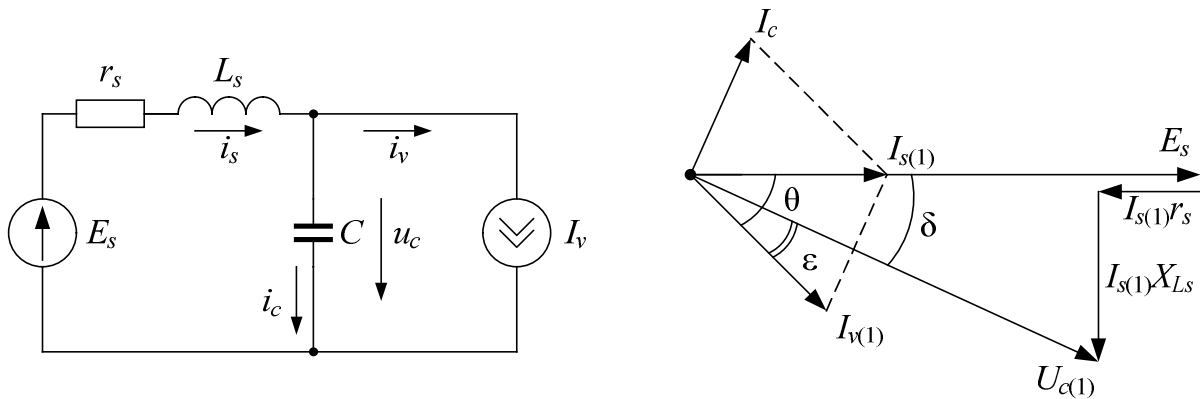


Рисунок 2 — Спрощена еквівалентна схема кола з АВС та векторна діаграма кола при $\varphi = 0$

У АВС шляхом завдання на формування випрямленої напруги U_d^* або вхідного змінного струму I_v^* можна регулювати кут θ . При цьому можна задати такий фазовий зсув θ , при якому $\varphi = 0$. Отримані аналітичні співвідношення дозволяють проводити дослідження електромагнітних процесів та виконувати розрахунок і вибір основних параметрів при проектуванні АВС.

Для вибору найбільш прийняттого алгоритму широтно-імпульсної модуляції для АВС розглянуто три види однополярної ШІМ: 1) синусоїдальна (СинШІМ); 2) трапецеїдальна (ТрШІМ); 3) ШІМ з прямокутно-ступінчастим модуляційним сигналом (ПСШІМ). На основі математичного апарату алгебри логіки і методу комутаційних функцій розроблено уніфікований опис цих алгоритмів.

Наприклад, однополярну ПСШІМ (рис. 3) можна описати за допомогою рівнянь:

$$n = f_M / (2f); \Delta\theta = 180^\circ/n; \theta_i = i \cdot \Delta\theta; \quad (7)$$

$$\tau_1 = \begin{cases} (0 \leq \theta \leq \pi/2) \rightarrow \mu \cdot \sin \theta; \\ (\pi/2 < \theta \leq \pi) \rightarrow \mu \cdot \sin(\theta - \Delta\theta); \end{cases} \quad \tau_0 = 1 - \tau_1; \quad (8)$$

$$u_{\text{оп}}(t) = \frac{U_{\text{оп}}}{\pi} \left| \arcsin \left[\sin \left(\frac{\omega_M t}{2} + \frac{\pi}{2} \right) \right] \right|; \quad u_M(\theta) = \begin{cases} (0 \leq \theta \leq \theta_1) \rightarrow \tau_1(\theta_1); \\ (\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2) \rightarrow \tau_1(\theta_2); \\ \dots \\ (\theta_{i-1} \leq \theta \leq \theta_i) \rightarrow \tau_1(\theta_i); \end{cases} \quad (9)$$

$$s_2^* = s_3^* = \begin{cases} (u > 0) \wedge (u_M - u_{\text{оп}} > 0) \rightarrow 1; \\ (u > 0) \wedge (u_M - u_{\text{оп}} \leq 0) \rightarrow 0; \end{cases} \quad s_1^* = s_4^* = \begin{cases} (u < 0) \wedge (u_M - u_{\text{оп}} > 0) \rightarrow 1; \\ (u < 0) \wedge (u_M - u_{\text{оп}} \leq 0) \rightarrow 0. \end{cases} \quad (10)$$

де $\omega = 2\pi f$ — кутова частота мережі, рад/с ($f = 50$ Гц); $\omega_M = 2\pi f_M$ — кутова частота модуляції, рад/с; $i = 1 \dots n$ — номер сходинки; n — кількість сходинок; $\Delta\theta$ — дискретний крок зміни фазового кута; θ_i — фазовий кут i -ї сходинки; μ — коефіцієнт модуляції по амплітуді; $U_M, U_{\text{оп}}$ — амплітуди модуляційного та опорного сигналів, В; τ_1, τ_0 — відповідно, відносна тривалість імпульсу та паузи на періоді ШІМ; u — синхронізований з напругою мережі u_1 синусоїдальний сигнал, який використовується в системі управління для контролю знаку напруги.

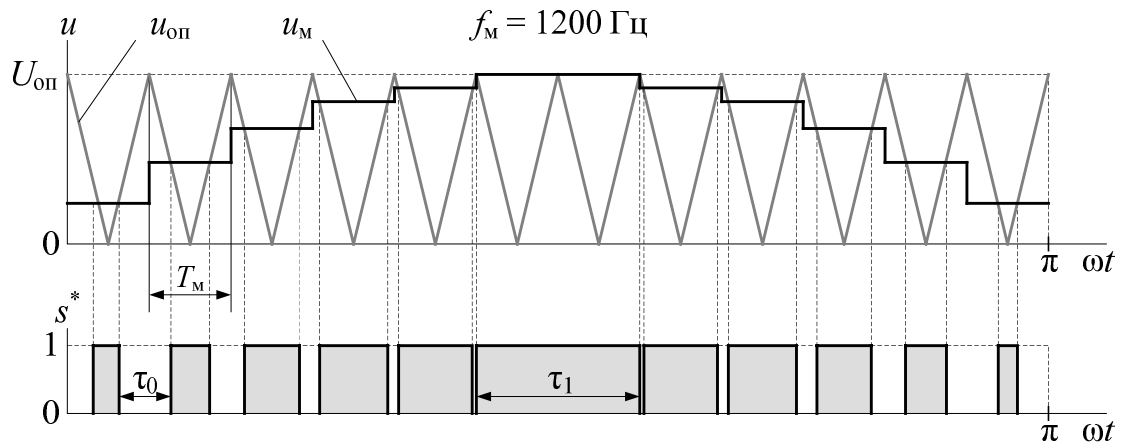


Рисунок 3 — Діаграми формування імпульсів ПСШІМ

Дослідження електромагнітних процесів і порівняння енергетичних характеристик однофазного АВС при трьох алгоритмах ШІМ, частоті модуляції 900 Гц, 1200 Гц і 1800 Гц та коефіцієнті модуляції $\mu = 0,2 \dots 1$ було проведено шляхом імітаційного моделювання. У якості критеріїв ефективності АВС обрано такі показники: відносне значення випрямленої напруги U_d/U_{d0} (U_{d0} — номінальна середня випрямлена напруга в режимі некерованого випрямляча); коефіцієнт потужності на затискачах первинної обмотки трансформатора (K_M); коефіцієнти спотворення синусоїдальності кривих напруги u_1 ($K_U, \%$); та струму i_1 ($K_I, \%$).

Ємність конденсатора прийнято $C = 360$ мкФ при частоті 900 Гц і 1200 Гц,

$C = 300$ мкФ при частоті 1800 Гц. Результати порівняння енергетичних характеристик АВС представлено в табл. 1. У цій таблиці наведено середні та максимальні коефіцієнти потужності ($K_{M\text{ ср}}$, $K_{M\text{ max}}$), максимальні значення коефіцієнтів K_U та K_I у всьому діапазоні регулювання, отримані при моделюванні.

Таблиця 1 — Порівняння енергетичних характеристик АВС

Параметри	СинШІМ			ТрШІМ			ПСШІМ		
	900	1200	1800	900	1200	1800	900	1200	1800
f_M , Гц	900	1200	1800	900	1200	1800	900	1200	1800
U_d/U_{d0}	0,78	0,78	0,77	0,81	0,82	0,81	0,84	0,83	0,81
$K_{M\text{ ср}}$	0,883	0,888	0,92	0,884	0,890	0,92	0,879	0,884	0,932
$K_{M\text{ max}}$	0,991	0,994	0,994	0,987	0,989	0,992	0,991	0,993	0,996
K_U , %	1,46	1,00	0,82	1,65	1,26	1,05	1,74	1,28	0,93
K_I , %	19,42	13,56	12,88	21,80	16,80	13,77	23,39	14,05	9,12

За сукупністю обраних критеріїв порівняння найбільш прийнятним варіантом алгоритму є прямокутно-ступінчата ШІМ з частотою модуляції 1200 Гц. Забезпечення високих показників якості електроенергії в широкому діапазоні навантажень може бути досягнуто в багатозонній схемі АВС, при цьому регулювання випрямленої напруги з $\mu \leq 0,5$ доцільно використовувати лише в короткочасних режимах роботи.

Запропонована на базі АВС схема активного тягового перетворювача (АТПр) з двозонним регулюванням випрямленої напруги представлена на рис. 4. Додатній напрямок е. р. с. секцій вторинної обмотки трансформатора E_{21} , E_{22} і е. р. с. якоря тягового двигуна E_d показано суцільною стрілкою, від'ємний — штриховою. У табл. 2 наведено алгоритм подачі імпульсів на транзистори $VT1$ – $VT7$. У режимі тяги транзистор $VT7$ постійно знаходиться у відкритому стані (працює як діод), а в режимі рекуперації перемикається з частотою ШІМ, забезпечуючи шунтування кола випрямленого струму на інтервалах паузи транзисторів $VT1$ – $VT6$.

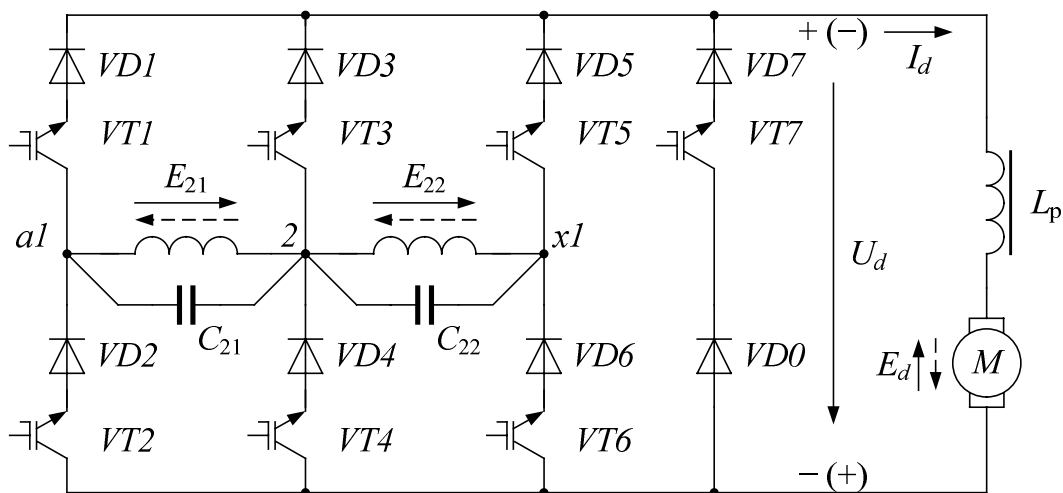


Рисунок 4 — Схема АТПр з двозонним регулюванням випрямленої напруги

Отже, проведені дослідження показали, що активний випрямляч струму при широтно-імпульсній модуляції забезпечує високий коефіцієнт потужності та низький рівень несинусоїдальності напруги та струму, тому такий перетворювач доцільно використовувати для живлення колекторних тягових двигунів.

Таблиця 2 — Алгоритм управління АТПр

Режим	Зона регулювання	U_2 , В	Напруга живлення	Номери плечей АТПр
Тяга	1	630	$+U_{22}$	$VT4, VT5, VT7$
			$-U_{22}$	$VT3, VT6, VT7$
	2	1260	$+(U_{21} + U_{22})$	$VT2, VT5, VT7$
			$-(U_{21} + U_{22})$	$VT1, VT6, VT7$
Рекуперація	2	1260	$+(U_{21} + U_{22})$	$VT1, VT6, VT7$
			$-(U_{21} + U_{22})$	$VT2, VT5, VT7$
	1	630	$+U_{22}$	$VT3, VT6, VT7$
			$-U_{22}$	$VT4, VT5, VT7$

У третьому розділі розроблено математичну модель системи електричної тяги змінного струму для двох варіантів тягового перетворювача — тиристорного ВП та транзисторного АТПр. Схема заміщення СЕТ у випадку електровоза з АТПр представлена на рис. 5.

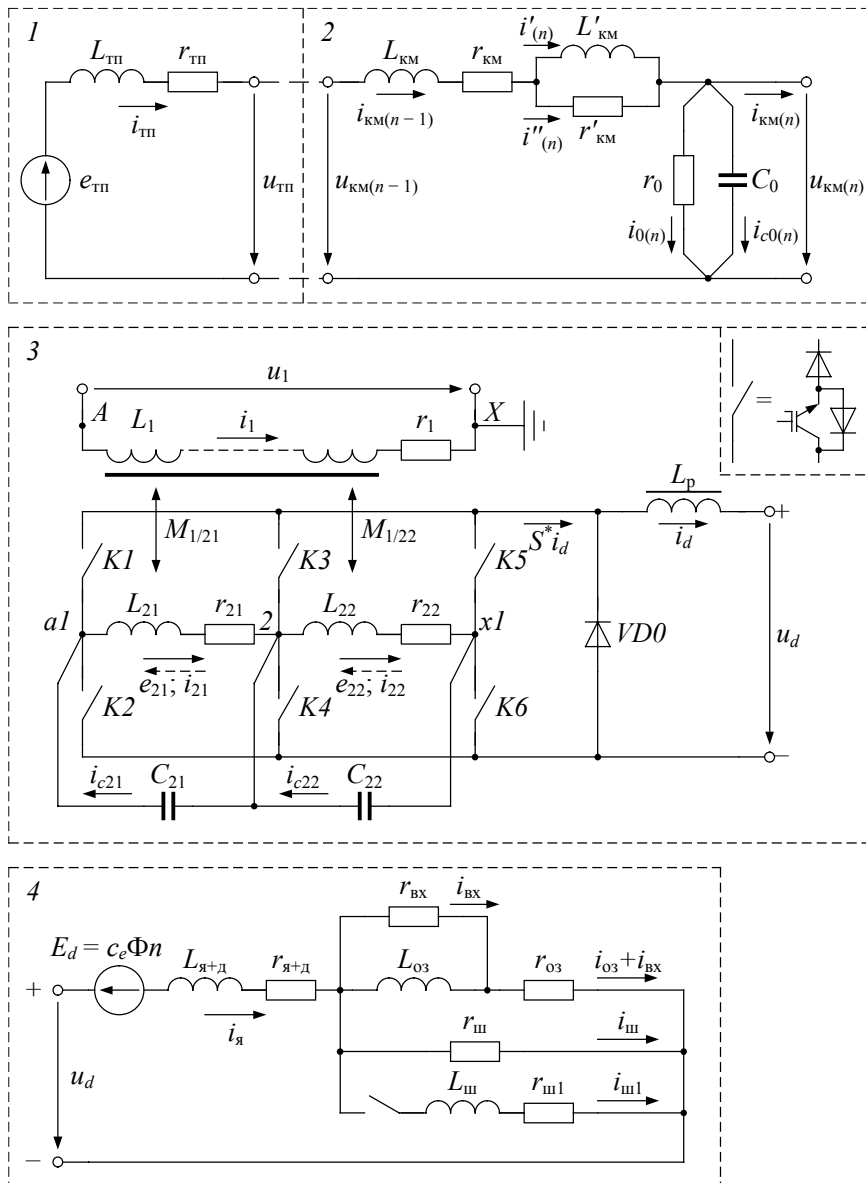


Рисунок 5 — Схема заміщення СЕТ, електровоз з АТПр:

1 — тягова підстанція; 2 — тягова мережа; 3 — тяговий трансформатор, активний тяговий перетворювач; 4 — тяговий двигун

У розробленій моделі електромагнітні процеси описуються за допомогою диференціальних рівнянь за законами Кірхгофа, а робота системи управління перетворювачем — логічними рівняннями з урахуванням положень, розроблених в другому розділі дисертації. Частота обертання ТЕД в моделі визначається шляхом інтегрування диференціального рівняння руху поїзда.

Модель тягової мережі представлена у вигляді каскадного з'єднання чотириполюсників, кожний з яких є Т-подібною схемою заміщення ділянки тягової мережі довжиною 0,4 км. Модель тягового трансформатора враховує взаємну індуктивність між первинною обмоткою та секціями вторинної обмотки. Модель тягового двигуна постійного струму розроблена з урахуванням його нелінійної магнітної характеристики і спрощено враховує ефект вихрових струмів.

З метою формалізації опису алгоритму управління тяговим перетворювачем введено такі логічні величини:

1. Змінні вибору зони регулювання z_j , де j — номер зони. Якщо відповідна змінна $z_j = 1$, електровоз працює на j -й зоні регулювання.

2. Функції формування імпульсів s^* . При $s^* = 1$ формується прямокутний імпульс тривалістю $t_{\text{и}}$ із затримкою відповідно до алгоритму.

3. Функції розподілу імпульсів s_k^* , де k — номер тиристора або транзистора. При $s_k^* = 1$ на ключ з номером k подається імпульс управління.

Для опису алгоритму роботи ВП і АТПр складено логічні рівняння. Так, для АТПр функції формування імпульсів мають вигляд:

$$s_{01}^* = \begin{cases} (u > 0) \wedge (u_{\text{м}} - u_{\text{оп}} > 0) \rightarrow 1; \\ (u > 0) \wedge (u_{\text{м}} - u_{\text{оп}} \leq 0) \rightarrow 0; \end{cases} \quad s_{02}^* = \begin{cases} (u < 0) \wedge (u_{\text{м}} - u_{\text{оп}} > 0) \rightarrow 1; \\ (u < 0) \wedge (u_{\text{м}} - u_{\text{оп}} \leq 0) \rightarrow 0. \end{cases} \quad (11)$$

При $s_{01}^* = 1$ система управління формує імпульс в додатній півперіод напруги живлення, при $s_{02}^* = 1$ — у від'ємний півперіод.

Логічні функції розподілу імпульсів s_k^* по плечам АТПр:

$$\begin{cases} s_1^* = (z_2 = 1) \wedge (s_{02}^* = 1) \rightarrow 1; \\ s_2^* = (z_2 = 1) \wedge (s_{01}^* = 1) \rightarrow 1; \\ s_3^* = (z_1 = 1) \wedge (s_{02}^* = 1) \rightarrow 1; \\ s_4^* = (z_1 = 1) \wedge (s_{01}^* = 1) \rightarrow 1; \\ s_5^* = (z_1 = 1) \vee (z_2 = 1) \wedge (s_{01}^* = 1) \rightarrow 1; \\ s_6^* = (z_1 = 1) \vee (z_2 = 1) \wedge (s_{02}^* = 1) \rightarrow 1. \end{cases} \quad (12)$$

Для аналізу і оцінки енергетичної ефективності електровоза в різних режимах роботи обрано такі показники: активна P , реактивна Q та повна потужність S , коефіцієнт потужності $K_{\text{м}}$, коефіцієнт спотворення форми кривої струму v_L , коефіцієнти спотворення синусоїдальності кривих напруги K_U та струму K_I , а також коефіцієнти гармонічних складових $K_{U(k)}$, $K_{I(k)}$, відповідно, напруги та струму.

Ці показники оцінювались на затискачах первинної обмотки тягового трансформатора. При несинусоїдальних струмах коефіцієнт потужності і коефіцієнт спотворення форми кривої струму:

$$K_M = \frac{P}{UI} = \left(\int_0^T u \cdot i \cdot dt \right) / \sqrt{\left(\int_0^T u^2 dt \right) \left(\int_0^T i^2 dt \right)}; v_I = \frac{I_{(1)}}{I}, \quad (13)$$

де U, I — діючі значення напруги та струму; u, i — миттєві значення напруги та струму; $I_{(1)}$ — діюче значення першої гармоніки струму; $T = 2\pi$.

Розроблена математична модель реалізована у вигляді імітаційної моделі. Прийнята така конфігурація СЕТ: тягова підстанція з трансформатором потужністю 40 МВ·А отримує живлення по ЛЕП 110 кВ довжиною 13,5 км з проводів АС-150; контактна мережа ПБСМ1-95+2МФ-100, рейки Р-75, одна колія, одностороннє живлення контактної мережі. Параметри силової схеми локомотива відповідають 8-вісному електровозу 2ЕЛ5 з тяговими двигунами ДТК-820. Для електровоза з АТПр прийнято схему підключення до перетворювача одного тягового двигуна (замість двох при стандартній схемі), що дозволяє реалізувати індивідуальне регулювання сили тяги.

Для перевірки адекватності моделі було проведено серію віртуальних експериментів, які показали відповідність результатів комп'ютерного моделювання теоретичним уявленням про електромагнітні процеси в силових колах електровозів і експериментальним даним, представленим у відомих роботах. Таким чином, розроблена модель дозволяє досліджувати електромагнітні процеси в СЕТ змінного струму з урахуванням несинусоїдальності напруги в контактній мережі і нелінійності кола випрямленого струму електровоза.

У **четвертому розділі** проведено моделювання електромагнітних процесів в системі «тягова мережа — електровоз» за допомогою імітаційної моделі, що дозволило порівняти енергетичну ефективність АТПр і тиристорного ВП, а також визначити напрямки подальших досліджень АТПр електровозів змінного струму.

Моделювання електровоза проведено при таких вихідних даних: напруга на шинах тягової підстанції $E_{ТП} = 25$ кВ, відстань від тягової підстанції до електровоза $L_{км} = 10$ км. Працює 8 тягових двигунів (дві секції) в режимі тяги. Маса поїзда 2500 т. Швидкість руху змінювалась в діапазоні 3...52 км/год. Кути відкривання тиристорів ВП $\alpha_0 = 9^\circ$, $\alpha_p = 13...165^\circ$, коефіцієнт модуляції АТПр $\mu = 0,3...1,1$ (1 зона), $\mu = 0,55...1,15$ (2 зона). Віртуальні експерименти проводились без урахування автоматичного регулювання струму тягового двигуна. Результати моделювання електровоза з АТПр представлені на рис. 6 і в табл. 3.

На рис. 6 показано осцилограми напруги та струму електровоза з АТПр на 2 зоні при $\mu = 0,55$ і $\mu = 1,0$. Крива випрямленої напруги u_d представляє собою послідовність імпульсів додатної полярності з частотою модуляції f_m . Випрямлений струм i_d є згладженим, і має пульсації з подвійною частотою мережі (100 Гц). Вхідний струм АТПр i_v має прямокутно-імпульсну форму з такою ж кількістю пульсацій, як і у випрямленої напруги. Напруга вторинної обмотки трансформатора u_2 має пульсації, амплітуда яких обмежується ємністю конденсатора вхідного

фільтра. Напруга u_1 на затискачах первинної обмотки тягового трансформатора практично синусоїдальна, а струм i_1 є несинусоїдальним і має близький до нуля фазовий зсув відносно напруги u_1 . Більші спотворення синусоїдальності кривої струму мережі з активним випрямлячем струму характерні для режимів з $\mu \approx 0,5 \dots 0,6$. Принципових відмінностей в характері електромагнітних процесів на 1 зоні і на 2 зоні регулювання під час експериментів не відмічено.

Таблиця 3 — Результати моделювання електровоза з АТПр

Найменування параметрів	Познач., од. вим.	1 зона		2 зона	
		$\mu = 0,5$	$\mu = 1,0$	$\mu = 0,55$	$\mu = 1,0$
Початкова швидкість руху	v_0 , км/год	9	24	25	50
Напруга на струмоприймачі	U_1 , кВ	25,09	24,95	24,98	24,61
Струм первинної обмотки тягового трансформатора	I_1 , А	50,7	73,9	105,3	158,6
Коефіцієнт потужності електровоза	K_M	0,918	0,967	0,975	0,991
Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги u_1	K_U , %	5,14	2,94	10,75	6,24
Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму i_1	K_I , %	12,8	11,77	10,62	9,93
Коефіцієнт спотворення струму i_1	v_I	0,9919	0,9931	0,9944	0,9951
Випрямлена напруга	U_d , В	234	466	514	922
Струм тягового двигуна	I_d , А	1070	814	949	798
Сила тяги електровоза	F_k , кН	602	419	514	409

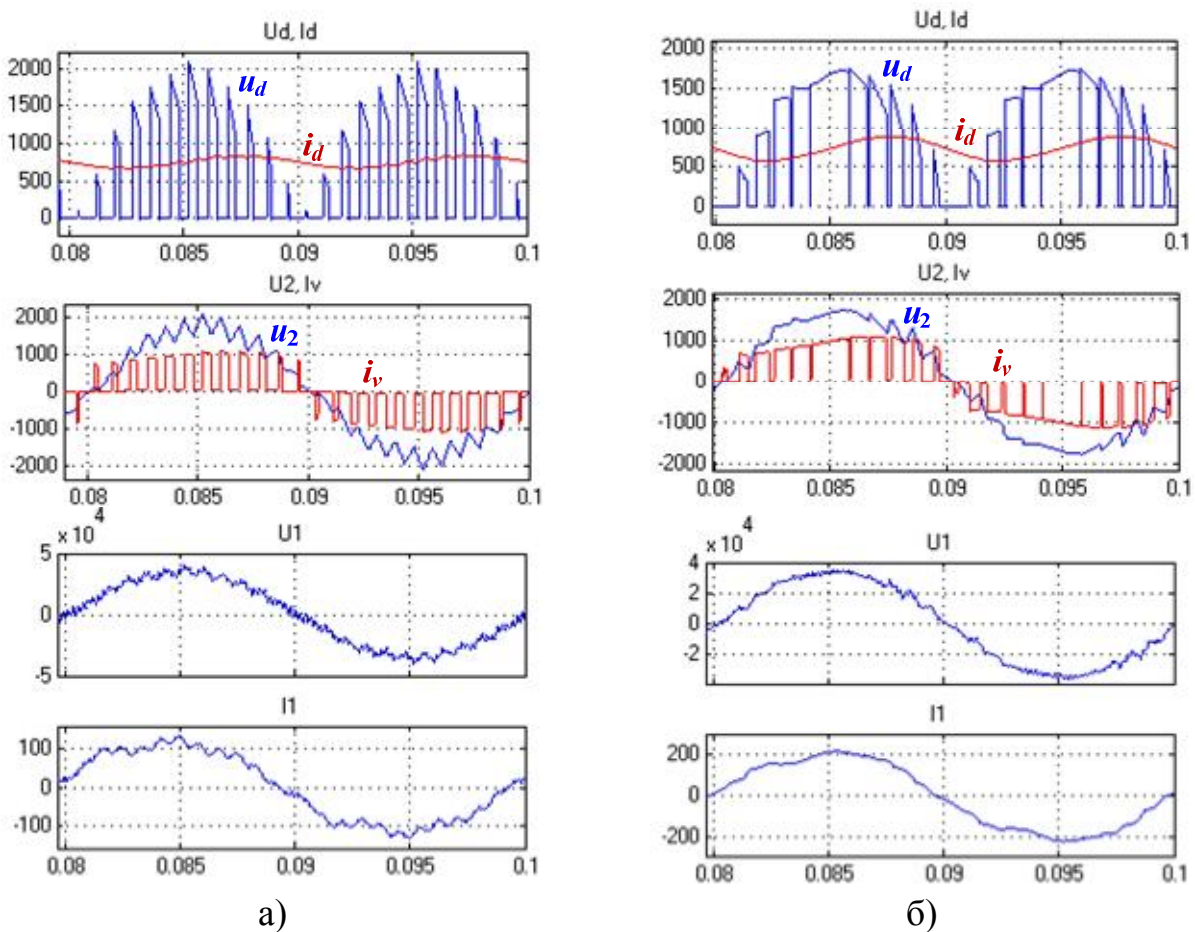


Рисунок 6 — Напруга та струм електровоза з АТПр, 2 зона: а) $\mu = 0,55$; б) $\mu = 1,0$

Реактивна потужність електровоза з АТПр (рис. 7) в усьому діапазоні навантаження складає близько 0,5...0,7 Мвар. При цьому реактивна потужність електровоза з ВІП змінюється за нелінійною ступінчатою залежністю в діапазоні 0,6...2,5 Мвар.

Графіки залежності коефіцієнта потужності електровоза від випрямленої напруги для ВІП і АТПр представлені на рис. 8. Коефіцієнт потужності електровоза з АТПр становить 0,839...0,967 (1 зона) і 0,975...0,991 (2 зона), а його значення більше 0,9 забезпечується при коефіцієнті модуляції $\mu \geq 0,5$.

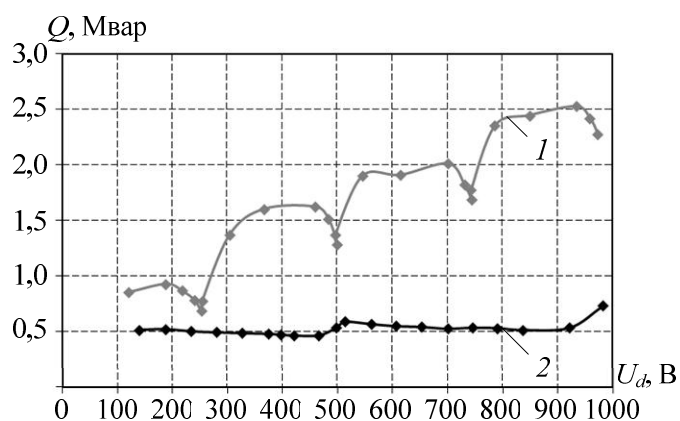


Рисунок 7 — Залежність реактивної потужності електровоза від випрямленої напруги: 1 — ВІП; 2 — АТПр

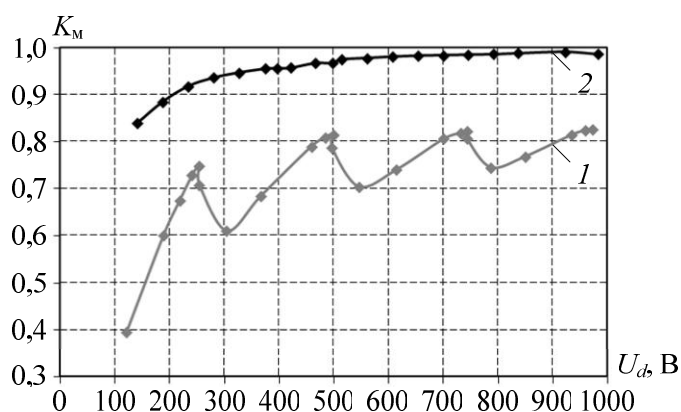


Рисунок 8 — Залежність коефіцієнта потужності електровоза від випрямленої напруги: 1 — ВІП; 2 — АТПр

Середній коефіцієнт потужності $K_{m\text{ ср}}$ у всьому діапазоні регулювання, а також збільшення або зменшення $\delta_{\text{км}}$ середнього коефіцієнта потужності електровоза з АТПр відносно базового значення (ВІП):

$$K_{m\text{ ср}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m K_{mj}; \delta_{\text{км}} = \frac{K_{m\text{ ср}}^{\text{АТПр}} - K_{m\text{ ср}}^{\text{ВІП}}}{K_{m\text{ ср}}^{\text{ВІП}}} \cdot 100\%, \quad (14)$$

де $j = 1 \dots m$ — номер дослідження; m — кількість вимірювань, $K_{m\text{ ср}}^{\text{ВІП}}$, $K_{m\text{ ср}}^{\text{АТПр}}$ — відповідно, середній коефіцієнт потужності електровоза з ВІП і АТПр у всьому діапазоні регулювання.

Результати розрахунку за формулою (14): $K_{m\text{ ср}}^{\text{ВІП}} = 0,740$; $K_{m\text{ ср}}^{\text{АТПр}} = 0,958$. У середньому коефіцієнт потужності електровоза з АТПр вище, ніж електровоза з ВІП, на $\delta_{\text{км}} = 29,5\%$. При швидкості руху електровоза 52 км/год (в тривалому режимі) збільшення коефіцієнта потужності АТПр у порівнянні з ВІП становить $\delta_{\text{км}} = 19,4\%$. За допомогою моделі виконано розрахунок коефіцієнтів спотворення синусоїдальності кривих напруги K_U і струму K_I на струмоприймачі електровоза для ВІП і АТПр в усьому діапазоні регулювання, проведено оцінку коефіцієнта K_U при зміні відстані $L_{\text{тп}}$ від електровоза до тягової підстанції в діапазоні 0...10 км:

— для ВІП: $K_U(U_d) = 3,15 \dots 10,71\%$, $K_I(U_d) = 17,96 \dots 39,41\%$, $K_U(L_{\text{тп}}) = 7,54 \dots 10,71\%$;

— для АТПр: $K_U(U_d) = 2,94 \dots 10,75\%$; $K_I(U_d) = 9,59 \dots 17,03\%$; $K_U(L_{\text{тп}}) = 5,30 \dots 8,92\%$.

Аналіз результатів моделювання показав, що ступінь спотворення синусоїдальності кривої напруги при ВІП та АТПр є приблизно однаковим, а коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму при АТПр в 2–3 рази менший, ніж при ВІП. Такий ефект можна пояснити активним формуванням синусоїдальної кривої струму в АТПр. Слід відмітити, що коефіцієнт K_I електровоза з АТПр змінюється в менш широких межах, ніж при ВІП. Це означає, що несинусоїдальність струму при ШІМ в більшій мірі визначається прийнятим алгоритмом модуляції, ніж величиною навантаження.

Гармонічний аналіз напруги u_1 на струмоприймачі та струму i_1 первинної обмотки тягового трансформатора електровоза виконувався на імітаційній моделі до 100 гармоніки (частота 5000 Гц). Аналіз для АТПр проведено для умов: 2 зона, коефіцієнт модуляції $\mu = 0,55$; $\mu = 1,0$. Результати аналізу представлено на рис. 9 (напруга) і рис. 10 (струм).

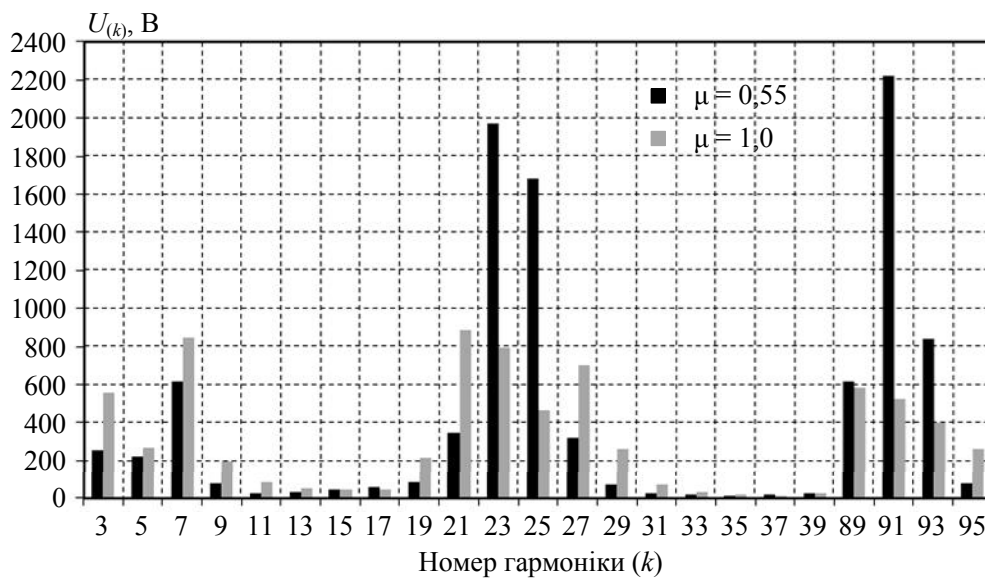


Рисунок 9 — Спектральний склад напруги u_1 електровоза з АТПр, 2 зона

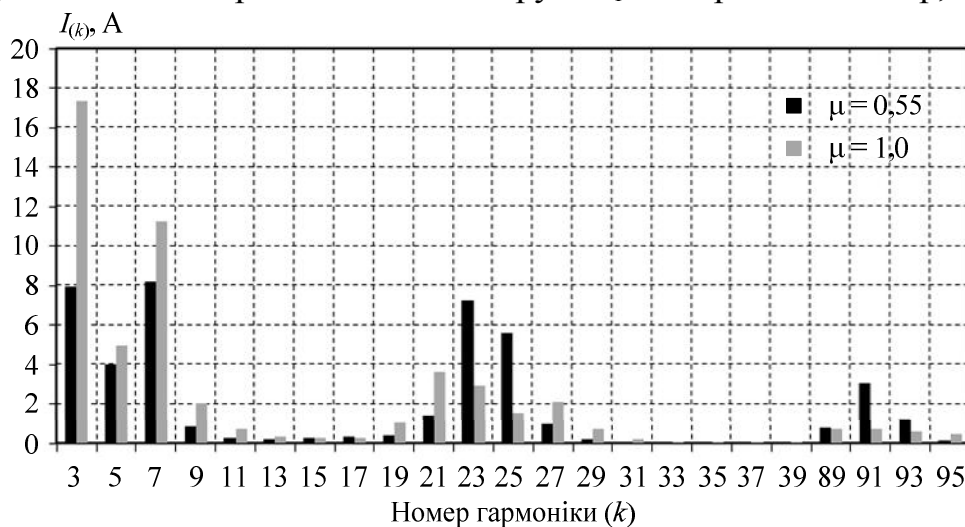


Рисунок 10 — Спектральний склад струму i_1 електровоза з АТПр, 2 зона

З рис. 9 і рис. 10 видно, що АТПр є джерелом широкого спектру гармонік напруги та струму. Найменш вигідним є режим при $\mu \approx 0,5 \dots 0,6$. При $\mu = 0,55$ найбільшу амплітуду мають гармоніки напруги 7, 23, 25, 91, 93 та струму 3, 5, 7, 23,

25, 91. Зменшення коефіцієнта модуляції з 1,0 до 0,55 призводить до збільшення амплітуди 23, 25, 91, 93 гармонік напруги та 23, 25, 91 гармонік струму. У спектральному складі напруги u_1 і струму i_1 можна виділити три характерні групи гармонік, які в основному і визначають несинусоїдальність форми відповідних кривих: 1) $k = 3 \dots 9$; 2) $k = 19 \dots 29$; 3) $k = 89 \dots 95$.

Отже, АТПр, у порівнянні з тиристорним ВП, забезпечує високий коефіцієнт потужності і більш низький рівень несинусоїдальності струму електровоза. Разом з тим, задачами подальших досліджень АТПр є корекція форми напруги та струму електровоза, робота перетворювача в режимі рекуперації, а також синтез системи автоматичного управління перетворювачем.

У **додатках** наведено розрахунок економічної ефективності запропонованих в дисертації схемотехнічних рішень, список опублікованих праць та відомості про апробацію результатів дисертації, акти впровадження результатів дисертації.

У випадку встановлення АТПр на електровозі 2ЕЛ5 при заміні ВП в рамках капітального ремонту додаткові капітальні вкладення складають 4,36 млн. грн. Річний економічний ефект від впровадження АТПр з розрахунку на 18 електровозів складає 17,46 млн. грн. (на один електровоз — 0,97 млн. грн.), а термін окупності — 4,24 року.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу підвищення енергоефективності електрорухомого складу змінного струму з колекторними тяговими двигунами за рахунок вдосконалення тягових напівпровідникових перетворювачів.

1. Одним з головних напрямків підвищення енергоефективності системи електричної тяги змінного струму напруги 25 кВ, 50 Гц є зменшення споживання реактивної потужності, а також підвищення якості напруги та струму в тяговій мережі. Низький коефіцієнт потужності електровозів змінного струму (не більше 0,85 в режимі тяги) та несинусоїдальність напруги на струмоприймачі та струму електровоза є наслідком фазового регулювання випрямленої напруги, процесів комутації в тягових перетворювачах і хвилевих процесів в тяговій мережі. Ефективним енергозберігаючим засобом в системах з двигунами постійного струму є активні випрямлячі струму. При цьому режими їх роботи в якості регуляторів випрямленої напруги при різних варіантах силових схем та алгоритмах ШІМ досліджені недостатньо.

2. Для дослідження електромагнітних процесів в однофазному активному випрямлячі струму розроблено математичну модель, в якій враховано взаємну індуктивність між обмотками трансформатора і магнітну характеристику двигуна постійного струму послідовного збудження, що дозволило отримати основні розрахункові співвідношення для системи «трансформатор — однофазний активний випрямляч струму — двигун постійного струму».

3. На основі апарату алгебри логіки і методу комутаційних функцій розроблено уніфікований математичний опис алгоритмів однополярної ШІМ для випадку синусоїдального, трапецеїдального та прямокутно-ступінчатого модуляційних сигналів. Такий підхід дозволяє спростити розробку комп'ютерних моделей перетворювачів.

4. Результати комп'ютерного моделювання активного випрямляча струму в MATLAB показали, що при всіх трьох варіантах ШІМ при коефіцієнті модуляції 0,5...1,0 коефіцієнт потужності складає 0,90...0,99. При підвищенні частоти ШІМ зменшується несинусоїдальність напруги та струму живлення, при цьому несинусоїдальність струму є максимальною при коефіцієнті модуляції $\mu \approx 0,4...0,6$.

5. Розроблено силову схему активного тягового перетворювача для електровоза змінного струму з колекторними тяговими двигунами (на базі електровоза 2ЕЛ5) та алгоритм управління транзисторами. Двобічне регулювання випрямленої напруги здійснюється за допомогою ШІМ з прямокутно-ступінчастим модуляційним сигналом, частота модуляції 1200 Гц, що дозволяє забезпечити високий коефіцієнт потужності електровоза в усьому діапазоні регулювання.

6. Розроблено математичну модель системи «тягова мережа — електровоз», яка враховує застосування на електровозі тиристорного тягового перетворювача та активного тягового перетворювача з ШІМ і забезпечує дослідження електромагнітних процесів з урахуванням несинусоїдальності напруги в контактній мережі і нелінійності магнітної характеристики тягового двигуна. Математична модель реалізована у вигляді імітаційної моделі.

7. Результати комп'ютерного моделювання електровоза 2ЕЛ5 показали, що активний тяговий перетворювач забезпечує високий коефіцієнт потужності електровоза (0,83...0,99) і більш низький рівень несинусоїдальності струму первинної обмотки тягового трансформатора (ТНДі до 17%) у порівнянні з тиристорним перетворювачем. У тривалому режимі роботи коефіцієнт потужності електровоза з АТПр на 19,4% вище, ніж у електровоза з ВП, що дає змогу скоротити витрати електроенергії на тягу поїздів.

Науковий і практичний інтерес представляє задача корекції форми напруги та струму електровоза з АТПр, дослідження режиму рекуперації, а також синтез системи автоматичного управління перетворювачем.

Модернізація існуючих серій електровозів змінного струму шляхом заміни діодних і тиристорних випрямлячів на АТПр, на нашу думку, буде доцільною в умовах неможливості швидкого масового переходу локомотивного парку залізниці на асинхронний тяговий привод.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Краснов А. А. О возможности снижения потерь энергии при выключении высоковольтных IGBT-приборов и ее схемотехническая энергоэффективность / Н. В. Панасенко, Д. Ю. Шаповалов, А. А. Краснов // Електрифікація транспорту. — 2016. — № 11. — С. 44-52.

Здобувачем проведено аналіз силових схем дво- і чотириквADRантних високовольтних силових ключів на базі транзисторів IGBT.

2. Краснов А. А. Математическое моделирование электропривода електровоза 2ЭЛ5 в режиме тяги / В. Г. Ягуп, А. А. Краснов // Збірник наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту. — 2017. — Вип. 170. — С. 20-31.

Здобувачем розроблено математичну модель системи управління тиристорним перетворювачем електровоза змінного струму 2ЕЛ5 в режимі тяги.

3. Краснов А. А. Энергетические характеристики однофазного активного выпрямителя тока при синусоидальной и трапецеидальной широтно-импульсной модуляции / В. Г. Ягуп, А. А. Краснов, В. В. Божко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2018. — № 2. — С. 3-11.

Здобувачем досліджено енергетичні характеристики однофазного активного випрямляча струму при широтно-імпульсній модуляції з синусоїдальною і трапецеїдальною формою модуляційного сигналу.

4. Krasnov O. Analysis of operating modes of single-phase current-source rectifier with rectangular-stepped pulse-width modulation / O. Krasnov, B. Liubarskyi, V. Bozhko, O. Petrenko, O. Dubinina, R. Nuriiiev // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2018. — № 3/9 (93). — P. 50-57.

Здобувачем розроблено математичну модель і досліджено режими роботи однофазного активного випрямляча струму з широтно-імпульсною модуляцією по прямокутно-ступінчатому закону.

5. Краснов О. О. Активный тяговый перетворювач з широтно-імпульсною модуляцією для електровоза змінного струму з колекторними тяговими двигунами / О. О. Краснов, В. Г. Ягуп, В. В. Божко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2018. — № 4. — С. 11-20.

Здобувачем запропоновано силову схему і алгоритм управління двозонного активного тягового перетворювача з широтно-імпульсною модуляцією, а також проведено комп'ютерне моделювання режимів його роботи.

6. Краснов О. О. Математичне моделювання електровоза змінного струму з активним перетворювачем в режимі тяги / О. О. Краснов // Збірник наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту. — 2018. — Вип. 179. — С. 40-51.

7. Краснов О. О. Шляхи зниження споживання реактивної енергії в системі електричної тяги змінного струму / М. І. Сергієнко, М. В. Панасенко, О. Ю. Чудний, О. О. Краснов // Локомотив-інформ. — 2011. — № 8. — С. 60-65.

Здобувачем проаналізовано шляхи зниження споживання реактивної потужності в системі електричної тяги змінного струму за допомогою компенсаторів, встановлених на ЕРС і тягових підстанціях.

8. Краснов О. О. Аналіз сучасних схемотехнічних рішень по підвищенню енергоефективності магістральних електровозів змінного струму з тяговими колекторними двигунами / В. В. Божко, О. О. Краснов // Безопасность и электромагнитная совместимость на железнодорожном транспорте: тезисы междунар. научно-практической конф., 14-17 февраля 2012 г., пгт. Чинадиево. — Днепропетровск: ДИИТ, 2012. — С. 12-13.

9. Краснов О. О. Моделювання системи електропостачання змінного струму напруги 25 кВ, 50 Гц та електрорухомого складу з колекторними тяговими двигунами / О. О. Краснов, Н. М. Панасенко // Электрификация транспорта «ТРАНСЭЛЕКТРО – 2012»: Материалы VI Международной научно-практической конференции (Мисхор, 2012 г.). — Днепропетровск: ДНУЖТ, 2012. — С. 31-32.

10. Краснов О. О. Зниження споживання реактивної енергії — головний напрямок підвищення енергоефективності електротяги змінного струму напруги 25 кВ, 50 Гц / М. В. Панасенко, О. О. Краснов // Энергосбережение

на залізничному транспорті і в промисловості: Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції (Воловець, 2012 г.). — Дніпропетровськ: ДНУЖТ, 2012. — С. 61-62.

11. Краснов О. О. Математична модель тягової мережі змінного струму для дослідження процесів у бортових компенсаторах реактивної потужності електрорухомого складу / О. О. Краснов // Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології: Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції. Серія «Техніка, технологія». — Київ: ДЕТУТ, 2013. — С. 54-55.

12. Краснов О. О. Математична модель тягового колекторного двигуна для дослідження процесів у силових колах електровоза змінного струму з бортовим компенсатором реактивної потужності / М. В. Панасенко, О. О. Краснов // Електрифікація транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО – 2014»: Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції (Одеса – Дніпропетровськ, 23-26 жовтня 2014 г.). — Дніпропетровськ: ДНУЖТ, 2014. — С. 88-89.

13. Краснов О. О. Основні напрямки підвищення енергоефективності існуючих типів електрорухомого складу змінного струму напруги 25 кВ, 50 Гц / М. В. Панасенко, О. О. Краснов // Енергосбереження на залізничному транспорті і в промисловості: Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції (Воловець, 11-13 червня 2014 г.). — Дніпропетровськ: ДНУЖТ, 2014. — С. 120-121.

14. Краснов О. О. Імітаційне моделювання системи електричної тяги змінного струму напруги 25 кВ, 50 Гц в пакеті MATLAB для дослідження показників якості електроенергії / М. В. Панасенко, О. О. Краснов // Електрифікація транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО – 2015»: Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції (Одеса, 29.09-2.10.2015 р.). — Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2015. — С. 50-51.

15. Краснов О. О. Алгоритми широтно-імпульсної модуляції в однофазному тяговому перетворювачі на повністю керованих вентилях / О. О. Краснов, В. В. Божко // Електрифікація транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО – 2017»: Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 20-21.12.2017 р.). — Дніпро: ДНУЗТ, 2017. — С. 80-81.

АНОТАЦІЇ

Краснов О. О. Активний тяговий перетворювач для електровозів змінного струму з колекторними тяговими двигунами. — На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 — електротранспорт. — АТ «Укрзалізниця», філія «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту», Харківське відділення, Міністерство інфраструктури України, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», МОН України. Харків, 2020.

Одним з ефективних засобів підвищення коефіцієнта потужності електрорухомого складу змінного струму з колекторними тяговими двигунами є активні випрямлячі. У дисертації розроблено математичний опис активного випрямляча струму з тяговим двигуном постійного струму, проведено аналіз енергетичної ефективності випрямляча при широтно-імпульсній модуляції

з синусоїдальним, трапецеїдальним та прямокутно-ступінчастим модуляційним сигналом. Запропоновано силову схему активного тягового перетворювача з двозонним регулюванням напруги і алгоритм управління транзисторами в режимах тяги і рекуперації. Результати комп'ютерного моделювання показали, що активний тяговий перетворювач забезпечує високий коефіцієнт потужності електровоза (0,83...0,99) і більш низький рівень несинусоїдальності струму первинної обмотки тягового трансформатора (ТНДі до 17 %) у порівнянні з тиристорним перетворювачем, що дає змогу скоротити витрати електроенергії на тягу поїздів.

Ключові слова: електротранспорт, електровоз змінного струму, тяговий перетворювач, активний випрямляч струму, широтно-імпульсна модуляція, коефіцієнт потужності, математична модель.

Краснов А. А. Активный тяговый преобразователь для электровозов переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями. — На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 — электротранспорт. — АО «Укрзалізниця», филиал «Проектно-изыскательский институт железнодорожного транспорта», Харьковское отделение, Министерство инфраструктуры Украины, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», МОН Украины, Харьков, 2020.

Диссертация посвящена актуальной научно-технической проблеме повышения энергетической эффективности электроподвижного состава переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями путем совершенствования тяговых преобразователей. Одним из эффективных средств повышения коэффициента мощности на электровозах переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями являются активные выпрямители. Разработана математическая модель активного выпрямителя тока с нагрузкой в виде двигателя постоянного тока. На основе аппарата алгебры логики и метода коммутационных функций разработано унифицированное математическое описание алгоритмов однополярной широтно-импульсной модуляции с синусоидальным, трапецеидальным и прямоугольно-ступенчатым модулирующим сигналом. Анализ энергоэффективности активного выпрямителя проведен для данных алгоритмов ШИМ при частоте модуляции 900 Гц, 1200 Гц и 1800 Гц. Предложена силовая схема активного тягового преобразователя с двухзонным регулированием выпрямленного напряжения, а также алгоритм управления транзисторами в режимах тяги и рекуперативного торможения.

Результаты компьютерного моделирования системы «тяговая сеть — электровоз» показали, что коэффициент мощности электровоза с активным тяговым преобразователем во всем диапазоне регулирования составляет 0,83...0,99. Коэффициенты искажения синусоидальности кривых напряжения на токоприемнике и тока электровоза составляют, соответственно, $K_U = 3...11\%$ и $K_I = 9...17\%$. Результаты гармонического анализа позволили установить характерные группы гармоник, которые в основном и определяют несинусоидальность напряжения и тока. Активный тяговый преобразователь является источником широкого спектра гармоник, а наименее выгодными с этой точки зрения являются режимы с коэффициентом

модуляции 0,5...0,6. Поэтому в дальнейших исследованиях следует учитывать необходимость коррекции формы напряжения и тока.

В целом, активный тяговый преобразователь обеспечивает более высокие энергетические характеристики, чем традиционные выпрямители на основе диодных и тиристорных схем, и может быть рекомендован для установки при капитальных ремонтах и модернизации существующих серий электровозов и электропоездов переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями.

Ключевые слова: электротранспорт, электровоз переменного тока, тяговый преобразователь, активный выпрямитель тока, широтно-импульсная модуляция, коэффициент мощности, математическая модель.

Krasnov O. O. An active traction converter for AC electric locomotives with DC traction motors. — Manuscript.

Thesis for candidate degree of technical sciences of specialty 05.22.09 — electric transport. — Joint-Stock Company “Ukrainian zaliznytsia”, Branch “Design and survey institute of railway transport”, Ministry of Infrastructure of Ukraine, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, MES of Ukraine. Kharkiv, 2020.

Active rectifiers are one of the effective ways to increase the power factor on AC electric locomotives with DC traction motors. In this thesis, the mathematical description of the active current source rectifier with DC motor is improved. The analysis of the active rectifier energy efficiency with a sinusoidal, trapezoidal and rectangular-stepped pulse-width modulation (modulation frequency 900 Hz, 1,200 Hz and 1,800 Hz) is performed. The power circuit of the active traction converter with two-zone DC voltage regulation and the algorithm for controlling transistors in traction and recuperation modes has been developed. The results of computer simulation showed that the active traction converter can provide a high power factor of electric locomotive (0.83...0.99). The trolley wire current THD is 9...17%, which is less than with a thyristor converter. This reduces the consumption of electricity for traction.

Keywords: electric transport, AC electric locomotive, traction converter, active current-source rectifier, pulse-width modulation, power factor, mathematical model.



Підписано до друку 15.10.2020 р. Формат 60x90/16.
Папір офсетний. Друк — ризографія. Гарнітура Times New Roman.
Умовн. друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим. Зам. № 2020101601

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»
(ФО-П Миронов М. В. Свідоцтво № ВО4 № 022953)
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1
Тел. (057) 717-03-54