

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна



ЗАБАРИЛО ДМИТРО ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 629.423:621.3.024.025

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ
ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ З АСИНХРОННИМ ТЯГОВИМ
ПРИВОДОМ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2015

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

ГЕТЬМАН Геннадій Кузьмич,

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри електрорухомого складу залізниць.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

АНДРІЄНКО Петро Дмитрович,

Запорізький національний технічний університет Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри електричних та електронних апаратів.

кандидат технічних наук, доцент

ЧЕРНЯК Юрій Васильович,

Державний економіко-технологічний університет транспорту Міністерства освіти і науки України, м. Київ, завідувач кафедри тягового рухомого складу залізниць.

Захист відбудеться «29» жовтня 2015 року о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д08.820.01 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. академіка В.А.Лазаряна, 2, ауд. 314.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, 2.

Автореферат розісланий «25» вересня 2015 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
д-р техн. наук, професор

А. М. Муха

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність. На залізницях України використовуються системи тяги постійного і змінного струму. Для організації руху поїздів в місцях сполучення різних систем застосовуються станції стикування, при проходженні яких передбачається зупинка поїзда і заміна електрорухомого складу (ЕРС). В зв'язку з цим підвищення ефективності залізничних перевезень вимагає розширення використання в перевізній роботі двосистемного ЕРС.

На сьогодні в інвентарному парку Укрзалізниці знаходяться лише 12 міжрегіональних електропоїздів (ЕЛ675, НРС2) і 49 вантажних електровозів (ВЛ82^М) подвійного живлення. Електровози ВЛ82^М виготовлені в 70-ті роки минулого століття і не відповідають сучасним вимогам експлуатації, оскільки оснащені колекторними тяговими двигунами з системою ступінчатого реостатного регулювання потужності тяги.

Вказані вище обставини вимагають поповнення локомотивного парку Укрзалізниці перспективним електрорухомим складом подвійного живлення.

В умовах, коли відсутні достатні кошти на оновлення локомотивного парку і тому особливо важливим є придбання високоефективної техніки в ряд актуальних науково-практичних задач входить вдосконалення структури схем силових електричних кіл перспективного електрорухомого складу з метою покращення масо-габаритних показників сигової частини тягового привода для підвищення швидкості руху ЕРС. Важливим також є забезпечення необхідного рівня електромагнітної сумісності ЕРС та пристроїв колійної автоматики, оскільки дослідні дані показують, що при знаходженні двох і більше електровозів з асинхронним тяговим приводом в межах однієї фідерної зони можуть виникнути завади, які здатні спричинити збій в роботі пристроїв колійної автоматики, внаслідок чого знижується безпека руху поїздів.

Електропередачам рухомого складу з асинхронним тяговим приводом присвячено низку досліджень, до яких належать роботи таких вчених, як Андрієнко П. Д., Вісін М. Г., Курбасов О. С., Литовченко В. В., Муха А. М., Ротанов М. А., Широченко Ю. М. та ін.

Основна частина відомих досліджень присвячена асинхронному приводу електрорухомого складу змінного струму, проте недостатньо вивчені питання в області розробки структур силових схем двосистемного ЕРС. Тому дисертаційна робота присвячена вдосконаленню в зазначених вище напрямках структур схем силових електричних кіл електрорухомого складу подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом і направлена на підвищення його ефективності є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Дисертаційну роботу виконано згідно наступних програм:

- «Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020 роки», затверджена Міністерством транспорту та зв'язку України (наказ від 14.10.2008 №1259);

- Державна цільова економічна програма енергоефективності й розвитку сфери виробництва енергоресурсів з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2012 – 2015 роки, затверджена постановою Кабінету міністрів України від 01.03.2010 р. № 423 зі змінами, затвердженими постановами Кабінету Міністрів України від 27.04.2011 № 447 та від 25.01.2012 №105;

- Постанова Кабінету міністрів України від 23.04.1999 р. №661 «Про заходи державної підтримки залізничного транспорту»;

Обраний напрямок дослідження пов'язаний з планами виконання таких науково-дослідних робіт: «Експлуатаційні випробування електровозів 2ЭС6 №147 і 2ЭС10 № 012 в умовах Львівської залізниці» (№ ДР 0112U003558), «Дослідження і аналіз показників експлуатаційної роботи та надійності електропоїздів подвійного живлення» (№ ДР 0113U005861), у яких автор був одним з виконавців.

Метою роботи є підвищення ефективності електрорухомого складу подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом та підвищення безпеки руху поїздів шляхом вдосконалення структури схеми силових електричних кіл.

Для досягнення поставленої мети потрібно:

- виконати аналіз існуючих силових схем багатосистемного електрорухомого складу з асинхронним тяговим приводом;

- визначити критерії оцінки ефективності силових схем електрорухомого складу подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом;

- вдосконалити структуру силової схеми електрорухомого складу подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом;

- обґрунтувати діапазон раціональних частот ланки підвищеної частоти;

- розробити модель електричних процесів в силових схемах з застосуванням чотириквadrантного перетворювача та трансформатора підвищеної частоти.

Об'єкт досліджень: процес функціонування силових електричних кіл електрорухомого складу подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом.

Предмет досліджень: тягові електропередачі електрорухомого складу подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом.

Методи дослідження.

У першому розділі при вирішенні задачі вибору раціональної схеми силових кіл двосистемного електрорухомого складу з асинхронним тяговим приводом використовувалися методи та принципи теорії прийняття рішень. В другому розділі для обґрунтування доцільності застосування аморфних сплавів для магнітопроводів тягових трансформаторів застосовано метод техніко-економічного аналізу. В третьому розділі при визначенні раціональної частоти ланки підвищеної частоти використовувався метод апроксимації. В четвертому розділі для визначення спектру гармонік струму вхідних перетворювачів електрорухомого складу подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом по тракту змінного струму використаний метод імітаційного моделювання та метод швидкого перетворення Фур'є. У п'ятому розділі оцінка поліпшення масо-габаритних показників тягового електропривода розробленої структури силової схеми відносно відомої виконана з використанням методу порівняння геометрично подібних трансформаторів.

Обробка даних та розрахунки виконувалися за допомогою ПЕОМ в програмних пакетах MathCad та Excel.

Наукова новизна отриманих результатів.

До основних наукових результатів, отриманих автором особисто, які виносяться на захист відносяться:

1. Вперше обґрунтована доцільність застосування магнітопроводів з аморфних сплавів в тягових трансформаторах електрорухомого складу подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом, що дозволяє покращити енергетичні показники трансформатора.
2. Вперше досліджено вплив режимів роботи перетворювачів в структурах силових кіл з проміжним трансформатором електрорухомого складу подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом на пристрої колійної автоматики з метою поліпшення безпеки руху поїздів.
3. Отримала подальший розвиток концепція використання в структурах силових кіл електрорухомого складу з асинхронним приводом проміжного тягового трансформатора, яка відрізняється від існуючої застосуванням багатообмоткового трансформатора підвищеної частоти, що дозволяє поліпшити масо-габаритні показники тягового електропривода.
4. Отримав подальший розвиток метод визначення раціональної частоти ланки підвищеної частоти електрорухомого складу, який на відміну від існуючого враховує комутаційні властивості силових напівпровідникових ключів, що дозволяє підвищити енергетичні показники перетворювача.

Практичне значення отриманих результатів. Результати теоретичних досліджень, які отримані в дисертаційній роботі дозволять:

- вдосконалити схему силових кіл двосистемного електрорухомого складу, що дає можливість покращити масо-габаритні показники електропривода та поліпшити електромагнітну сумісність електрорухомого складу з пристроями колійної автоматики, що підвищить безпеку руху поїздів;
- знизити масу активних матеріалів тягового трансформатора підвищеної частоти за рахунок використання магнітопроводів з аморфного сплаву;
- оцінити рівень електромагнітної сумісності структур схем, в яких використовується трансформатор підвищеної частоти, з пристроями колійної автоматики.

Особистий внесок здобувача. Постановку мети та задачі дослідження, а також аналіз отриманих результатів виконано спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, результати теоретичних та експериментальних досліджень дисертаційної роботи отримані автором самостійно. В роботах, які написані у співавторстві, здобувачу належать: [2] – визначення раціональної схеми двосистемного електрорухомого складу; [3] – розробка структури схеми при живленні від тягової мережі постійного струму; [4, 8] – визначення шляхів покращення електромагнітної сумісності електрорухомого складу з асинхронним тяговим приводом з пристроями колійної автоматики; [5] – визначення раціональної структури схеми силових кіл з застосуванням трансформатора підвищеної частоти електрорухомого складу подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом. Роботи [1, 6, 7, 9] виконані та опубліковані автором самостійно.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювалися на: міжнародній науково-практичній конференції «Електрифікація залізничного транспорту “Транселектро – 2010”» (Місхор, 2010 р.), міжнародній науково-практичній конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті» (Жденієво, 2011 р.), міжнародній науково-практичній конференції «Електрифікація залізничного транспорту “Транселектро – 2011” » (Дніпропетровськ, 2011 р.), міжнародній науково-практичній конференції «Електрифікація залізничного транспорту “Транселектро – 2012” » (Місхор, 2012 р.), міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2013 р.), міжнародній науково-практичній конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті» (Воловець, 2013 р.), міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2014 р.), міжнародній науково-практичній конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті» (Воловець, 2014 р.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані в 18 наукових працях, у тому числі: 1 – монографія; 8 – статті у фахових наукових виданнях, у тому числі стаття [9] опублікована у виданні, що входить до

переліку міжнародної науко-метричної бази Index Copernicus; 1 – патент на корисну модель; 8 – у тезах доповідей на матеріалах конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, переліку використаних джерел та п'яти додатків. Основний текст роботи викладений на 120 сторінках, містить 64 рисунків 13 таблиць. Рисунки, розміщені на окремих сторінках, займають 3 сторінки. Список літератури з 116 найменувань займає 12 сторінок. Додатки займають 38 сторінок. Повний обсяг дисертації – 170 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та визначено основні задачі досліджень, наведені основні наукові положення та результати, які виносяться на захист, а також відомості про практичне значення результатів роботи, апробацію і публікацію наукових досліджень.

У першому розділі виконано аналіз сучасного стану інвентарного парку електрорухомого складу залізниць України. Надана характеристика структур силових кіл діючого багатосистемного ЕРС з асинхронним тяговим приводом та визначено шляхи їх вдосконалення.

В результаті виконаного аналізу структур силових схем багатосистемного ЕРС з асинхронним тяговим приводом виділено шість альтернативних схем:

- з застосуванням вхідних перехресних чоперів;
- з послідовним з'єднанням вхідних перетворювачів при живленні від мережі 3 кВ;
- з вхідним чопером, який виконано на IGBT 65 класу;
- з застосуванням ємнісних дільників (з тяговим двигуном, статорна обмотка якого виконана за типом «подвійної зірки»);
- з застосуванням ємнісних дільників (з використанням трирівневих автономних інверторів);
- схема з безпосереднім перетворювачем (схема «прямого підключення»).

Порівняльна оцінка схем виконана за наступними критеріями:

- простота конструкції асинхронного тягового двигуна;
- досконалість конфігурації схем при живленні АТД від контактної мережі різних родів струму;
- кількість силових напівпровідникових приладів;
- клас напівпровідникових приладів;
- коефіцієнт використання тягового обладнання в обох режимах;
- ККД тягового кола при живленні від мережі постійного струму;
- ККД тягового кола при живленні від мережі змінного струму;

Для обґрунтованого вибору раціональної схеми – з безпосереднім перетворювачем (схема «прямого підключення») (рис. 1), яку в подальших

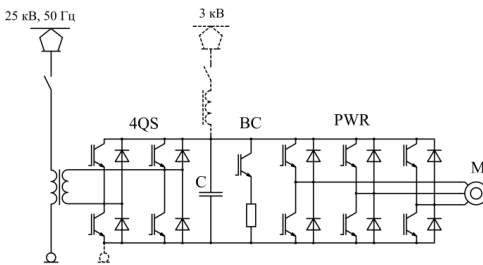
дослідженнях прийнято за базову, автором застосовувався метод теорії прийняття рішень і вирішена функції корисності F_i для всіх альтернатив:

$$F_i = \sum_{j=1}^k U_{ij} W_j \quad (1)$$

де U_{ij} - оцінка i -ї альтернативи за j -м критерієм;

W_j - вага j -го критерію.

Головним недоліком всіх схем подібної конфігурації тягових перетворювачів ЕРС нового покоління є імпульсний відбір енергії з вторинної обмотки трансформатора вхідним перетворювачем, алгоритмом роботи якого закладено короткочасне замикання обмотки для підвищення напруги проміжної ланки. Такі замикання створюють імпульси струму з піковими значеннями, які передаються, в кінцевому випадку, до рейкових кіл та можуть призвести до збою в роботі колійних пристроїв автоматики, наслідком чого є зниження безпеки руху поїздів. Крім того питома вага тягового трансформатора, який живиться від мережі промислової частоти, в 5 разів перевищує питому вагу перетворювачів і займає основну долю об'єму та маси тягового привода ЕРС. Тому основними критеріями оцінки ефективності силових схем електрорухомого складу подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом є масо-габаритні показники тягового привода та степінь впливу його на колійні пристрої автоматики.



BC – гальмовий чопер, 4QS – вхідний перетворювач, PWR – автономний інвертор напруги, M – асинхронний тяговий двигун

Рисунок 1 – Схема «прямого підключення»

живленні від мережі постійної напруги.

Узагальнення матеріалів першого розділу стало основою для постановки задач дослідження.

Проведений аналіз способів зниження масо-габаритних показників тягових трансформаторів показав, що найбільш раціональним способом є підвищення частоти вхідної напруги трансформатора.

Відомі структури силових схем з застосуванням трансформатора підвищеної частоти недостатньо досліджені і мають один суттєвий недолік – низький ККД при

Другий розділ присвячений розробці і дослідженню структури силових кіл ЕРС подвійного живлення з застосуванням трансформатора підвищеної частоти.

Розроблено варіант функціональної схеми, показаний на рис. 2. На базі цієї схеми отримано три альтернативні структури:

- з застосуванням трифазних трансформаторів (рис. 3);
- з застосуванням багатообмоткового однофазного трансформатора (рис. 4);
- з застосуванням двообмоткових однофазних трансформаторів (рис. 5).

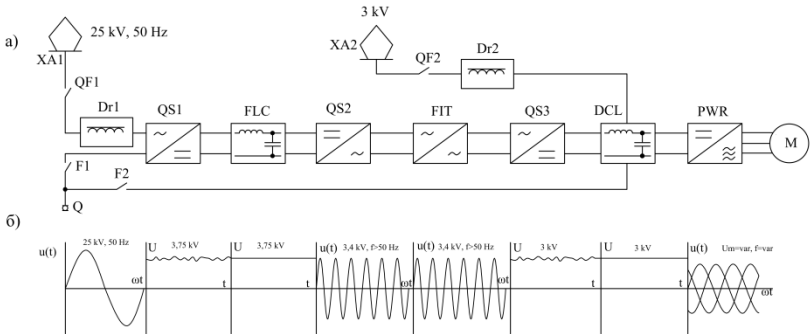


Рисунок 2 – Функціональна схема ЕРС подвійного живлення з проміжним трансформатором підвищеної частоти (а) та криві напруги в тракті перетворювача (б)

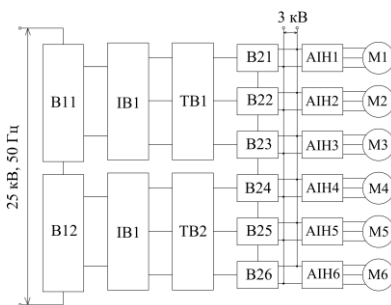


Рисунок 3 – Функціональна схема ЕРС подвійного живлення з застосуванням трифазного трансформатора

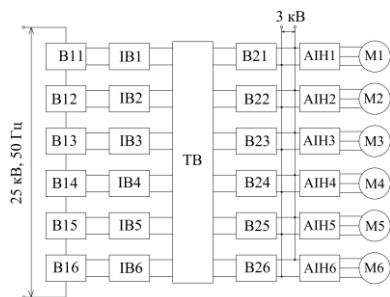


Рисунок 4 – Функціональна схема ЕРС подвійного живлення з застосуванням багатообмоткового трансформатора

Реалізація схеми на базі структури з трифазним трансформатором при використанні існуючої елементної бази неможлива, оскільки в перетворювачах потрібно застосовувати напівпровідникові ключі, які здатні витримувати прикладену напругу 14,5 кВ. Тому подальші порівняння такої структури з іншими не проводилися.

З точки зору резервування потужності схема з двообмотковими однофазними трансформаторами більш прийнятна за схему з багатообмотковим трансформатором, оскільки в будь-якому аварійному режимі одного з тягових плечей ЕРС втратить 16,7 % потужності.

Розглянуті дві схеми конструктивно відрізняються лише трансформаторами. Тому, з точки зору масо-габаритних показників, розглянуто співвідношення тільки між трансформаторами.

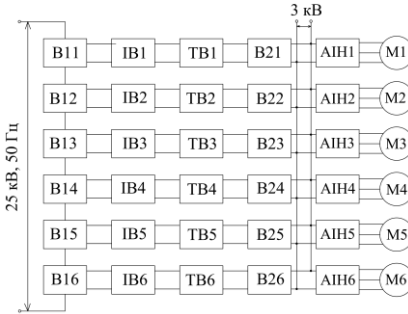


Рисунок 5 – Функціональна схема ЕРС із застосуванням двообмоткових трансформаторів

В результаті порівняння сумарних маси G_n , вартості C_n і втрат Π_n n -ї кількості подібних трансформаторів з відповідними величинами G_1 , C_1 і Π_1 одного трансформатора еквівалентної потужності визначено, що вказані показники одного трансформатора будуть на 30 % менші порівняно до чотирьох трансформаторів і на 36 % порівняно до 6-ти трансформаторів еквівалентної сумарної потужності (рис. 6). Тому структура схеми з одним багатообмотковим

трансформатором прийнята за основну.

$$T = \frac{G_1}{G_n} \square \frac{C_1}{C_n} \square \frac{\Pi_1}{\Pi_n} \square \frac{\sqrt[4]{P^3}}{n^4 \sqrt[n^3]{P^3}} = \frac{1}{\sqrt[4]{n}}. \quad (2)$$

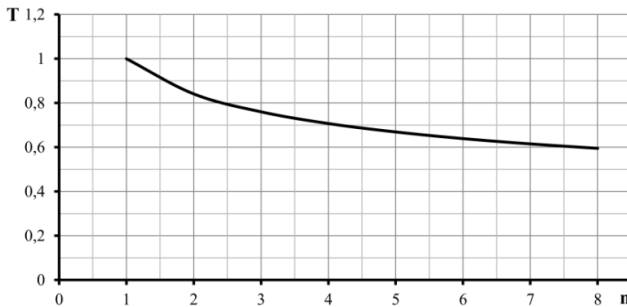


Рисунок 6 – Залежність зміни маси, втрат і вартості одного трансформатора відносно декількох трансформаторів еквівалентної потужності

На базі функціональної схеми розроблена принципова схема електричних кіл ЕРС подвійного живлення з застосуванням трансформатора підвищеної частоти (рис. 7).

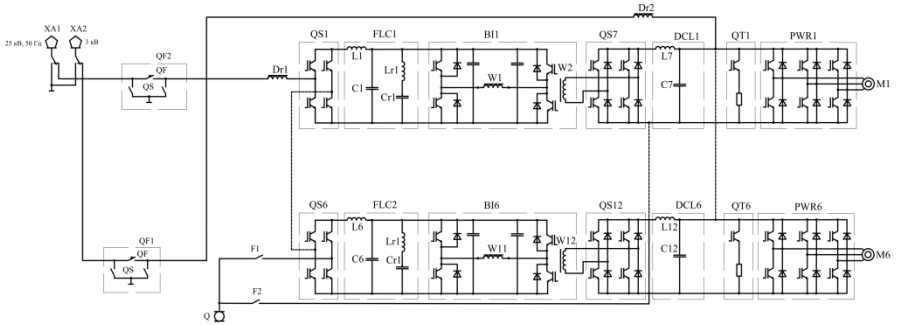


Рисунок 7 – Принципова електрична схема ЕРС подвійного живлення із застосуванням трансформатора підвищеної частоти

Трансформатор підвищеної частоти отримує живлення від інвертора. Разом вони утворюють ланку підвищеної частоти. В роботі встановлено, що максимальна робоча частота ланки підвищеної частоти визначається параметрами інвертора, а саме комутаційними властивостями його силових напівпровідникових ключів та струмом навантаження.

Допустима частота комутації напівпровідникових ключів обмежується температурою нагріву напівпровідникового кристалу, а отже, втратами потужності в приладі, основну частину яких складають втрати в провідному стані приладу та втрати, викликані перемиканням приладу і залежать від струму навантаження. В паспортних даних напівпровідникових ключів приводяться залежності, які показують кількість джоулів енергії, що виділяється при одному вмиканні-вимиканні приладу відносно величини струму навантаження. Виконуючи апроксимацію таких залежностей та враховуючи допустиму температуру нагріву кристалу та його тепловий опір отримано аналітичний вираз для визначення допустимої частоти комутації IGBT:

$$f_{sw} = \frac{\left(\frac{T_j - T_a}{R_{thjc} + R_{thch} + R_{thha}} - \left(0,5 \left(U_{CEO} \frac{I_m}{\pi} + r_{CE} \frac{I_m^2}{4} \right) + m \cos \varphi \left(U_{CEO} \frac{I_m}{8} + r_{CE} \frac{I_m^2}{3\pi} \right) \right)}{\left(\frac{a}{2} + \frac{b I_m}{\pi} + \frac{c I_m^2}{4} \right)} \frac{U_{nom}}{U_{DC}}, \quad (3)$$

де T_j - максимально допустима температура нагріву напівпровідникового кристалу, °C;

T_a - температура навколишнього середовища, °C;

$R_{thjc}, R_{thch}, R_{thha}$ - теплові опори: кристал-корпус, корпус-охолоджувач, охолоджувач-охолоджувальне середовище, Вт/°C;
 U_{CEO} - гранична напруга IGBT у відкритому стані, В;
 I_m - амплітудне значення струму навантаження, А;
 r_{CE} - динамічний опір IGBT у відкритому стані, Ом;
 m - коефіцієнт модуляції;
 $\cos \varphi$ - коефіцієнт потужності трансформатора підвищеної частоти;
 U_{nom} - напруга при якій визначаються параметри вмикання та вимикання IGBT, В;
 U_{DC} - напруга ланки постійного струму, В;
 a, b, c - коефіцієнти поліному, який характеризує залежність енергії втрат при комутації IGBT від струму колектора.

Скориставшись виразом (3), на прикладі IGBT 65 класу виробництва компаній Infineon та ABB, визначено допустимі частоти комутації транзисторів. В результаті встановлено, що за комутаційними властивостями в діапазоні струмів навантаження 200...600 А IGBT 65 класу виробництва компанії Infineon більш прийнятні для використання їх в перетворювачах порівняно з IGBT такого ж класу виробництва компанії ABB (табл. 1).

Таблиця 1 – Значення максимальних частоти в залежності від струмів IGBT

Струм навантаження, А	Виробники IGBT							
	Infineon				ABB			
	Номінальний (паспортний) струм навантаження IGBT, А							
	250	400	500	600	750	400	500	750
	Максимально допустима частота IGBT, Гц							
200	1491	2410	2487	2880	2804	2661	1857	1973
250	1076	1857	1970	2326	2330	2037	1530	1705
300	-	1491	1622	1977	1987	1582	1269	1477
350	-	1201	1327	1649	1704	1208	1053	1282
400	-	971	1100	1391	1494	932	871	1121
450	-	-	920	1194	1267	-	719	973
500	-	-	759	1008	1094	-	586	841
550	-	-	-	864	955	-	-	734
600	-	-	-	736	825	-	-	629

Для досягнення максимальної частоти комутації при струмі навантаження 200 А потрібно використовувати прилад з номінальним (паспортним) струмом навантаження 600 А, для решти величин струму

розглянутого діапазону – 750 А. Максимальна допустима частота комутації IGBT при струмі 200 А становить 2880 Гц, при 600 А – 825 Гц.

В **третьому розділі** розглянуто особливості режимів роботи тягових трансформаторів та обґрунтовано можливість застосування аморфних сплавів в їх магнітопроводах. Визначено основні електромагнітні співвідношення для багатообмоткових трансформаторів.

Маса G та лінійні розміри l трансформатора потужністю S визначаються при інших рівних даних частотою напруги живлення:

$$G \propto \frac{\sqrt[4]{S^3}}{f^{0,27}}; \quad l \propto \frac{\sqrt[4]{S}}{f^{0,09}}. \quad (4)$$

Однак підвищенню частоти з метою поліпшення масо-габаритних показників тягових трансформаторів в разі виготовлення магнітопроводів з електротехнічної сталі завадить збільшення в останніх магнітних втрат енергії, що призводить до підвищення нагріву сердечника. Здійснити практичну реалізацію ідеї використання підвищеної частоти напруги живлення трансформатора можна, як показано в роботі, за рахунок застосування магнітних матеріалів питомий опір яких вищий ніж у електротехнічних сталей.

В результаті виконаного аналізу магнітом'яких матеріалів, питомий опір яких вищий за опір електротехнічних сталей, визначені наступні матеріали: ферити, пермалої, магнітодіелектрики, аморфні та нанокристалічні сплави. Найбільш раціональний матеріал визначено за такими основними критеріями: максимальні індукція насичення та питомий опір, механічна стійність, стабільність магнітних характеристик при зміні температури.

В результаті визначено, що найбільш придатним при використанні в якості матеріалу для магнітопроводу тягового трансформатора підвищеної частоти є аморфний сплав. Сплав марки 2605НВ1М (Metglas) вигідно відрізняється від аморфних сплавів інших марок високою індукцією насичення, яка рівна 1,63 Тл. Питомі втрати при частоті 50 Гц та індукції 1,3 Тл складають 0,083 Вт/кг, що в 9 разів менше в порівнянні з електротехнічною сталлю марки 3407 товщиною листа 0,3 мм, яка використовується в тягових трансформаторах ЕРС, що експлуатується на залізницях України.

В дисертаційній роботі визначені основні електромагнітні співвідношення для багатообмоткового трансформатора, що дозволяє дослідити параметри навантаження при відключенні частини обмоток (наприклад у аварійному режимі).

Схема заміщення багатообмоткового трансформатора представлена на рис. 8. Їй відповідає система рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{11} = R_{11}i_{11} + L_{11} \frac{di_{11}}{dt} + L_{\mu} \frac{di_{\mu}}{dt}, \\ u_{12} = R_{12}i_{12} + L_{12} \frac{di_{12}}{dt} + L_{\mu} \frac{di_{\mu}}{dt}, \\ u_{1N} = R_{1N}i_{1N} + L_{1N} \frac{di_{1N}}{dt} + L_{\mu} \frac{di_{\mu}}{dt}, \\ k_{21}u_{21} = -k_{21}^2 L_{\mu} \frac{d}{dt} \frac{i_{\mu}}{k_{21}} - k_{21}^2 R_{21} \frac{i_{21}}{k_{21}} - k_{21}^2 L_{21} \frac{d}{dt} \frac{i_{21}}{k_{21}}, \\ k_{22}u_{22} = -k_{22}^2 L_{\mu} \frac{d}{dt} \frac{i_{\mu}}{k_{22}} - k_{22}^2 R_{22} \frac{i_{22}}{k_{22}} - k_{22}^2 L_{22} \frac{d}{dt} \frac{i_{22}}{k_{22}}, \\ k_{2N}u_{2N} = -k_{2N}^2 L_{\mu} \frac{d}{dt} \frac{i_{\mu}}{k_{2N}} - k_{2N}^2 R_{2N} \frac{i_{2N}}{k_{2N}} - k_{2N}^2 L_{2N} \frac{d}{dt} \frac{i_{2N}}{k_{2N}}, \\ i_{1N} = i_{\mu} - i_{11} - i_{12} + \frac{i'_{21}}{k_{21}} + \frac{i'_{22}}{k_{22}} + \frac{i'_{2N}}{k_{2N}}. \end{array} \right. \quad (5)$$

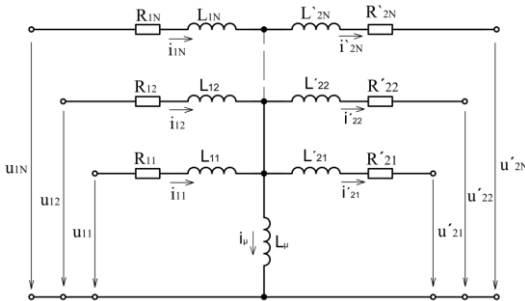


Рисунок 8 – Схема заміщення багатообмоткового трансформатора з урахуванням магнітних втрат

Навантаженням вторинних обмоток трансформатора є тягові асинхронні двигуни, які отримують живлення від автономних інверторів напруги (АІН). АІН, в свою чергу, живляться від ланки постійної напруги, яка представляє собою ємнісний фільтр. Тому навантаження N -ї вторинної обмотки можна представити у вигляді двополосника (рис. 9).

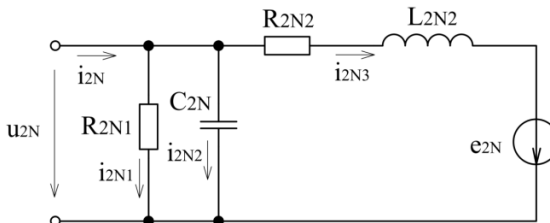


Рисунок 9 – Схема заміщення навантаження обмотки трансформатора

Даній схемі заміщення відповідає система рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{i_{2N}}{k_{2N}} = \frac{i_{2N1}}{k_{2N}} + \frac{i_{2N2}}{k_{2N}} + \frac{i_{2N3}}{k_{2N}}, \\ u_{2N} = \frac{i_{2N3}}{R_{2N2}} k_{2N} + k_{2N}^2 L_{2N2} \frac{d}{dt} \frac{i_{2N3}}{k_{2N}} - k_{2N} e_{2N2}. \end{cases} \quad (6)$$

Сумісне вирішення систем рівнянь (5) і (6) дозволяє визначити величину струмового навантаження обмоток трансформатора при зміні параметрів джерел живлення або навантаження, що виникає в разі відключення первинної чи вторинної обмотки при аварійному режимі роботи ЕРС.

У четвертому розділі розроблена модель електричних процесів чотириквadrантного перетворювача та схеми з застосуванням трансформатора підвищеної частоти, що дозволяє оцінити спектр частот та амплітуду струмів, які виникають при їх роботі, з діапазоном частот роботи пристроїв колійної автоматики.

Для зменшення амплітуди і спектру неосновних гармонік, які викликані роботою чотириквadrантного перетворювача застосовують їх паралельне включення на загальне навантаження. При цьому паралельно ввімкнені перетворювачі працюють зі зміщенням по фазі моделюючої напруги або з різними кратностями модуляції. На прикладі досліджена робота перетворювачів зі зміщенням та без зміщення моделюючих напруг по фазі, як найбільш розповсюджених способів. Частота опорної напруги становить 450 Гц, а моделюючої – 50 Гц. Потужність асинхронного тягового двигуна 1200 кВт. Обрані вихідні дані відповідають реальним даним електровоза змінного струму з асинхронним тяговим приводом ДСЗ, який експлуатується на залізницях України.

В результаті моделювання отримано величини струмів і їх спектр в первинній обмотці трансформатора (рис. 10, 11).

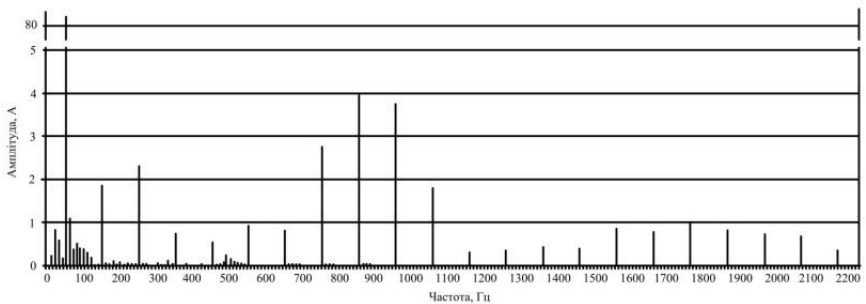


Рисунок 10 – Спектр вхідного струму при роботі 4QS без зміщення

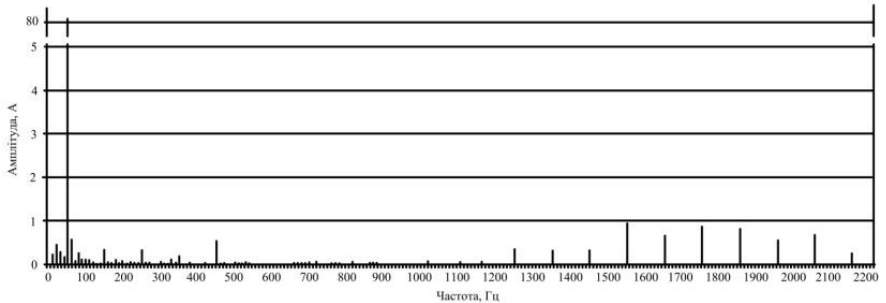


Рисунок 11 – Спектр вхідного струму при роботі 4QS зі зміщенням

Результати моделювання показують, що при роботі перетворювачів 4QS без зміщення у всьому діапазоні частот спостереження (0...2200 Гц) спостерігаються гармоніки, які кратні частоті моделюючої напруги 50 Гц. Крім того в спектрі струму присутні гармоніки, які попадають в діапазон робочих частот колійних пристроїв автоматики (табл. 2).

Таблиця 2 – Нормовані та визначені шляхом моделювання значення показників рівня заважаючого впливу електрообладнання ЕРС на рейкові кола та колійні пристрої сигналізації

Частота сигнального струму, Гц	Допустимі параметри струму завад		Рівні струму завад, які отримані шляхом моделювання, А		
	Полоса пропускання, Гц	Амплітуда, А	2 4QS без зміщення моделюючих сигналів	2 4QS зі зміщенням моделюючих сигналів	Розроблена схема
25	19...21	4,0	-	-	-
	21...29	1,0 небезпечне	0,87	0,35	-
	29...31	4,0	0,38	0,17	-
50	42...46	5,0	0,09	0,004	-
	46...54	1,3 небезпечне	1,12	0,45	-
	54...58	5,0	0,04	0,01	0,027
175	167...184	0,4	0,09	0,28	-
420	408...432	0,35	0,01	0,03	-
480	468...492	0,35	0,25	0,08	0,028
580	568...592	0,35	0,07	0,038	-
720	708...732	0,35	0,004	0,001	-
780	768...792	0,35	0,015	0,03	0,018
4545	4508...4583	0,2	0,001	-	-
5000	4963...5038	0,2	-	0,001	-
5555	5518...5593	0,2	0,001	-	-

При роботі перетворювачів 4QS зі зміщенням спектр неосновних гармонік значно менший. Лише в діапазоні частот 1500...2100 Гц спостерігаються гармоніки, які досягають величини майже 1 А.

Амплітуда струмів гармонік, які попадають в діапазон робочих частот коїйних пристроїв автоматики значно нижча в порівнянні з струмами, які виникають при роботі перетворювачів 4QS без зміщення.

Спектр вхідного струму, який визначено в результаті моделювання роботи електромагнітних процесів розробленої схеми показано на рис. 12. В спектрі всього діапазону частот присутні гармоніки, які кратні частоті 50 Гц. Амплітуда гармоній найбільша в діапазоні від 150 Гц до 650 Гц.

Величини амплітуд струмів гармонік неосновної частоти, які викликані роботою розглянутих схем і попадають в діапазоном робочих частот пристроїв коїйної автоматики зведені до табл. 2.

При роботі розробленої схеми спектр струму завод значно вужчий в порівнянні з спектром, який створює ЕРС з чотириквadrантними перетворювачами, а амплітуда струму завод не перевищує 8 % від допустимого значення.

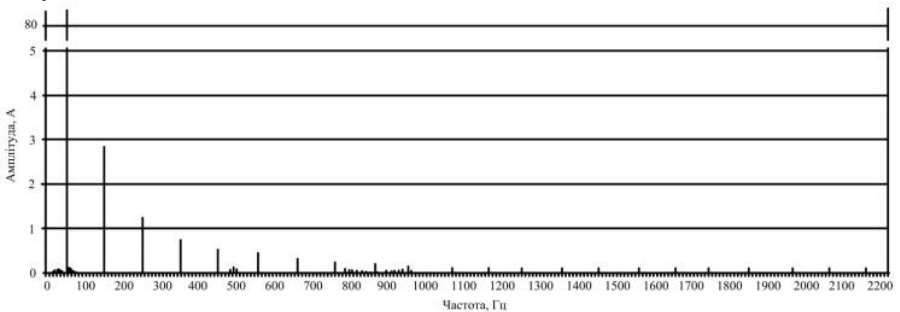


Рисунок 12 – Спектр вхідного струму схеми із застосуванням трансформатора підвищеної частоти

Діюче значення психометричного струму становить 16 % від допустимого, яке нормується «Правилами захисту пристроїв провідного зв'язку провідного мовлення від впливу тягової мережі електрифікованих залізниць змінного струму».

У п'ятому розділі виконано оцінку ефективності застосування розробленої схеми з точки зору поліпшення масо-габаритних показників тягового електропривода.

Застосування розробленої схеми при підвищенні частоти вхідної напруги з 50 Гц до 2880 Гц дозволить знизити масу трансформатора в 3 рази, а питому масу привода (без урахування маси тягових двигунів) в 1,7 рази (рис. 13).

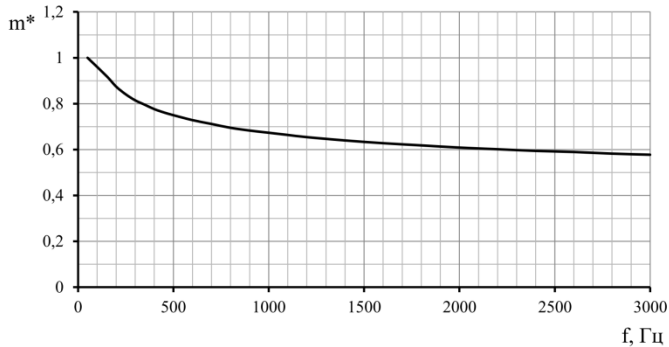


Рисунок 13 – Графік залежності відносного зниження питомої маси привода m^* з застосуванням трансформатора підвищеної частоти від частоти f прикладеної напруги

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-практична задача підвищення ефективності електрорухомого складу подвійного живлення, що забезпечує поліпшення масо-габаритних показників тягового привода та підвищення безпеки руху поїздів шляхом вдосконалення структури схеми електричних кіл.

Основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Проведений аналіз сучасного стану локомотивного парку залізниць України показав, що знос електрорухомого складу сягає 80 %...90 %, а фактичний строк служби становить 35...45 років і в найближчий час підлягатиме списанню. Тому для виконання заданого об'єму перевезень необхідне оновлення парку електрорухомого складу.

2. Встановлено, що раціональним для залізниць України є поступове впровадження ЕРС подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом, що дозволяє знизити кількість інвентарного парку локомотивів та збільшити пропускну спроможність за рахунок ліквідації часу на зупинки, які необхідні для зміни локомотивів у випадку застосування односистемного ЕРС.

3. Виконаний аналіз структур силових схем ЕРС подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом дозволив визначити найбільш раціональну структуру – схема «прямого підключення». Проте недоліком такої структури схеми та всіх схем подібної конфігурації залишається підвищений вплив на пристрої колійної автоматики та значна маса тягового привода.

4. Встановлено, що найбільш раціональним способом покращення масо-габаритних показників тягового привода є зниження маси тягового трансформатора за рахунок підвищення частоти вхідної напруги.

5. Вдосконалено структуру силової схеми ЕРС подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом. В новій схемі при живленні двигунів ЕРС від мережі змінного струму використовується ланка підвищеної частоти, яка складається із багатообмоткового трансформатора та автономних інверторів, які живлять відповідні обмотки трансформатора напругою підвищеної частоти.

На базі запропонованої структури розроблено ряд альтернативних і визначено найбільш раціональну з них за критерієм мінімуму маси та об'єму тягового привода.

6. На основі запропонованої структури розроблено схему силових кіл ЕРС подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом.

7. Визначено діапазон робочих частот ланки підвищеної частоти в залежності від струму навантаження та комутаційних властивостей силових напівпровідникових ключів. При використанні IGBT 65 класу фірми Infineon і струмах навантаження 200...600 А діапазон робочих частот ланки становить 825...2880 Гц.

8. Встановлено, що найбільш раціональним магнітом'яким матеріалом для виготовлення магнітопроводу тягового трансформатора підвищеної частоти є аморфний сплав. Застосування сплаву марки 2605НВ1М замість електротехнічної сталі марки 3407 дозволить знизити в 9 разів втрати холостого ходу трансформатора.

9. В результаті моделювання електромагнітних процесів перетворювача 4QS без зміщення по фазі моделюючих напруг встановлено, що амплітуди струмів частотами 25 Гц, 480 Гц досягають, відповідно 87 % і 71 % від допустимого рівня. В перетворювача 4QS зі зміщенням найбільш небезпечними є частоти 50 Гц та 175 Гц, які становлять 35 % і 70 % від допустимого значення. Результати моделювання електромагнітних процесів запропонованої схеми показали, що амплітуди струмів, частоти яких попадають в діапазон небезпечних і заважаючих не перевищують 8 %. Амплітудне значення психофотометричного струму не перевищує 0,8 А, що становить 16 % від допустимого значення.

10. Виконана оцінка поліпшення масо-габаритних показників показує, що застосування проміжного трансформатора дає можливість знизити питому вагу привода в 1,5...1,7 рази (в залежності від потужності трансформатора).

Основні положення і результати дисертації опубліковані в таких роботах:

Основні праці:

1. Забарило Д. О. Принципи побудови силових схем багатосистемних електровозів нового покоління / Д. О. Забарило // Локомотив-інформ. – Х., 2013. – №8 (86). – С.4-12.

2. Вісін М. Г., Забарило Д. О. Шестивісний магістральний вантажний електровоз подвійного живлення із застосуванням трансформатора з високочастотною розв'язкою та асинхронними тяговими двигунами / М. Г. Вісін, Д. О. Забарило // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна – 2011. – Вип. 36. – С. 64-69.

3. Электроподвижной состав двойного питания с асинхронными тяговыми двигателями и высокочастотным трансформатором / Н. Г. Висин, Б. Т. Власенко, Д. А. Забарило, С. Л. Марикуца, О. О. Шевчук, В. С. Крашанюк // Локомотив-інформ. - Х.: Подвижной состав. – 2014. – № 02 (92). – С. 46-48.

4. Висин Н. Г. Повышение надежности работы систем автоматического управления электропоездов: Монография [Текст] / Н. Г. Висин, Б. Т. Власенко, Д. А. Забарило/ - Дн-вск: Изд-во Маковецкой, 2012. – 256 с.

5. Вісін М. Г., Забарило Д. О. Аналіз силових схем з використанням високочастотного трансформатора для живлення асинхронних тягових двигунів електрорухомого складу / М. Г. Вісін, Д. О. Забарило // Електрифікація транспорту. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2013. – №5. – С.25-32.

6. Забарило Д. О. Перспективи застосування аморфних сплавів для тягового рухомого складу / Д. О. Забарило // Локомотив-інформ. – Х., 2014. – №7 (97). – С.44-47.

7. Забарило Д. А. Особенности расчета силового трансформатора повышенной частоты. Наука та прогрес транспорту / Д. А. Забарило // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2013. – №3(45). – С. 29-35.

8. Вісін М. Г., Забарило Д. О. Підвищення електромагнітної сумісності рейкових кіл з електрорухомим складом подвійного живлення з асинхронними тяговими двигунами та тяговою мережею М. Г. Вісін, Д. О. Забарило // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 36. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2011. – С. 64-69.

9. Забарило Д. О. Визначення частоти високочастотної ланки для перспективної схеми електрорухомого складу / Д. О. Забарило // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 5. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2014. – С. 39-47.

10. Пат. UA 72077 МПК (2012.01) H02M 7/00 Силова електрична схема електровоза подвійного живлення з асинхронними тяговими двигунами / Вісін М. Г., Забарило Д. О.; заявник та власник Дніпропетр. нац. у-нт залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. - № заявки u 2011 15043; дата заявки 19.12.2011; дата публікації 10.08.2012, Бюл. № 15.

Додаткові праці:

11. Забарило Д. О., Вісін М. Г. Підвищення ефективності електровоза подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом / Энергосбережение на железнодорожном транспорте: Материалы II Международной научно-практической конференции (Ждениево, 31 мая – 03 июня 2011 г.) – Д.: ДНУЖТ, 2011. – С. 30-31.

12. Вісін М. Г., Забарило Д. О. Шестивісний магістральний вантажний електровоз подвійного живлення з застосуванням проміжного трансформатора з високочастотною розв'язкою та асинхронними тяговими двигунами / Электрификация железнодорожного транспорта «Трансэлектро-2010»: Материалы IV Международной научно-практической конференции (Мисхор, 27-29 сентября 2010 г.) – Д.: ДНУЖТ, 2010. – С. 10-11.

13. Вісін М. Г., Забарило Д. О. Аналіз силових схем з використанням високочастотного трансформатора для живлення асинхронних тягових двигунів електрорухомого складу / Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Тезисы 73 Международной научно-практической (Днепропетровск, 23-24 мая 2013 г.) – Д.: ДИИТ, 2013. – С. 111-112.

14. Забарило Д. О. Визначення робочої частоти та вибір матеріалу магнітопроводу для високочастотного трансформатора / Электрификация транспорта «Трансэлектро-2012» Материалы VI Международной научно-практической конференции (Мисхор, 25-28 сентября 2012 г.) – Д.: ДНУЖТ. – 2012. – С. 42.

15. Забарило Д. О. Перспективи застосування аморфних сплавів для тягового рухомого складу / Энергосбережение на железнодорожном транспорте и в промышленности: Материалы V Международной научно-практической конференции (Воловец, 11-13 июня 2014 г.) – Д.: ДНУЖТ. – 2014. – С. 74-75.

16. Забарило Д. А. Особенности расчета силового трансформатора повышенной частоты / Материалы IV Международной научно-практической конференции (Воловец, 11-14 июня 2013 г.) – Д.: ДНУЖТ, 2013. – С. 44.

17. Вісін М. Г., Забарилло Д. О. Підвищення електромагнітної сумісності рейкових кіл з електрорухомим складом подвійного живлення з асинхронними тяговими двигунами / Электрификация транспорта «Трансэлектро-2011»: Материалы V Международной научно-практической конференции (Днепропетровск, 19-21 декабря 2011 г.) – Д.: ДНУЖТ, 2011. – С. 10.

18. Забарилло Д. О. Моделювання роботи чотириквadrантного перетворювача в програмному середовищі MATLAB / Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: Тезисы 74 Международной научно-практической конференции (Днепропетровск, 15-16 мая 2014 г.) – Д.: ДИИТ, 2014. – С. 158-159.

АНОТАЦІЯ

Забарилло Д. О. Підвищення ефективності електрорухомого складу подвійного живлення з тяговим асинхронним приводом. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт. Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ 2015.

Дисертація присвячена підвищенню ефективності електрорухомого складу подвійного живлення з асинхронним тяговим приводом та підвищення безпеки руху поїздів шляхом вдосконалення структури схеми силових електричних кіл.

Вдосконалено структуру силових кіл електрорухомого складу на основі якої розроблено принципову схему. Визначено діапазон раціональних частот ланки підвищеної частоти. Запропоновано та обґрунтовано використання аморфних сплавів в магнітопроводах тягових трансформаторів, що дозволить підвищити їх коефіцієнт корисної дії.

Визначено частотний спектр амплітуд струмів, які попадають в діапазон робочих частот пристроїв колійної автоматики.

Виконано оцінку ефективності структури схеми із застосуванням трансформатора підвищеної частоти.

Ключові слова: електрорухомий склад подвійного живлення, структурна схема, асинхронний привод, питома вага, трансформатор підвищеної частоти, аморфний сплав, електромагнітна сумісність.

АННОТАЦІЯ

Забарилло Д. А. Повышение эффективности электроподвижного состава двойного питания с тяговым асинхронным приводом. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 – электротранспорт. Днепропетровский

национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск 2015.

Диссертация посвящена повышению эффективности электроподвижного состава двойного питания с асинхронным тяговым приводом и повышению безопасности движения поездов путем совершенствования структуры схемы силовых электрических цепей.

Определены критерии эффективности электроподвижного состава двойного питания с асинхронным тяговым приводом – масса и габариты электропривода; степень влияния структур силовых цепей на устройства путевой автоматики.

Выполнен анализ вариантов улучшения массогабаритных показателей тягового электропривода: применения в структурах силовых цепей электроподвижного состава двойного питания с асинхронным тяговым приводом резонансных инверторов; применение трансформаторов со сверхпроводящими обмотками; применение промежуточных трансформаторов повышенной частоты.

Усовершенствована структура схемы силовых цепей электроподвижного состава двойного питания с асинхронным тяговым приводом. Предложенная структура отличается от существующих структур использованием промежуточного трансформатора повышенной частоты. При питании от сети переменного тока, в режиме тяги, ток протекает по цепи: выпрямитель, фильтр, инвертор, преобразующий выпрямленное напряжение в переменное повышенной частоты, трансформатор, выпрямитель, фильтр, автономный инвертор напряжения, асинхронный тяговый двигатель. При питании от сети постоянного напряжения ток проходит по цепи: звено постоянного напряжения, автономный инвертор напряжения, тяговый двигатель. На базе предложенной схемы были получены три альтернативные структуры: схема с трехфазными трансформаторами, схема с однофазными двухобмоточными трансформаторами, схема с однофазным одним многообмоточным трансформатором. В результате исследования установлено, что наиболее рациональной является схема с одним многообмоточным трансформатором.

Для повышения коэффициента полезного действия трансформатора повышенной частоты в качестве альтернативы электротехнической стали рассмотрены варианты применения следующих магнитомягких материалов: ферриты, магнитодиэлектрики, пермаллои, аморфные и нанокристаллические сплавы. Основные критерии отбора наиболее рационального материала: максимальные индукция насыщения и удельное сопротивление, механическая стойкость, стабильность магнитных свойств при изменении температуры. В результате определено, что наиболее подходящим при использовании в качестве материала для магнитопровода тягового трансформатора повышенной частоты является аморфный сплав.

Выполнена сравнительная оценка предложенной марки аморфного сплава с электротехнической сталью, используемой в магнитопроводах тяговых трансформаторов действующего электроподвижного состава переменного тока железных дорог Украины.

Установлено, что максимальная частота звена повышенной частоты определяется коммутационными способностями силовых полупроводниковых ключей. Определен диапазон рабочих частот звена в зависимости от мощности трансформатора. Даны рекомендации по выбору типов силовых полупроводниковых ключей для преобразователя повышенной частоты.

Выполнено моделирование электромагнитных процессов входных преобразователей переменного тока и предложенной схемы, что позволило определить частотный спектр амплитуд токов, которые попадают в диапазон рабочих частот устройств путевого автоматизации и сравнить их уровни электромагнитной совместимости.

Выполнена оценка эффективности структуры схемы с применением трансформатора повышенной частоты.

Ключевые слова: электроподвижной состав двойного питания, структурная схема, асинхронный привод, удельный вес, трансформатор повышенной частоты, аморфный сплав, электромагнитная совместимость.

ABSTRACT

Zabarilo D. A. Increase of efficiency of double feed electric rolling stock with traction induction motor drive. - Manuscript.

Dissertation on competition of scientific degree of candidate of technical sciences on specialty 05.22.09 – electric transport. Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnepropetrovsk 2015.

Dissertation is dedicated to increasing the efficiency of double feed electric rolling stock with traction induction motor drive and increasing traffic safety by improving the structure of power circuits scheme.

The structure of the power circuits was improved. Rational range of frequencies for high frequency link was determined. Amorphous alloys for using for traction transformers cores was proposed and substantiated. It will improve transformers efficiency.

The frequency spectra of current amplitudes that fall within the range of operating frequencies of the track automation devices determined.

The efficiency evaluation of structural circuit using a high frequency transformer was carried out.

Keywords: double feed electric rolling stock, structural circuit, induction motor drive, specific gravity, high frequency transformer, amorphous alloy, electromagnetic compatibility.

ДЛЯ НОТАТОК

ДЛЯ НОТАТОК

ЗАБАРИЛО ДМИТРО ОЛЕКСАНДРОВИЧ

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ
ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ З АСИНХРОННИМ ТЯГОВИМ
ПРИВОДОМ**

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Підписано до друку 23.09.2015 р. Формат 60x84/16.
Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 1,0.
Тираж 100 пр. Зам. № 604

Видавництво Дніпропетровського національного університету залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна
Свідоцтво суб'єкта видавничої діяльності ДК № 1315 від 31.03.2003

Адреса видавництва та діяльності оперативної поліграфії:
вул. Лазаряна 2, Дніпропетровськ, 49010

