

МІНІСТЕРСТВО ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

МУХА АНДРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 629.423.1:621.314

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ СТВОРЕННЯ ТЯГОВИХ
ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ БАГАТОСИСТЕМНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпропетровськ – 2011

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства інфраструктури України.

**Науковий
консультант:**

доктор технічних наук, професор
Дубинець Леонід Вікторович,
Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
Міністерства інфраструктури України,
професор кафедри автоматизованого електроприводу.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Андрієнко Петро Дмитрович,
ВАТ Український науково-дослідний інститут силових
електроніки «Перетворювач» (м. Запоріжжя),
перший заступник голови правління;

доктор технічних наук, професор
Браташ Віктор Олександрович,
Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
Міністерства інфраструктури України,
професор-консультант кафедри локомотивів;

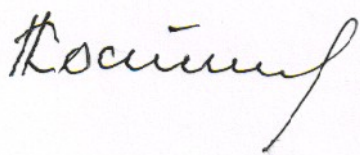
доктор технічних наук, професор
Далека Василь Хомич,
Харківська національна академія міського господарства
Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України,
завідувач кафедри електричного транспорту.

Захист відбудеться « ____ » _____ 2011 року о ____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: ауд. 314, вул. Акад. В. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, 49010.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Автореферат розіслано « ____ » _____ 2011 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 08.820.01,
д.т.н., професор



М.О. Костін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Досвід експлуатації електрифікованих залізниць в Україні показує перевагу з точки зору техніко-економічних показників системи змінного струму (25 кВ, 50 Гц) у порівнянні з системою 3 кВ постійного струму. Але переведення електрифікованих ділянок з постійного струму 3 кВ на змінний 25 кВ, 50 Гц за різними оцінками потребує від 60 до 80% від вартості побудови нової лінії, а термін окупності перевищує 15 років, що у наш час майже неможливе з економічних міркувань. Підвищення напруги у контактній мережі постійного струму до рівня 6, 12 або 24 кВ дозволить підвищити ефективність електричної тяги постійного струму. При 12 кВ постійного струму техніко-економічні показники практично такі ж, як і при 25 кВ змінного струму, тому доцільно проводити поетапне підвищення напруги постійного струму. На сьогодні стан ізоляції дозволяє підвищити напругу у контактній мережі до 6 кВ без будь-яких суттєвих витрат на її реконструкцію. Але це вимагає принципово нового енергоефективного тягового електрорухомого складу для роботи на електрифікованих ділянках як постійного струму з підвищеною напругою у контактній мережі, так і на ділянках з напругою змінного струму 25 кВ, 50 Гц.

Вказаній проблемі присвячені роботи відомих вчених: В. Е. Розенфельда, Г. И. Колпахчяна, В. П. Феоктистова, В. В. Литовченко, М. В. Панасенко, Н. А. Ротанова, М. П. Бадера та інш.

Вирішити цю проблему може впровадження багатосистемного електрорухомого складу (ЕРС), під яким розуміється ЕРС, що зможе працювати як при змінному струмі з напругою 25 кВ, так і постійному при різних рівнях напруги у контактній мережі (3, 6, 12 або 24 кВ).

Використання багатосистемного ЕРС дозволить зменшити втрати енергії у контактній мережі, збільшити плечі роботи електровозів та електропоїздів, зменшити втрати часу для заміни електровозів на станціях стикування різних енергосистем, привести ремонтно-експлуатаційну базу усіх депо та заводів до єдиної системи, спростити підготовку ремонтно-експлуатаційного складу підприємств залізничного транспорту.

У Західній Європі вже відносно давно, відповідно до систем енергопостачання електрифікованих залізниць, успішно використовують багатосистемний ЕРС.

У дисертації вперше комплексно досліджено основні задачі, пов'язані зі створенням уніфікованих надійних енергоефективних електропередач багатосистемних електровозів з урахуванням специфічних умов експлуатації тягового ЕРС на процеси у колах статичного перетворювача вказаних електропередач, а також розглянуто питання взаємодії багатосистемного електровоза з системами СЦБ та зв'язку електрифікованих ділянок залізниць. Отримані наукові результати дозволяють надати рекомендації щодо проектування та виробництва ново-

го енергоефективного багатосистемного електрорухомого складу, тягова електропередача якого базується на статичному перетворювачі підвищеної частоти.

Тому тема дисертаційної роботи є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами

Роботу виконано відповідно до головних напрямків «Комплексної програми оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020 роки», затвердженої Міністерством транспорту та зв'язку України (наказ від 14.10.2008 №1259), «Програми енергозбереження на залізничному транспорті на період 1996-2010 р.р.», розробленої Укрзалізницею у червні 1996 року і згідно з постановою Кабінету Міністрів України від 23.04.1999 №661 «Про заходи державної підтримки залізничного транспорту», а також відповідно до щорічних координаційних планів науково-дослідних та конструкторських робіт Укрзалізниці.

Обраний напрямок дослідження пов'язано з планами виконання таких науково-дослідних робіт у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна: «Розробка та дослідження напівпровідникового перетворювача тягового електропривода для перспективних електровозів подвійного живлення» (№ДР 0105U007819); «Наукове обґрунтування принципів побудови перетворювача тягового приводу багатосистемних електровозів при двигунах постійного струму» (№ДР 0107U002524); «Наукове обґрунтування принципів побудови перетворювача тягового приводу багатосистемних електровозів при вентильних двигунах» (№ДР 0109U006764); «Дослідження параметрів статичного перетворювача тягового приводу багатосистемного електровоза» (№ДР 0110U000902). Автор був керівником третьої та провідним фахівцем при виконанні інших, серед перелічених, науково-дослідних робіт.

Метою роботи є розвиток наукових основ створення тягових електропередач багатосистемних електровозів для залізниць України, що забезпечує вирішення важливої **науково-технічної проблеми** – покращення техніко-економічних показників перевізного процесу за рахунок:

- збільшення енергоефективності електрифікованих ділянок залізниць при використанні багатосистемних електровозів з більшим коефіцієнтом корисної дії та підвищенні напруги у контактній мережі постійного струму;
- ліквідування втрат часу при заміні електрорухомого складу у місцях стикування контактних мереж з різними видами живлення;
- зменшення експлуатаційних витрат на утримання електрорухомого складу при використанні уніфікованого електрообладнання та устаткування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **задачі**:

1. Провести аналіз сучасного стану та перспектив розвитку тягового електрорухомого складу й системи енергопостачання залізниць; показати доцільність створення багатосистемного ЕРС для роботи як при напрузі 3кВ, 6 кВ, 12 кВ або 24 кВ постійного струму, так і при напрузі 25 кВ, 50 Гц у контактній мережі.

2. Обґрунтувати необхідність підвищення частоти тягового перетворювача багатосистемного електровоза для забезпечення специфічних вимог до тягового електрообладнання.
3. Дослідити вплив виду тягового двигуна на основні показники та параметри перетворювача підвищеної частоти тягової електропередачі багатосистемного електровоза.
4. Створити та науково обґрунтувати структурну схему тягової електропередачі з ланкою підвищеної частоти для багатосистемного електровозу.
5. Розробити рекомендації щодо створення тягових трансформаторів підвищеної частоти та інших ланок тягового перетворювача багатосистемного електровоза з урахуванням максимальної уніфікації обладнання, забезпечення необхідної його надійності, мінімізації габаритів, маси та інших специфічних вимог для тягового електрообладнання.
6. Дослідити взаємодію перетворювача підвищеної частоти тягової електропередачі багатосистемного електровоза з колами СЦБ та зв'язку електрифікованих ділянок залізниць.
7. Дослідити взаємний зв'язок між коефіцієнтом корисної дії тягової електропередачі багатосистемного електровоза та рівнем напруги у контактній мережі.
8. Визначити енергетичну ефективність запропонованої тягової електропередачі на базі перетворювача з ланкою підвищеної частоти.

Об'єкт досліджень – процес перевезень на залізницях України.

Предмет досліджень – тягові електропередачі багатосистемних електро-
возів.

Методи досліджень

Для вирішення поставлених задач у роботі використано: методи теорії електричної тяги; методи та положення теорії надійності; принципи моделювання електромеханічних систем; методи техніко-економічного аналізу; положення та методи теорії уніфікації електрообладнання; положення та методи теорії ймовірностей та математичної статистики. Теоретичні розрахунки та статистичну їх обробку проведено з використанням прикладних програм на ПЕОМ.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються

Основні наукові положення, висновки і рекомендації, які містяться в дисертації, достатньо обґрунтовані та вірогідні, оскільки:

- експериментальні дослідження коректно поставлено та кваліфіковано виконано, а розбіжність теоретичних розрахунків і дослідних даних не перевищує загальноприйнятих значень;
- теоретичні розрахунки виконано на ПЕОМ з похибкою $\sim 10^{-6}$, а дослідні результати одержано на основі великого обсягу реального фактичного

матеріалу з подальшою обробкою методами математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів

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

1. Вперше запропоновано науково обґрунтовану структурну схему статичного перетворювача підвищеної частоти для тягової електропередачі багатосистемного електровоза, яка, на відміну від існуючих схем, може бути використана при різних сполученнях напруг у контактній мережі як змінного, так і постійного струмів та при різних типах тягових двигунів, що забезпечує підвищення коефіцієнта корисної дії системи енергопостачання електрифікованих залізниць.
2. Розроблено склад модуля тягового перетворювача, який, на відміну від складу діючих перетворювачів, забезпечує ефективну роботу тягової електропередачі багатосистемних електровозів при будь-якому сполученні напруг з ряду 3, 6, 12 або 24 кВ постійного струму та 25 кВ змінного струму, при забезпеченні достатньої надійності та рівня уніфікації тягового перетворювача.
3. Вперше обґрунтовано доцільність застосування в багатосистемних електровозах тягових трифазних трансформаторів підвищеної частоти, що дозволить використання класу ізоляції тягового електрообладнання не вище того, який застосовується на даний час, що можливе за рахунок відповідного з'єднання елементів вхідного контуру перетворювача, при необхідній напрузі на первинній обмотці трансформатора.
4. Запропоновано показник «струм-клас» для силових напівпровідникових елементів при розрахунку цільової функції, що дозволяє визначити оптимальну, з точки зору реальних параметрів елементної бази, перетворювальну структуру для тягової електропередачі багатосистемних електровозів.
5. Встановлено закономірності впливу діапазону робочих напруг, виду елементної бази та системи охолодження на питомий об'єм перетворювача (об'єм на одиницю потужності), які можуть бути використані при створенні тягових перетворювачів з мінімальним об'ємом при заданій потужності.
6. Вперше обґрунтовано раціональний діапазон робочих частот (від 519 до 2076 Гц) тягового трансформатора підвищеної частоти в залежності від його потужності та матеріалу магнітопроводу, що дозволяє забезпечити мінімальні габарити трансформатора та електромагнітну сумісність з пристроями СЦБ та зв'язку у стаціонарних режимах роботи.

Практичне значення отриманих результатів

Запропоновані структурні та функціональні схеми, отримані співвідношення та інші результати досліджень можуть бути рекомендовані до використання при розробці статичних перетворювачів підвищеної частоти тягової електропередачі багатосистемних електровозів, що дозволить:

- створити уніфіковані надійні статичні перетворювачі підвищеної частоти для тягової електропередачі багатосистемних електровозів;
- підвищити енергоефективність електрифікованих залізниць;
- зменшити експлуатаційні витрати на утримання електровозів при використанні уніфікованого електрообладнання та устаткування;
- забезпечити електромагнітну сумісність обладнання тягової електропередачі багатосистемного електровозу з колами сигналізації, централізації та блокування, тобто підвищити безпеку руху поїздів.

Результати досліджень впроваджено в локомотивному господарстві Укрзалізниці, на Запорізькому електровозоремонтному заводі (ПАТ «ЗЕРЗ»), у навчальний процес Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна при вивченні дисципліни «Силові перетворювачі автоматизованих електроприводів».

Особистий внесок здобувача

Автор разом з науковим консультантом сформулював мету, задачі досліджень. Основні наукові положення, результати теоретичних та експериментальних досліджень дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Крім того, в публікаціях, в яких відображено основні результати дисертації та які написані у співавторстві, здобувачу належать: [1] – проведення досліджень з метою визначення видів силових напівпровідникових приладів для силових кіл електрорухомого складу; [2] – ідея використання трансформаторів підвищеної частоти у складі тягового перетворювача для зменшення маси електрообладнання електровоза; [3] – метод та критерії визначення раціонального діапазону частот для покращення масо-габаритних показників електрообладнання електровозів; [4] – проведення порівняльного аналізу використання тягових двигунів різних видів на електрорухомому складі; [5] – метод обробки експериментальних результатів та розробка рекомендацій щодо вибору системи охолодження та елементної бази для тягових статичних перетворювачів; [6] – схема силових частини тягового перетворювача та відповідні співвідношення; [7] – визначення методів дослідження впливу підвищення напруги на зменшення величини втрат енергії; [20] – визначення раціональної структури перетворювача для багатосистемного електровоза; [21, 22] – ідея роботи; [23] – визначення напрямків удосконалення тягових електропередач багатосистемних електровозів; [24] – визначення методів зменшення впливу вентильних перетворювачів на тягову мережу; [25] – ідея використання дволанкового тягового перетворювача з підвищеними енергетичними показниками; [26] – ідея роботи, визначення основних показників; [27] – проведення досліджень з визначення впливу тягової мережі підвищеної напруги на рейкові кола; [28] – визначення методів досліджень; [29] – визначення напрямку досліджень та запропоновані матеріали для магнітопроводів трансформаторів підвищеної частоти; [30] – ідея роботи та перелік режи-

мів роботи перетворювача, які досліджуються;

Роботи [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 31, 32, 33, 34] написано автором самостійно.

Апробація результатів дисертації

Основні положення та результати доповідались й отримали схвалення на таких Міжнародних науково-практичних конференціях: LXVI-й «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпропетровськ, 2006; першій «Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті», Дніпропетровськ, 2007; LXVII-й «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпропетровськ, 2007; «Транспортні зв'язки. Проблеми та перспективи», Дніпропетровськ, 2008 р.; II-й «Електрифікація залізничного транспорту», Дніпропетровськ, 2008 р.; II-й «Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті», Дніпропетровськ, 2009; III-й «Транселектро 2009», Дніпропетровськ, 2009; «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика», Львів, 2009; IV-й «Транселектро 2010», Дніпропетровськ, 2010; III-й «Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті», Дніпропетровськ, 2010; 70-й «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпропетровськ, 2010; I-й «Енергозбереження на залізничному транспорті», Дніпропетровськ, 2010; 71-й «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпропетровськ, 2011.

Дисертація в повному обсязі доповідалась на науковому семінарі кафедри автоматизованого електропривода, міжкафедральному науковому семінарі кафедр: автоматизованого електропривода, теоретичних основ електротехніки, електрорухомого складу, електропостачання залізниць, локомотивів, вагонів Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (Дніпропетровськ, 2011 р.).

Публікації

Результати дисертаційної роботи опубліковано в 34 наукових працях, у тому числі: 20 – у фахових виданнях, 2 – патентах на корисну модель, 12 – тезах доповідей та матеріалах конференцій.

Структура та обсяг роботи

Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків, переліку використаної літератури та дванадцяти додатків. Основний текст роботи викладено на 334 сторінках. Дисертація містить 126 рисунків і 78 таблиць; таблиці та рисунки, розташовані на окремих сторінках, займають 18 сторінок. Список літератури з 243 найменувань наведено на 28 сторінках.

Дисертацію оформлено у вигляді двох томів. Обсяг першого тому (основна частина) – 362 сторінки; обсяг другого тому (додатки) – 222 сторінки.

Повний обсяг дисертації 584 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі досліджень, наведено основні наукові положення і результати, що винесено на захист, а також подано відомості про практичне значення результатів роботи, апробацію та публікації матеріалів досліджень.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан тягового рухомого складу та перспективи розвитку системи тягового електропостачання залізниць України. Розглянуто тягові електропередачі сучасного багатосистемного електрорухомого складу ведучих фірм виробників. Визначено напрямки удосконалення електрорухомого складу залізниць України та приведена постановка задач досліджень.

Для оцінки енергетичної ефективності будь-якої електротехнічної чи електромеханічної системи використовують, у першу чергу, коефіцієнт корисної дії (ККД). До складу системи енергопостачання електрифікованих залізниць входять: електростанції, розподільні електромережі, тягові підстанції, тягові електричні мережі та електрорухомий склад. Останні три елементи відносяться до енергетичної системи електрифікованих залізниць. Як відомо, середній ККД основних складових частин та його результуюче значення $\eta_{\text{ес}}$ енергетичної системи електрифікованих залізниць визначають як:

$$\eta_{\text{ес}} = \eta_{\text{тп}} \cdot \eta_{\text{тм}} \cdot \eta_{\text{ерс}}, \quad (1)$$

де: $\eta_{\text{тп}}$ - ККД тягової підстанції; $\eta_{\text{тм}}$ - ККД тягової мережі; $\eta_{\text{ерс}}$ - ККД електрорухомого складу (електровозів).

Для вітчизняних електрифікованих на постійному струмі залізниць з ККД тягових підстанцій $\eta_{\text{тп}} = 0,95$ та тягової мережі $\eta_{\text{тм}} = 0,88$, при наявному електрорухомому складі з ККД $\eta_{\text{ерс}} = 0,87$, середній ККД енергетичної системи буде дорівнювати 73 %. Аналогічно, для залізниць, електрифікованих на змінному струмі, при $\eta_{\text{тп}} = 0,98$, $\eta_{\text{тм}} = 0,92$ та $\eta_{\text{ерс}} = 0,82$ середній ККД енергетичної системи буде дорівнювати 74 %. Мала різниця (87 % – 82 % = 5 %) між ККД енергетичних систем змінного та постійного струмів визначається, в першу чергу, відносно низьким середнім ККД електрорухомого складу змінного струму, у порівнянні з електрорухомим складом постійного струму.

Тягова електропередача електровозів змінного струму українського та російського виробництва, які експлуатуються на залізницях України, складаються за класичною структурою: «трансформатор – випрямляч – тяговий двигун постійного струму – тягова зубчаста передача» або «трансформатор – випрямляч – інвертор – асинхронний тяговий двигун – тягова зубчаста передача» (тут, і надалі, під терміном «тягова електропередача електровоза» розуміється сукупність його складових частин призначених для перетворення електричної енергії, яку електровоз отримує з контактної мережі, у механічну енергію на валу при-

водної колісної пари). Втрати потужності у тяговому трансформаторі та дроселі складають приблизно 4,5 %, тобто ККД дорівнює $\eta_{\text{тт}} = 95,5 \%$; при втратах у випрямлячі на рівні 1% його ККД складає $\eta_{\text{в}} = 99 \%$; при втратах у інверторі на рівні 3% його ККД дорівнює $\eta_{\text{і}} = 97 \%$; ККД тягового двигуна постійного струму складає $\eta_{\text{тдпс}} = 94 \%$, а змінного струму (асинхронного) $\eta_{\text{атд}} = 91 \%$; ККД тягової зубчастієї передачі дорівнює $\eta_{\text{тзп}} = 97,5 \%$. При таких значеннях ККД складових частин, сумарний ККД тягової електропередачі електровозу змінного струму при тягових двигунах постійного струму буде дорівнювати:

$$\eta_{\text{тп тдпс}} = \eta_{\text{тт}} \cdot \eta_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{тдпс}} \cdot \eta_{\text{тзп}} = 0,955 \cdot 0,99 \cdot 0,94 \cdot 0,975 \approx 0,87. \quad (2)$$

При двигунах змінного струму (асинхронних) сумарний ККД тягової електропередачі електровоза змінного струму буде дорівнювати:

$$\eta_{\text{тп атд}} = \eta_{\text{тт}} \cdot \eta_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{і}} \cdot \eta_{\text{атд}} \cdot \eta_{\text{тзп}} = 0,955 \cdot 0,99 \cdot 0,97 \cdot 0,91 \cdot 0,975 \approx 0,81. \quad (3)$$

Відносно низьке значення ККД тягової електропередачі електровоза змінного струму з асинхронними тяговими двигунами обумовлено наявністю додаткового елемента – інвертора та відносно низьким ККД асинхронного тягового двигуна.

Тягова електропередача сучасних електровозів європейського виробництва, в яких використовуються чотирьохквADRANTні перетворювачі та асинхронні тягові двигуни, мають структуру: «трансформатор – перетворювач частоти з ланкою постійного струму – асинхронний тяговий двигун – тягова зубчаста передача». Втрати потужності у тяговому трансформаторі та дроселі складають приблизно 3% ($\eta_{\text{тт}} = 97 \%$); перетворювачі частоти з ланкою постійного струму - 7,75% ($\eta_{\text{пч}} = 92,25 \%$); в асинхронному тяговому двигуні - 3,5% ($\eta_{\text{атд}} = 96,5 \%$); втрати у тяговій зубчастій передачі - 1,25% ($\eta_{\text{тзп}} = 98,5 \%$). При таких значеннях втрат сумарний ККД тягової електропередачі електровоза змінного струму європейського виробництва з асинхронними тяговими двигунами буде дорівнювати:

$$\eta_{\text{тп атд імп}} = \eta_{\text{тт}} \cdot \eta_{\text{пч}} \cdot \eta_{\text{тзп}} \cdot \eta_{\text{атд}} = 0,97 \cdot 0,9225 \cdot 0,985 \cdot 0,965 \approx 0,85. \quad (4)$$

Відносно високе значення ККД тягової електропередачі електровозів змінного струму європейського виробництва з асинхронними тяговими двигунами обумовлено використанням тягової зубчастієї передачі, тягового двигуна та трансформатора з більш високим значенням ККД, які компенсують високе значення втрат у перетворювачі частоти. Також використання чотирьохквADRANTного перетворювача дозволило отримати коефіцієнт потужності перетворювача близьким до одиниці.

Виходячи з виразу (1), збільшити енергоефективність електрифікованих залізниць можливо відповідним підвищенням ККД: тягових підстанцій, контактної мережі та тягової електропередачі електровозів постійного (змінного) стру-

му.

Саме питанню створення тягових електропередач багатосистемних електровозів з покращеними енергетичними показниками присвячена представлена дисертаційна робота. Коефіцієнт корисної дії перспективних електровозів постійного струму повинен бути не менше 90%, а змінного струму - 88%. Існуючий тяговий електрорухомий склад є морально застарілим та фізично зношеним та характеризується низьким коефіцієнтом корисної дії тягової електропередачі. При використанні сучасних електровозів постійного та змінного струму з кращими енергетичними показниками ККД енергосистеми постійного струму зросте на 4%, а змінного струму – 5%. Не потребує доказів той факт, що система 3 кВ постійного струму вичерпала свої можливості, оскільки підвищення потужності локомотивів (підвищення струмового навантаження) призводить до зниження напруги у контактній мережі, що зменшує пропускну здатність завантажених ділянок. Модернізувати систему тягового електропостачання 3 кВ постійного струму можливо двома напрямками:

1) переведенням електрифікованих ділянок на змінний струм напругою 25 кВ промислової частоти 50 Гц;

2) підвищенням напруги у контактній мережі постійного струму до рівня 6 кВ, 12 кВ або 24 кВ, що дозволить зменшити струмове навантаження та підвищити пропускну здатність цих електрифікованих ділянок.

З технічної точки зору другий напрямок є можливим при відносно малих витратах, тому що розробниками закладено запас по напрузі для ізоляторів та комутуючої апаратури. При збільшенні напруги у контактній мережі постійного струму зростає ККД тягової мережі, а тому і ККД енергосистеми електрифікованих на постійному струмі залізниць також зростає.

Таке впровадження вимагає використання відповідного електрорухомого складу постійного струму, який би зміг працювати як при традиційних 3 кВ у контактній мережі так і при підвищеній напрузі. Цей новий електровоз постійного струму повинен мати номінальні напруги: 3/6 кВ або 3/12 кВ або 3/24 кВ. Якщо при цьому забезпечити можливість створення уніфікованої платформи тягової електропередачі як для нових електровозів постійного струму з підвищеною напругою, так і для електровозів змінного струму напругою 25 кВ частотою 50 Гц, реально створюються умови для зменшення експлуатаційних витрат на обслуговування таких уніфікованих локомотивів, оскільки зменшиться кількість типоміналів запасних частин та буде встановлено єдину технологічну карту ремонтів для всіх депо, які будуть експлуатувати цей багатосистемний електрорухомий склад.

У другому розділі з урахуванням параметрів контактної мережі та виду тягових двигунів запропоновано структури перетворювачів для тягової електропередачі багатосистемних електровозів на базі трансформаторів підвищеної частоти. В цих системах при створенні тягового перетворювача використовується принцип еквівалентних фаз, які працюють зі зсувом по відношенню одна до одної.

Номенклатура і вартість сучасної силової напівпровідникової елементної бази дозволяє ставити задачу розробки уніфікованих перетворювачів для багатосистемного електрорухомого складу. Очевидно, що при цьому виникає задача зменшення маси та габаритів тягового електрообладнання, що зумовлено необхідністю розміщення на багатосистемному електровозі додаткового обладнання у порівнянні з односистемним. У значній мірі остання задача може бути вирішена за рахунок підвищення частоти тягового трансформатора, вага якого складає суттєву частину від маси усього електрообладнання електровоза.

Проведено аналіз «інтенсивності» (у %) змін лінійних розмірів $l(f)$ та маси $m(f)$ у відношенні до зміни частоти за допомогою таких співвідношень:

$$\Delta l(f'') = \frac{l' - l''}{l'}, \quad (5)$$

$$\Delta m(f'') = \frac{m' - m''}{m'}, \quad (6)$$

де: $\Delta l, \Delta m$ - зміна параметра при зростанні частоти f у діапазоні від f' до $f'' = f' + \Delta f$, при $\Delta f = 50$ Гц; l', m'' - відносні лінійні розміри та маса при частоті f'' ; l', m' - відносні лінійні розміри та маса при частоті f' .

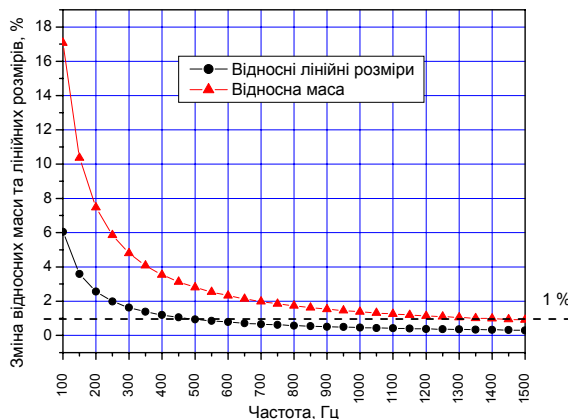


Рис. 1 - Залежності інтенсивності зміни відносних маси та лінійних розмірів тягового трансформатора від частоти струму.

Зі збільшенням робочої частоти до 500 Гц інтенсивність відносного зменшення лінійних розмірів стає меншим за 1 % (цей рівень прийнято за достатній, з точки зору зменшення лінійних розмірів і маси, та позначено на рис. 1 пунктирною лінією), а інтенсивність відносного зменшення маси досягає рівня 1 % при частоті 1400 Гц.

З точки зору структури та функцій тягового статичного перетворювача класичної структури, використання

як тягового двигуна постійного струму послідовного збудження вимагає використання керованого випрямляча (при живленні від мережі змінного струму) або імпульсного перетворювача при живленні від мережі постійного струму.

Використання керованого однофазного випрямляча не дозволяє отримати значення коефіцієнта потужності перетворювача більше 0,9, навіть при використанні зоно-фазового керування, та вимагає використання 4QS перетворювачів при живленні від мережі змінного струму. При застосуванні трифазного керованого випрямляча для живлення тягового двигуна постійного струму коефіцієнт потужності може сягати значення 0,955. Загально відомо, що з точки зору

якості випрямленої напруги трифазні випрямлячі також мають суттєві переваги у порівнянні з однофазними. Так, напруга на виході однофазного двопульсового некерованого випрямляча характеризується коефіцієнтом пульсацій на рівні 67%, а трифазна шестипульсова – 5,7%.

При підвищеній напрузі у контактній мережі постійного струму, незалежно від виду тягового двигуна, статичний перетворювач повинен забезпечити необхідне регулювання напруги живлення цього двигуна. В цілому саме тяговий статичний перетворювач забезпечує принцип багатосистемності електровоза, тому у дисертаційній роботі основна увага приділена проблемі побудови цього перетворювача з урахуванням виду тягового двигуна та параметрів контактної мережі.

Для проведення подальших досліджень питань, пов'язаних зі створенням тягової електропередачі, введено поняття «силовий модуль», який уявляє собою складову частину тягового статичного перетворювача, що за потужністю відповідає певній кількості тягових двигунів, і яка є частиною тягової електропередачі електровоза. Тяговий статичний перетворювач може мати один або декілька силових модулів.

Як відомо, модульний принцип побудови складних електромеханічних та інших систем дозволяє зменшити вартість виробництва та утримання цих систем за рахунок використання уніфікованого обладнання. Використання модульного принципу при створенні тягової електропередачі електровозів дозволить створювати уніфіковані системи з можливістю нарощування потужності без суттєвих змін у схемах. У подальших дослідженнях приймаємо, що багатосистемний електровоз виконано як односекційний, кожна з осей електровоза має свій тяговий двигун.

Односекційні електровози традиційно виконують у 4-вісному, або 6-вісному виконанні. Виходячи з цього на 4-вісному електровозі можливо використовувати модулі типів M1, M2, M4, а на 6-вісному: M1, M2, M3, M6. Тобто, тягова електропередача 4-вісного електровоза може складатися з 4 модулів M1, або 2 модулів M2, або одного M4. Аналогічно для 6-вісного електровозу: 6 модулів M1, 3 модуля M2, 2 модуля M3 або один модуль M6. Найбільший ефект відносно зменшення потужності силового модуля, при використанні асинхронних тягових двигунів дає комплектування тягового перетворювача з модулів типу M1, використання яких є також привабливим з точки зору надійності тягової електропередачі електровоза у цілому, оскільки вихід з ладу одного модуля M1 призведе до виключення з роботи тільки одного тягового двигуна. Використання ж модулів типу M4 (для 4-вісного електровозу) або типу M6 (для 6-вісного електровозу) є недоцільним з вказаної точки зору надійності тягової електропередачі у цілому. Тобто, до функцій статичного перетворювача тягової електропередачі багатосистемного електровозу додається ще одна – підвищення робочих частот. Враховуючи вищевикладене, автором пропонуються наступні структурні схеми тягової електропередачі багатосистемного електровозу з різними видами тягових двигунів (рис. 2, 3). які складаються з двох контурів:

мережевого та тягового (з двигунами постійного або змінного струмів).

Перший контур призначено для перетворення електричної енергії з контактної мережі в напругу змінного струму підвищеної частоти, яку знімаємо зі вторинної обмотки трансформатора підвищеної частоти, і тому має відповідний склад.

Узгодження рівнів робочих напруг виконує саме мережевий контур. Це здійснюється за допомогою трансформатора підвищеної частоти (блок 4 на рис. 3 та 4). Первинна обмотка цього трансформатора увімкнена до виходу високовольтного інвертора (блок 3 на рис. 2 та 3), вхід якого увімкнено до контактної мережі постійного струму, або до виходу випрямляча (керованого або некерованого) (блок 1 на рис. 2 та 3) при змінному струмі у контактній мережі.

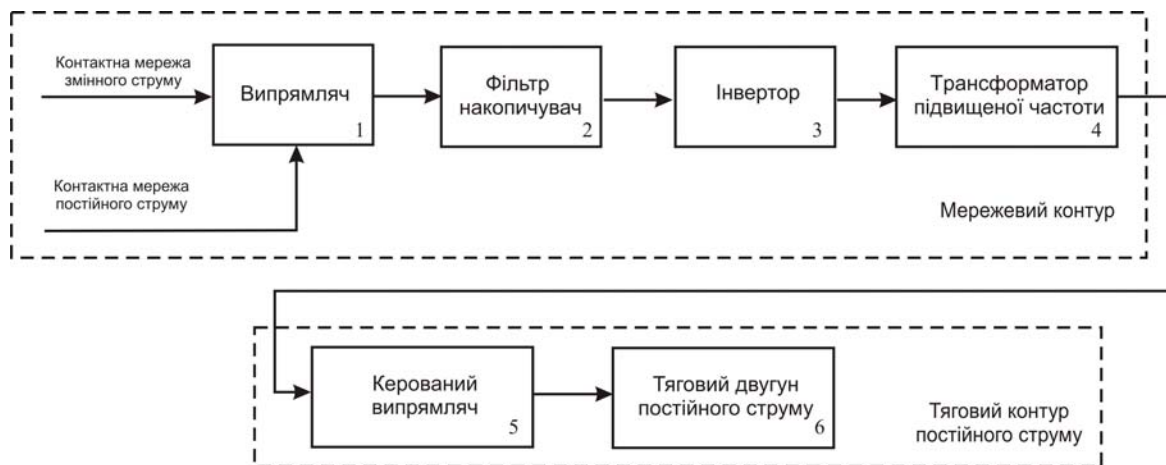


Рис. 2 - Узагальнена структурна схема тягової електропередачі з тяговими двигунами постійного струму та ланкою підвищеної частоти.

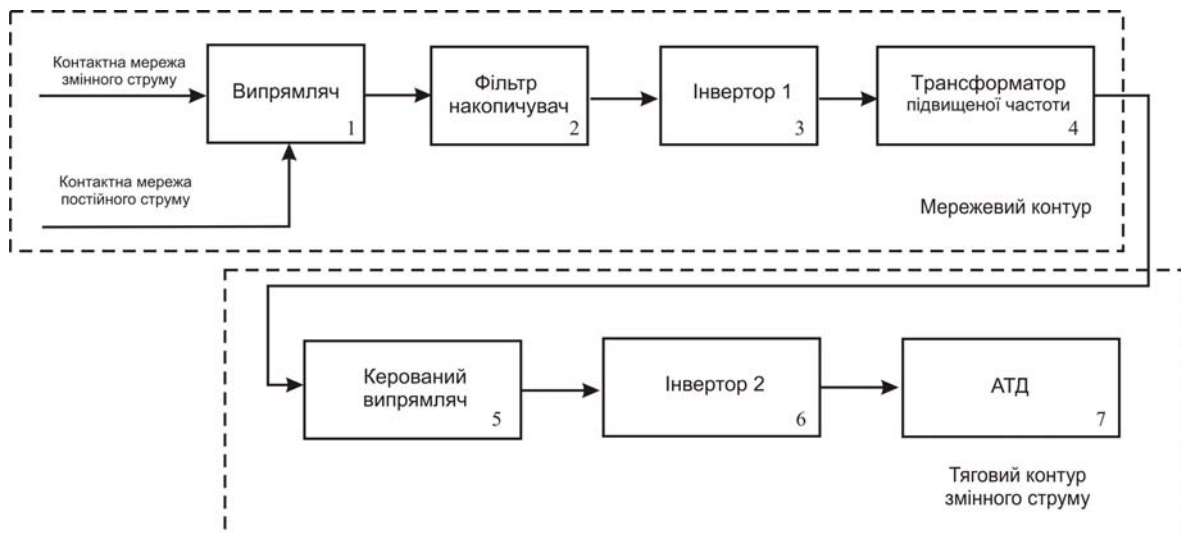


Рис. 3 - Узагальнена структурна схема тягової електропередачі з асинхронними тяговими двигунами та ланкою підвищеної частоти.

Використання некерованого випрямляча, увімкненого до контактної мережі змінного струму, дозволить виключати вплив кута комутації ключових елементів вхідного перетворювача на енергетичні показники електровоза, що

має місце при застосуванні керованого випрямляча. Використання керованого випрямляча дозволить реалізувати рекуперативне гальмування, з поверненням енергії до контактної мережі. Підтримка напруги мережевого контуру на заданому рівні здійснюється інвертором. Для стабілізації напруги на вході інвертора використовується фільтр-накопичувач (блок 2 на рис. 2 та 3). Як бачимо, структурні схеми, що представлені на рис. 2 та 3, мають однакові мережеві контури, структура яких не залежить від виду тягового двигуна електровоза. Цей контур відповідає за реалізацію багатосистемності електровоза.

Тяговий контур, представлений на рис. 2 та 3 структурних схем, відповідає за регулювання режимів роботи тягових двигунів. При використанні тягового двигуна постійного струму (блок 6 на рис. 2) для його живлення можливо використовувати керований випрямляч (блок 5), увімкнений до вторинної обмотки трансформатора підвищеної частоти (блок 4). Керування режимами роботи тягового двигуна можливо за рахунок зміни режимів роботи керованого випрямляча (блок 5) та інвертора (блок 3), який визначає напругу на виході трансформатора підвищеної частоти (блок 4).

При використанні тягового двигуна змінного струму (блок 7 на рис. 3), наприклад, трифазного асинхронного двигуна, до складу тягового контуру змінного струму входить керований випрямляч (блок 5) та трифазний інвертор 2 (блок 6). Ці два блоки складають так званий трифазний автономний інвертор напруги, який широко застосовується у частотно-регульованих електроприводах. У цьому випадку режимами роботи тягового двигуна можливо керувати за допомогою трьох елементів структурної схеми: керованого випрямляча (блок 5) й інверторів 1 (блок 3) та 2 (блок 6).

Структурні схеми тягових електропередач, які представлені на рис. 2 та 3, дозволяють реалізувати такі напрямки покращення якості споживаної електричної енергії:

- використання багатофазних перетворювачів, що працюють зі зсувом за фазою відносно один одного;
- використання при перетворенні електричної енергії підвищеної частоти.

Використання багатофазних систем з ланкою підвищеної частоти дозволяє зменшити масогабаритні показники фільтрів і трансформатора. Крім того, в подібних багатофазних системах є можливість керувати струмами та напругами, які перевищують максимально допустимі параметри одиночних силових елементів перетворювача.

Приймаємо запропоновані структурні схеми, що представлені на рис. 2 та 3, як базові для подальших досліджень. На базі цих структур запропоновано 58 перетворювальних структур із різними видами тягових двигунів, які призначені для роботи з контактною мережею, що має різні параметри.

Представимо структурну схему перетворювальної структури, яка забезпечує режим роботи: 25 кВ змінного та 3 кВ постійного струму при 6 АТД (асинхронних тягових двигунах) з використанням трансформаторів підвищеної

частоти (рис. 4). На рис. 4: ПР – перемикач режимів (напруга змінного $\square U_M$ (25 кВ, 50 Гц) або постійного $= U_M$ (3 кВ) струмів); МВ – випрямляч мережевого контуру; ФН – фільтр-накопичувач; МІ – інвертор мережевого контуру; ТТПЧ – трифазний трансформатор підвищеної частоти; ТВ – випрямляч тягового контуру; АТД – асинхронний тяговий двигун.

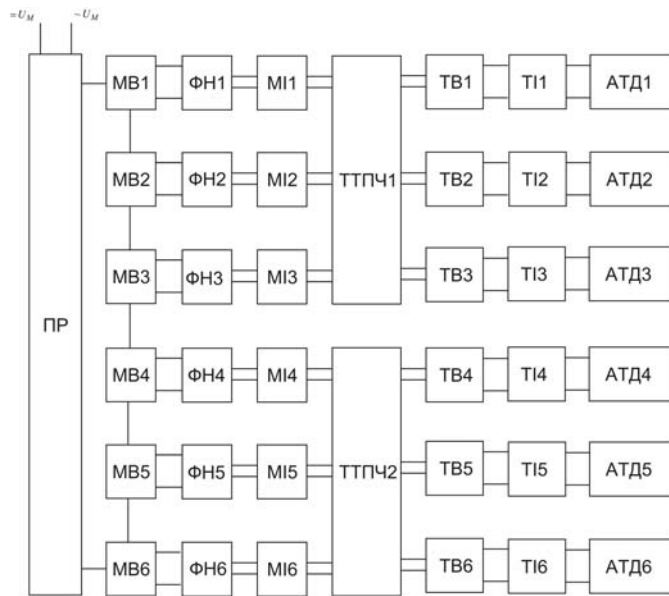


Рис. 4 - Структура тягового перетворювача для режиму: 25 кВ змінного та 3 кВ постійного струму при 6 АТД з використанням трифазного трансформатора підвищеної частоти (ТТПЧ).

електровозів пропонується така їх класифікація (яка надалі представлена терміном - тип перетворювача), яка враховує:

1) кількість та вид тягового двигуна: 4А – чотири асинхронних тягових двигуни (АТД); 6А – шість АТД; 4Т – чотири двигуни постійного струму (ТДПС); 6Т – шість ТДПС;

2) тип силового модуля: М1, М2, М3, М4, М5 або М6;

3) тип трансформатора підвищеної частоти: 1Ф – однофазний; 3Ф – трифазний;

4) схему з'єднання входних випрямлячів мережевого контуру за формулою $m \times a$, де m – кількість паралельних груп послідовно з'єднаних мережевих випрямлячів; a – кількість послідовно з'єднаних мережевих випрямлячів.

Остання позиція – схема з'єднання входних випрямлячів забезпечує реалізацію багатосистемності електровоза. Тобто, змінюючи цю схему, є можливість підтримувати рівень робочої напруги елементів мережевого контуру перетворювача на приблизно постійному рівні при різних значеннях напруги у контактній мережі як постійного, так і змінного струмів.

Наприклад, тяговий статичний перетворювач для живлення чотирьох асинхронних тягових двигунів, побудований на базі силових модулів типу М2

У запропонованих структурних схемах реалізувати збільшення кількості фаз перетворювача для покращення його енергетичних показників можливо за рахунок з'єднання в трифазну систему вторинних обмоток однофазних трансформаторів підвищеної частоти ТПЧ (при одночасній реалізації зсуву напруг первинних обмоток цих трансформаторів на 120 ел. градусів). Використання трифазної системи, у порівнянні з однофазною, дозволить зменшити габаритну потужність трансформаторів на 14,6%.

В залежності від структури перетворювача тягової електропередачі багатосистемних

(тобто два тягових двигуна на один силовий модуль) з використанням трифазних трансформаторів підвищеної частоти, в складі якого використовуються шість мережевих випрямлячів, буде класифіковано: перетворювач типу 4А-М2-3Ф-2м3а.

Запропоновані структури статичного перетворювача тягової електропередачі з ланкою підвищеної частоти містять у собі відносно велику кількість функціональних елементів. Ці елементи в залежності від параметрів контактної мережі та виду тягового двигуна можуть по-різному з'єднуватися: паралельно, послідовно, послідовно-паралельно. Для вибору раціональної структури статичного перетворювача підвищеної частоти тягової електропередачі багатосистемного електровоза потрібно вирішити питання, пов'язані з покращенням експлуатаційних показників перетворювача: ремонтпридатність, довговічність, безвідмовність та інші. Визначення цих показників вимагає наявності значної кількості інформації щодо відмов обладнання, умов експлуатації обладнання, якості виконання ремонтів та ін. Все це разом визначає експлуатаційну надійність тягового перетворювача або будь-якого іншого обладнання та вимагає проведення достатньо складних досліджень. Серед тягових перетворювачів, які експлуатуються на даний час на електрорухомому складі залізниць України, перетворювачів, створених за структурною схемою, яка запропонована у цій роботі, немає. Ця обставина обумовлює необхідність проведення теоретичних досліджень пов'язаних, із визначенням та порівнянням структурної надійності різних запропонованих перетворювальних структур, під якою розуміємо результуючу надійність пристрою при відомих структурній схемі та значеннях надійності елементів його структурної схеми.

Приймаємо, що перетворювач пройшов період припрацювання, потік відмов є елементарним та старіння елементів відсутнє. Тоді для визначення імовірності безвідмовної роботи використаємо експоненціальний закон розподілення, оскільки його найбільш часто використовують для оцінки рівня безвідмовної роботи систем, що створюються вперше, тобто:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (7)$$

де λ – інтенсивність відмов функціонального вузла, або елемента перетворювача.

Наприклад, на рис. 5 представлена схема для дослідження структурної надійності перетворювача типу 4А-М1-1Ф-1м4а. Графік залежності $P_{\Sigma}(t)$ у часі для перетворювача типу 4А-М1-1Ф-1м4а представлено на рис. 6. Щодо кількісної оцінки структурної надійності запропонованих перетворювачів, то приймаємо таке: як порівняльний критерій (розрахунковий показник надійності) пропонується використовувати значення часу, за який рівень імовірності безвідмовної роботи перетворювача досягне значення 0,95. На рис. 7 представлені значення часу досягнення імовірністю безвідмовної роботи рівня 0,95 для перетворювачів, призначених для живлення 4 АТД. Для порівняння отриманих результатів досліджень використовуємо середнє значення терміну часу

$T_{сер}(0,95)$ досягнення рівня безвідмовної роботи рівня $P(t)=0,95$ для всіх N типів перетворювачів дорівнює, яке за відповідними розрахунками дорівнює 10747 год.

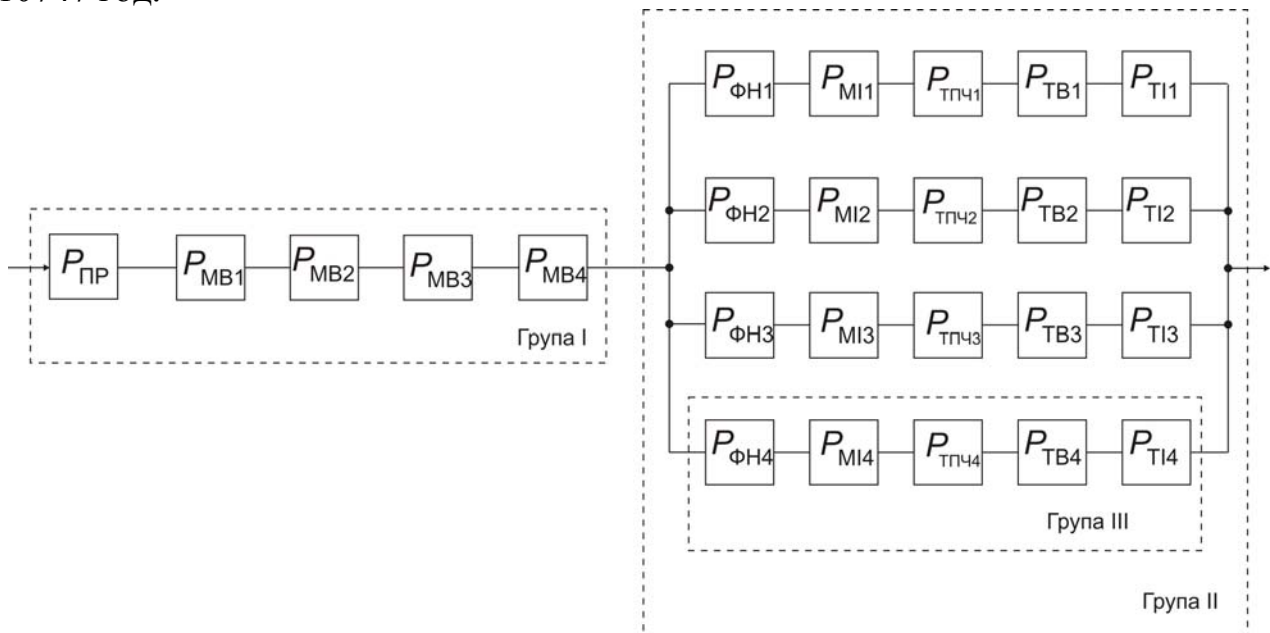


Рис. 5 - Схема для дослідження структурної надійності перетворювача типу 4А-М1-1Ф-1м4а.

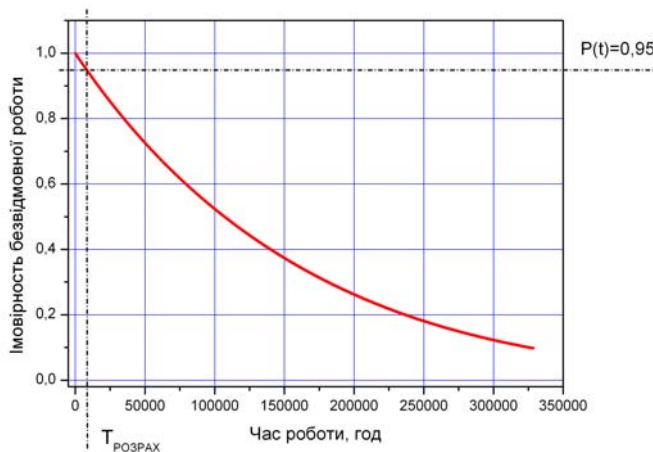


Рис. 6 - Графік залежність $P_{\Sigma}(t)$ у часі, для перетворювача типу 4А-М1-1Ф-1м4а.

рівень безвідмовної роботи перетворювачів з АТД, наявність додаткового елемента системи (тягового інвертора), у порівнянні з перетворювачами для ТДПС, показали що наявність додаткового елемента (тягового інвертора) в перетворювальних структурах 4А та 6А, призводить до зменшення часу досягнення імовірністю безвідмовної роботи рівня $P(t)=0,95$ у межах 3%.

Виходячи з результатів проведених досліджень зроблено такий висновок: на рівень безвідмовної роботи перетворювальних структур, які досліджуються,

Серед запропонованих перетворювальних структур, які мають відносно високі показники структурної надійності, слід виділити перетворювачі, мережеві випрямлячі яких складаються з одної (1а) або трьох (3а) послідовних ланок. Тому для побудови перетворювачів тягової електропередачі багатосистемних електровозів доцільно використовувати структури з цим поєднанням мережевих випрямлячів.

Дослідження впливу на

основний вплив має схема ввімкнення мережевих випрямлячів, оскільки поєднання інших елементів представлених структурних схем мало різниться одне від одного в різних структурах. Структури з максимальною кількістю послідовно з'єднаних мережевих випрямлячів (1м6а, 1м9а, 1м12а, 1м18а) характеризуються найменшим терміном часу досягнення імовірністю безвідмовної роботи рівня $P(t) = 0,95$. Тобто, використовувати структури з таким поєднанням мережевих випрямлячів недоцільно.

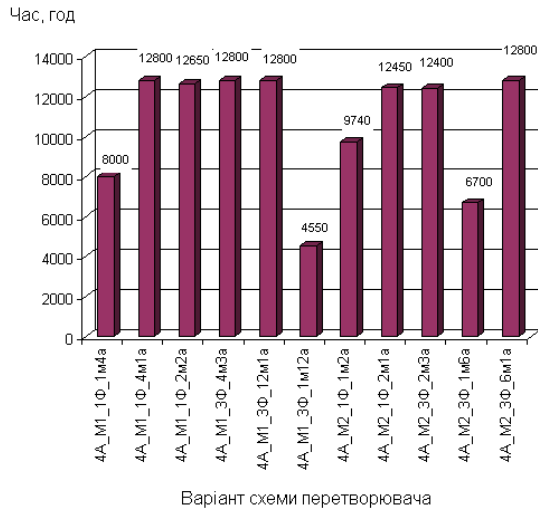


Рис. 7 - Термін часу досягнення рівня $P(t) = 0,95$ по різним структурам для живлення 4АТД.

габарити, струм тощо. Такі параметри, як струм та клас вентилів визначають його вартість: чим вище клас приладу та його номінальний струм, тим вище його вартість. Головний параметр – клас вентилів визначає багатосистемність перетворювача (електровоза), тобто можливість роботи з різними значеннями напруг у контактній мережі.

В основу розроблених принципів уніфікації пропонується покласти ряди переважних чисел. Закономірно побудована у відповідності з рядом переважних чисел сукупність чисельних значень головного параметра пристроїв одного функціонального призначення являє собою параметричний ряд. Система переважних чисел є основою уніфікації, її теоретичною базою. Ряди переважних чисел найчастіше – це арифметичні або геометричні прогресії.

Проведені дослідження у дисертаційній роботі показали, що прийнятий головний параметр (клас вентиля) не залежить від потужності перетворювача, а визначається рівнем напруги у контактній мережі, тобто визначає багатосистемність перетворювача (електровоза). Фактично головний параметр (клас вентилів) визначається тільки кількістю послідовно з'єднаних мережевих випрямлячів (МВ) до контактної мережі, тобто показником a (табл.1).

Попит на МВ, які складають параметричний ряд, зумовлений тільки одним головним параметром. Такий ряд – одномірний. Оптимізація такого ряду

Третій розділ присвячено питанню уніфікації перетворювальних структур тягового перетворювача багатосистемного електровоза, яка розглядається як раціональне скорочення кількості типів структур тягового перетворювача з різними параметрами (напругою, струмом, потужністю), але однакового функціонального призначення, тобто живлення певної кількості двигунів заданої потужності.

Основні параметри перетворювача визначають його якість. До них відносимо масу,

полягає в знаходженні сукупності МВ з такими класами, при яких так звана цільова функція досягає мінімального значення за умови задоволення обмежень. Обмеженням є максимальний клас МВ даного виду.

Таблиця 1

Узагальнені значення головних параметрів мережевих випрямлячів

Структура МВ (за показником a)		Головний параметр при напрузі контактної мережі (кВ)				
		3	6	12	24	25 (50 Гц)
1	1a	30	60	120	240	353
2	3a	10	20	40	80	118
3	6a	5	10	20	40	59

Математична модель оптимізації параметричного ряду складається із цільової функції та обмежень. Складемо цільову функцію для випадку знаходження оптимального параметричного ряду для кожного типу МВ. У цьому випадку цільова функція являє собою залежність витрат на виробництво та експлуатацію пристроїв, які складають параметричний ряд, від головного параметру (класом за зворотною напругою) і часу. Обмеженням цільової функції є значення напруги у контактній мережі.

На множині X пристроїв задана функція попиту $\varphi(\lambda)$ на кожен тип $\lambda \in X$, де λ - головний параметр. Пристрої мають такі N значень головного параметра: $U_1, U_2, \dots, U_N$. Тоді параметричний ряд $U^N = (U_1, U_2, \dots, U_K, \dots, U_N)$.

Цільова функція визначається як:

$$C(U^N) = \sum_{U \in U^N} 3^0(U) + \sum_{\lambda \in X} \varphi(\lambda) \min_{U \in U^N} 3(U, \lambda) (1 + E_H)^{t_p - t}, \quad (8)$$

де $3^0(U)$ постійні витрати на пристрій одного типу, які не залежать від їх кількості в експлуатації (витрати на розробку, підготовку виробництва). Тобто, $3^0(U)$ – вартість виробництва одного екземпляра пристрою даного типу (капітальні витрати);

$\sum_{U \in U^N} 3^0(U)$ – вартість виробництва усіх типів пристроїв даного виду;

$3(U, \lambda)$ – витрати на задоволення потреб у пристрої з головним параметром λ з допомогою пристрою з головним параметром U , який відноситься до параметричного ряду пристроїв. Тобто, $3(U, \lambda)$ – це поточні (експлуатаційні) витрати. Співмножник $\min_{U \in U^N} 3(U, \lambda)$ – це мінімальні витрати при задоволенні по-

питу на пристрій з параметром λ з допомогою інших пристроїв із параметричного ряду. Поточні витрати мають місце щорічно протягом усього розрахункового періоду. При вказаних умовах для поточних витрат потрібно врахувати фактор часу, що змінюється шляхом приведення до початку розрахункового

періоду щорічних поточних витрат, для чого вводиться коефіцієнт приведення, який визначається за формулою: $(1 + E_H)^{t_p - t}$, де E_H – норматив приведення різночасових витрат до розрахункового року, $E_H = 0,1$;

t_p – порядковий номер розрахункового періоду;

t – порядковий номер t -го року експлуатації параметричного ряду пристроїв, починаючи від початкового розрахункового періоду. У нашому випадку розрахунковий і початковий роки збігаються. Тому $t_p = 1$. Відомо, що приведення витрат до початку розрахункового року здійснюється діленням витрат на коефіцієнт приведення, що у нашому випадку забезпечується від’ємним значенням різниці $(t_p - t)$, так як $t \geq t_p = 1$;

t_c – термін служби пристрою у роках.

Задача оптимізації параметричного ряду пристроїв полягає у мінімізації цільової функції за час розрахункового періоду.

$$C_N = \min_{0 < N \leq N_0} C(U^N). \quad (9)$$

Для визначення функції попиту $\varphi(\lambda)$ пропонуємо застосувати метод обробки статистики попиту, який дає можливість визначити $\varphi(\lambda)$ найбільш наближеним до її реального виду, так як при цьому є можливість використати інформацію про потребу у пристроях з різною структурою за показником a у загальному масиві запропонованих структур тягових перетворювачів для багатосистемних електровозів. Тобто, функція попиту дорівнює такому показнику уніфікації як «Частість використання функціонального вузла у складі перетворювальної структури», яку визначаємо як:

$$K_N = \frac{N_j}{N}, \quad (10)$$

де N та N_j відповідно загальна кількість функціональних вузлів у всіх розглянутих перетворювальних структурах та кількість функціональних вузлів, рівень уніфікації яких розглядається.

Для визначення функцій витрат $3^\circ(U)$ та $\min 3(U, \lambda)$ умовно приймаємо, що вартість пристрою МВ пропорційна вартості усіх напівпровідникових вентилів мережевого випрямляча. Абсолютна вартість пристрою не має значення, так як для визначення оптимального параметричного ряду пристроїв потрібно знайти мінімальне відносне значення цільової функції за виразом (8).

До складу виразу цільової функції входять капітальні витрати на закупівлю напівпровідникових приладів та інших компонентів перетворювача. Аналіз технічної літератури та інших джерел показав, що вартість напівпровідникових перетворювачів залежить насамперед від виду та типу силових напівпровідникових приладів, які є основою будь-якого перетворювача. Тому в даних дослі-

дженнях прийнято, що функція капітальних витрат на виробництво складових частин перетворювача визначається саме вартістю силових напівпровідникових приладів (СНП).

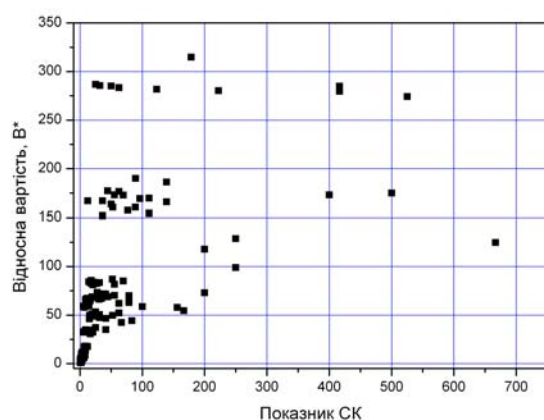


Рис. 8 - Експериментальна залежність $B^* = f(CK)$ для випрямних діодів всіх класів.

листами, розраховується як: $B^* = \frac{B}{B_{\min}}$, де B вартість одного СНП, $B_{\min}$ - найменша вартість серед усього переліку СНП даного виду.

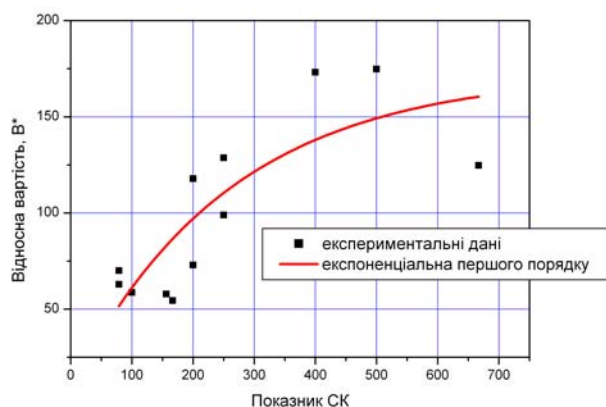


Рис. 9 - Експериментальна та апроксимована залежність $B^* = f(CK)$ для випрямних діодів до 10 класу

Експериментальна та апроксимована залежність $B^* = f(CK)$ для випрямних діодів до 10 класу представлені на рис. 9.

Отримані значення функцій попиту та витрат дозволяють визначити параметричні для всіх перетворювальних структур при різних напругах живлення та потужностях. Для перетворювальної структури 4Т(А)-М1-3Ф-12м1а, на базі

Для спрощення пропонується використовувати залежність відносної вартості приладу B^* від відношення $CK = \frac{Струм}{Клас}$, тобто досліджувана функція має вигляд $B^* = f(CK)$ (рис.8).

Вартість силового напівпровідникового приладу визначено у відносних одиницях, тобто вартість кожної позиції у загальному переліку СНП, який складено за прайс-

Пропонується провести апроксимацію залежності $B^* = f(CK)$ для приладів, які згруповано за класом, а саме в діапазонах: $[0;10)$, $[10;20)$; $[20;30)$; $[30;40)$; $[40;50]$. Аналітичний вираз цієї залежності дозволить визначити відносну вартість для будь-якого випрямного діоду зі значенням CK відмінним від експериментального. Апроксимацію залежності $B^* = f(CK)$ проводилась за таким виразом (у загальному вигляді):

$$y(x) = y_0 + A_1 e^{\left(\frac{x}{t_1}\right)}. \quad \text{Експеримен-}$$

некерованих МВ, потужністю перетворювача 3000 кВт та напругою у контактній мережі 3 кВ при визначеній витратній функції, параметричні ряди записують таким чином:

$U_1^N = 30$	$\varphi(\lambda) = 0,3179$	$3^\circ(U) = 57,865$
$U_2^N = 30; 60$	$\varphi(\lambda) = 0,3179; 0,0794$	$3^\circ(U) = 57,865; 115,73$
$U_3^N = 30; 120$	$\varphi(\lambda) = 0,3179; 0,0794$	$3^\circ(U) = 57,865; 121,647$
$U_4^N = 30; 240$	$\varphi(\lambda) = 0,3179; 0,0794$	$3^\circ(U) = 57,865; 243,294$
$U_5^N = 30; 353$	$\varphi(\lambda) = 0,3179; 0,1588$	$3^\circ(U) = 57,865; 364,941$
$U_6^N = 30; 60; 353$	$\varphi(\lambda) = 0,3179; 0,0794; 0,1588$	$3^\circ(U) = 57,865; 115,73; 364,941$
$U_7^N = 30; 120; 353$	$\varphi(\lambda) = 0,3179; 0,0794; 0,1588$	$3^\circ(U) = 57,865; 121,647; 364,941$

Результати розрахунків цільових функцій різних перетворювальних структур потужністю 3000 кВт при напрузі у контактній мережі 3 кВ ($U_1^N = 30$) представлені на рис. 10.



Рис. 10 - Значення цільових функцій різних перетворювальних структур з некерованим МВ, при потужності перетворювача 3000 кВт та напрузі у контактній мережі 3 кВ.

Порівняння значень цільових функцій дозволило визначити мінімальне значення цих функцій та відповідні перетворювальні структури. Проведені дослідження рівня уніфікації модуля мережевих випрямлячів дозволяють прийняти таке: в подальших дослідженнях перетворювальні структури будуємо за допомогою модулів мережевих випрямлячів типу 3а.

Також слід відмітити, що в декількох випадках при роботі з напругою контактної мережі 3 кВ постійного струму мінімальну цільову функцію мають структури з поєд-

нанням мережевих випрямлячів типу 1а.

У четвертому розділі представлено результати розв'язання задач, які пов'язані зі створенням тягових трансформаторів підвищеної частоти. Метою цих досліджень є визначення їх енергетичних показників та параметрів.

Електротехнічні сталі за поширеністю посідають перше місце серед феромагнітних матеріалів і при частотах приблизно до 3000 Гц перебувають поза конкуренцією. У другому розділі встановлено, що достатнім значенням робочої частоти ланки підвищеної частоти тягового статичного перетворювача, з точки

зору зменшення габаритів обладнання, є частота 500 Гц, а для зменшення маси – 1400 Гц. Ці значення знаходяться в діапазоні частот до 3000 Гц. Тобто, при створенні тягового трансформатора підвищеної частоти доцільно використовувати саме електротехнічні сталі.

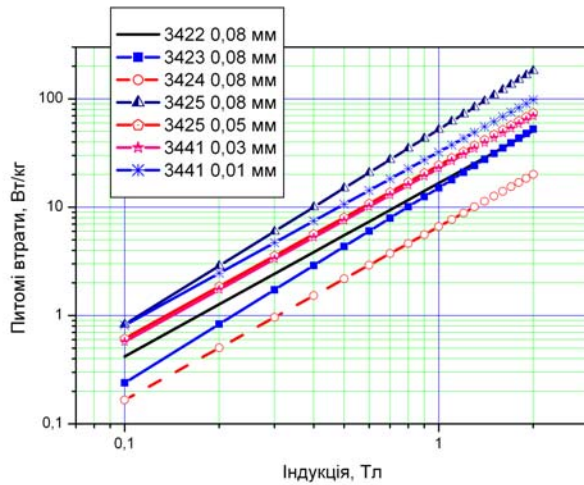


Рис. 11 - Залежність $p'(f, B_m)$ для різних марок сталей при частоті 1000 Гц.

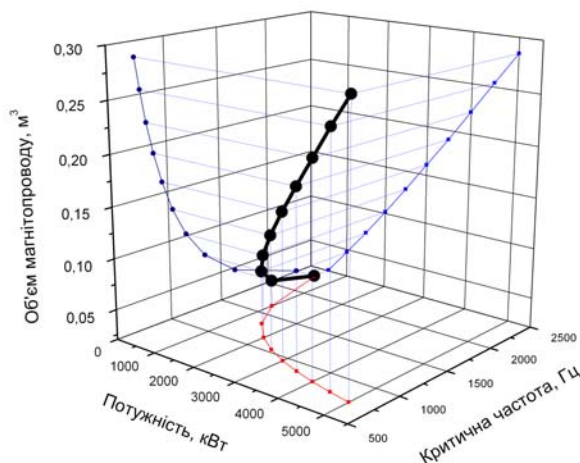


Рис. 12 - Залежність об'єму магнітопроводу трансформатора від потужності та критичної частоти.

Для визначення питомих втрат у сталюму магнітопроводі тягового трансформатора підвищеної частоти, використаємо відоме співвідношення:

$$p' = \left(\frac{f}{f^*} \right)^\alpha \left(\frac{B_m}{B_m^*} \right)^\beta, \quad (11)$$

де: f – частота, Гц;
 B_m – амплітуда індукції, Тл;
 $f^* = 1000$ Гц, $B_m^* = 1$ Тл – базові значення частоти та індукції.

На рис. 11 представлено залежність $p'(f, B_m)$ для різних марок сталей при частоті 1000 Гц. Як показали проведені дослідження, доцільно використовувати сталь марки 3424 товщиною стрічки 0,08 мм, оскільки вона характеризується найменшими питомими втратами при частоті 1000 Гц і вище.

Рівень втрат у магнітопроводі однофазного трансформатора його об'єм V_m (см³), в залежності від частоти, визначають за виразом:

$$V_m \approx 1,5 \sqrt{\frac{A k_{\text{доп}}}{k_m}} \cdot \frac{P}{f^{1/4} \Delta T}, \quad (12)$$

де: P – потужність трансформатора, Вт; f – робоча частота трансформатора, Гц; ΔT – температура перегріву магнітопроводу, °С; A – коефіцієнт, який враховує властивості магнітного матеріалу, $\frac{\text{А} \cdot \text{см}}{\text{В} \cdot \text{с}^{1/2}}$.

Оптимальне (з точки зору мінімуму втрат) значення індукції B_m можна визначати як:

$$B_m = 0,156 \frac{\sqrt{P}}{\sqrt[4]{A} \cdot f^{7/8} \cdot V_m^{2/3}}. \quad (13)$$

Існує раціональна межа збільшення частоти, яка забезпечує мінімальні габаритні показники та максимальний ККД тягового трансформатора. Максимальна частота, яка відповідає верхній межі збільшення частоти, має назву «критична». Для визначення якої скористаємося виразом:

$$f_{кр} = \frac{3,98 \cdot 10^6}{A} \sqrt{\frac{\Delta T}{P}}, \text{ Гц.} \quad (14)$$

Тоді, використовуючи (12), (13), (14), отримаємо залежність об'єму магнітопроводу трансформатора від потужності та критичної частоти (рис. 12).

Втрати у магнітопроводі, вказані у відсотках, по відношенню до розрахункового значення потужності (рис. 13), визначаються за виразом:

$$\Delta p(P) = \frac{(p_{01}(f_{кр}(P))^\alpha (B_m(P))^\beta) \cdot V_m(P)}{P} \cdot 100\%. \quad (15)$$

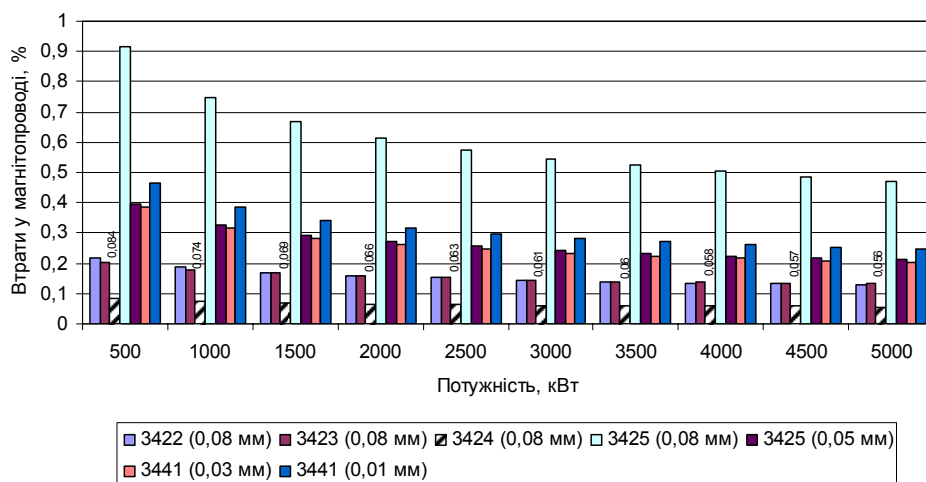


Рис. 13 - Відносні втрати у магнітопроводі однофазного трансформатора підвищеної частоти з різних сталей в функції потужності.

Трифазні трансформатори підвищеної частоти будуть мати об'єм магнітопроводу на 19% менший, що дозволить зменшити втрати потужності на таке ж значення. При цьому до виразу (15) необхідно ввести коефіцієнт $1 - 0,19 = 0,81$, який враховує зменшення об'єму магнітопроводу трифазного трансформатора у порівнянні з однофазними.

Результати визначення критичної частоти, втрат неробочого ходу тягових трифазних трансформаторів підвищеної частоти представлено в табл. 2.

Таблиця 2

Результати визначення об'єму магнітопроводу трифазного трансформатора підвищеної частоти

Показник		Потужність, кВт						
		1000	1600	2500	4000	6300	10000	16000
1	Критична частота, Гц	2076	1641	1313	1038	827	656	519
2	Втрати неробочого ходу p_{0f} , Вт	602	887	1283	1890	2750	4026	5933
3	Об'єм магнітопроводу V_f , м ³	0,032	0,054	0,089	0,151	0,252	0,423	0,718

Виграш у об'ємі магнітопроводу трифазних трансформаторів підвищеної частоти по відношенню до об'єму трансформаторів промислової частоти тієї ж потужності представлено на рис.14.

Отримане автором середнє значення функції $\frac{P_{050}}{P_{0f}}(P) \approx 3$ рази, у досліджуваному діапазоні потужностей дозволяє стверджувати, що використання трифазного тягового трансформатора підвищеної частоти зменшить втрати потужності у магнітопроводі приблизно в три рази, у порівнянні зі втратами потужності у магнітопроводі трифазного трансформатора промислової частоти. В дисертації також проведено визначення параметрів трифазних тягових трансформаторів підвищеної частоти з використанням Т - подібної схеми заміщення.

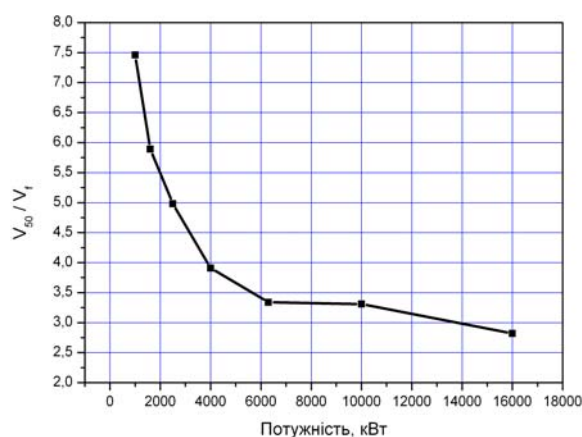


Рис. 14 - Зміни об'єму магнітопроводу трифазного трансформатора підвищеної частоти у порівнянні з трансформатором промислової частоти.

Сучасну тягову електропередачу неможливо представити без статичних перетворювачів, які забезпечують необхідне перетворення електричної енергії від джерела (тягової підстанції) до вала тягового двигуна. Потужність тягових перетворювачів щороку зростає, це необхідно для забезпечення достатнього рівня потужності тягової електропередачі, особливо для швидкісного руху поїздів. Збільшення потужності тяго-

вої електропередачі, зокрема статичного перетворювача, при існуючих підходах до проектування електрообладнання, вимагає збільшення його «життєвого» простору, внаслідок збільшення потужності трансформаторно-реакторного обладнання та збільшення габаритів системи охолодження. На шляху необхідного збільшення габаритів обладнання стає особливістю тягового рухомого складу – обмеження доступного простору габаритами кузова електровоза.

Дослідження впливу на конструктивні показники статичних перетворювачів для асинхронного та приводу постійного струму ведучих фірм виробників, виду елементної бази, системи охолодження та рівня робочої напруги дозволяє відмітити, що використання SGCT, IGCT приладів у складі перетворювачів є більш зручним по відношенню до IGBT приладів. Так, використання SGCT тиристорів з примусовим повітряним охолодженням дозволяє зменшити питомий об'єм статичного перетворювача для асинхронного приводу приблизно в 1,5 разу у порівнянні зі статичним перетворювачем на базі IGBT транзистора з водяним охолодженням. При використанні IGBT транзисторів у складі силових модулів тягового статичного перетворювача доцільно використовувати примусове водяне охолодження, яке дозволяє зменшити питомий об'єм перетворювача приблизно на 20% у порівнянні з системами, в яких використовується примусове повітряне охолодження.

У *п'ятому розділі* досліджено впливу процесів в перетворювачі підвищеної частоти на кола автоматики та зв'язку електрифікованих ділянок залізниць. Як критерій взаємодії використано значення амплітуд гармонійних складових мережевого струму електровозу. З цією метою розроблено імітаційні моделі запропонованих структур тягового статичного перетворювача з ланкою підвищеної частоти. Проведені дослідження підтвердили забезпечення електромагнітної сумісності запропонованих перетворювальних структур з колами СЦБ та зв'язку електрифікованих ділянок залізниць як на постійному, так і змінному струмах у контактній мережі.

У *шостому розділі* представлено результати визначення енергетичної ефективності запропонованої тягової електропередачі багатосистемних електровозів та порівняння отриманих результатів з відповідними показниками тягових електропередач існуючих електровозів. Зокрема, визначено коефіцієнт корисної дії уніфікованого перетворювача в режимі живлення від контактної мережі змінного та постійного струмів напругою 3 кВ та 6 кВ, при різних видах тягових двигунів. На рис. 15 представлена схема для розрахунку ККД запропонованого перетворювача при живленні асинхронного тягового двигуна.



Рис. 15 - Схема для розрахунку ККД перетворювача при живленні АТД: η_{MB} – мережевого керуваного випрямляча; η_{CM} , η_{CT} – емнісних фільтрів мережевого та тягового контурів; η_{MI} – інвертора мережевого контуру; $\eta_{ТПЧ}$ – трифазного трансформатора підвищеної частоти; η_{TB} , η_{TI} – відповідно випрямляча та інвертора тягового контуру перетворювача.

При визначенні ККД перетворювача розглядали варіанти використання високовольтних тиристорного, транзисторного та гібридного ключів, серед яких мінімальним відносним рівнем втрат (0,25%) характеризується гібридний ключ,

який складається з IGBT та GTO приладів. Коефіцієнт корисної дії трансформатора визначається співвідношенням втрат у сталі та міді трансформатора.

Тоді результуюче значення ККД уніфікованого перетворювача (рис.16) для режиму «25 кВ, 50 Гц» при асинхронних тягових двигунах визначається як:

$$\eta_{\Sigma\pi}\left(\frac{P_k}{P_0}\right) = \eta_{\text{мв}} \cdot \eta_{\text{см}} \cdot \eta_{\text{мі}} \cdot \eta_{\text{тппч}}\left(\frac{P_k}{P_0}\right) \cdot \eta_{\text{тв}} \cdot \eta_{\text{ст}} \cdot \eta_{\text{ті}} \quad (16)$$

Для оцінки рівня енергетичної ефективності тягової електропередачі багатосистемного електровоза з асинхронними тяговими двигунами та перетворювачем підвищеної частоти у режимі змінного струму використаємо вираз (3), в якому добуток $\eta_{\text{тв}} \cdot \eta_{\text{ст}} \cdot \eta_{\text{ті}}$ замінимо значенням середнього результуючого значення ККД уніфікованого перетворювача $\eta_{\Sigma\pi_VK}$, побудованого з використанням гібридного ключа.

При використанні тягового редуктора та АТД, аналогічних до тих, що використовується на електровозах європейського виробництва, рівень ККД тягової електропередачі багатосистемних електровозів з перетворювачами підвищеної частоти у режимі змінного струму буде дорівнювати 91,3 %.

При двигунах постійного струму для режиму «25 кВ, 50 Гц» результуюче значення ККД уніфікованого перетворювача складає 89 %.

У режимі живлення від контактної мережі постійного струму, при використанні тягового редуктора та АТД, аналогічних до тих, що використовується на електровозах європейського виробництва, рівень ККД тягової електропередачі багатосистемних електровозів буде дорівнювати 91,8 %, а при тягових двигунах постійного струму – 89,6 %.

При збільшенні напруги у контактній мережі до 6 кВ рівень електричних втрат, у порівнянні з традиційною системою 3 кВ, буде зменшено у середньому на 75,02%, тобто збільшиться ККД контактної мережі.

При використанні АТД енергетична ефективність від впровадження підвищеної напруги у контактній мережі постійного струму до рівня 6 кВ у поєднанні з використанням багатосистемних електровозів на базі уніфікованого енергоефективного перетворювача підвищеної частоти дозволить збільшити ККД енергосистеми постійного струму на $84,6 - 73 = 11,6\%$ або $79,3 - 73 = 6,3\%$. При використанні ТДПС на багатосистемних електровозах

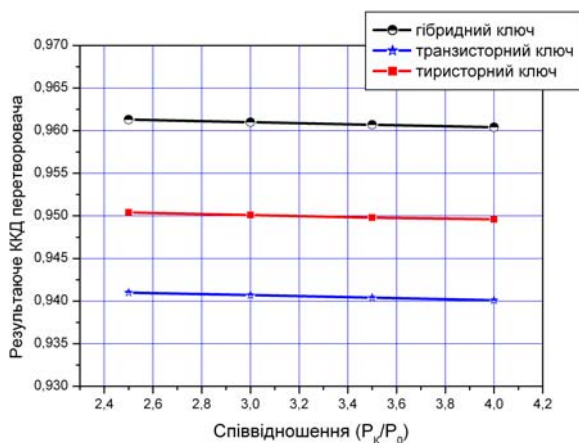


Рис. 16 - Залежність $\eta_{\Sigma\pi}\left(\frac{P_k}{P_0}\right)$ при різних видах силових ключів.

збільшення ККД енергосистеми становитиме: $82,6 - 73 = 9,6 \%$.

У сьомому розділі розглянуто техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження багатосистемних електровозів на підвищену напругу у контактній мережі постійного струму. Так, перехід на систему 6 кВ постійного струму дозволить зменшити ці витрати приблизно на 75%, у грошовому еквіваленті нове значення витрат буде становитиме 141 тис. грн.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, в якій вирішено актуальну науково-технічну проблему покращення техніко-економічних показників перевізного процесу за рахунок збільшення енергоефективності електрифікованих ділянок залізниць при використанні багатосистемних електровозів з більшим ККД та підвищенні напруги у контактній мережі постійного струму.

Основні результати і висновки дисертаційної роботи полягають у наступному.

1. Показано, що тяговий рухомий склад залізниць України морально застарів та фізично зношений, і тому треба його поповнювати, зокрема електровозами нового покоління, які розроблено з урахуванням останнього слова науки та техніки. Зокрема, з метою покращення енергетичних показників системи тягового електропостачання постійного струму та збільшення пропускної спроможності ділянок електрифікованих на постійному струмі напругою 3 кВ є доцільним підвищити напругу у контактній мережі до рівня кратного 3 кВ, а саме – 6, 12 або 24 кВ поетапно, що забезпечить зменшення втрат електроенергії в декілька разів. Перевід ділянок, електрифікованих на постійному струмі з напругою 3 кВ на напругу 25 кВ змінного струму частотою 50 Гц, у наш час нецільно з економічних міркувань. При поетапному переході з 3 кВ на підвищену напругу доцільно використовувати багатосистемні електровози, які змогли б забезпечити роботу на електрифікованих ділянках з напругою 3 кВ, 6 кВ, 12 кВ, 24 кВ постійного струму та 25 кВ змінного струму. Багатосистемні електровози дозволять підвищити ефективність роботи залізниць за рахунок: зменшення кількості локомотивних бригад; скорочення витрат на утримання оборотних депо; відмов від зупинок на станціях стикування; зменшення кількості локомотивів у порівнянні з односистемними при виконанні однакового об'єму перевезень при одночасному впровадженні системи тяги на постійному струмі з підвищеним рівнем напруги.

2. Найбільш ефективна структура тягової електропередачі багатосистемного електровоза складається з двох частин:

- мережевого контуру, що відповідає за взаємодію з контактною мережею. Основними складовими частинами цього контуру є випрямляч (для режиму роботи з контактною мережею змінного струму), інвертор та тяговий трансформатор підвищеної частоти. Встановлено, що достатнім значенням робочої

частоти ланки підвищеної частоти тягового статичного перетворювача, з точки зору зменшення габаритів обладнання, є частота 500 Гц, а для зменшення маси – 1400 Гц;

- тягового контуру, який живить тяговий двигун. До складу цього контуру входить випрямляч та інвертор (при використанні асинхронних тягових двигунів).

3. Класифікація перетворювачів тягової електропередачі багатосистемних електровозів повинна враховувати:

- кількість та вид тягового двигуна: 4А – чотири асинхронних тягових двигуни (АТД); 6А – шість АТД; 4Т – чотири двигуни постійного струму (ТДПС); 6Т – шість ТДПС;

- тип силового модуля: М1, М2, М3, М4, М5 або М6;

- тип трансформатора підвищеної частоти: 1Ф – однофазний; 3Ф – трифазний;

- схему з'єднання вхідних випрямлячів мережевого контуру за формулою $m \times a$, де m – кількість паралельних груп послідовно з'єднаних мережевих випрямлячів; a – кількість послідовно з'єднаних мережевих випрямлячів.

4. Серед запропонованих перетворювальних структур, які мають відносно високі показники структурної надійності, слід виділити перетворювачі, мережеві випрямлячі яких складаються з одної (1а) або трьох (3а) послідовних ланок. Тому для побудови тягової електропередачі багатосистемних електровозів доцільно використовувати структури з цим поєднанням мережевих випрямлячів.

5. Знайшли подальший розвиток теоретичні положення щодо уніфікації електрообладнання запропонованих перетворювальних структур тягової електропередачі багатосистемних електровозів. На базі цих положень розроблено математичну модель, за допомогою якої визначено оптимальні параметричні ряди вказаних пристроїв. При проведенні оптимізації функцію витрат визначено як залежність вартості силових напівпровідникових приладів від їх основних параметрів, у вигляді показника «струм-клас».

6. Використання у складі тягової електропередачі трифазної системи, у порівнянні з однофазною системою, дозволяє зменшити габаритну потужність трансформаторів підвищеної частоти на 14,6 %. Рациональна верхня межа збільшення частоти, яка забезпечує мінімальні габаритні показники та максимальний ККД пристрою, є обернено пропорційною до потужності трансформатора. Для трансформаторів потужністю від 1000 кВА до 6300 кВА критична частота знаходиться в межах від 2076 Гц до 827 Гц.

7. Використання SGCT, IGCT приладів у складі перетворювачів є більш зручним по відношенню до IGBT приладів: застосування SGCT тиристорів з примусовим повітряним охолодженням, у порівнянні зі статичним перетворювачем на базі IGBT транзистора з водяним охолодженням, дозволяє зменшити питомий об'єм статичного перетворювача для асинхронного приводу приблизно в 1,5 рази.

8. Гармонійний склад тягового струму електровоза знаходиться в межах існуючих норм, в результаті можна стверджувати, що електромагнітна сумісність запропонованої системи з колами СЦБ та зв'язку на електрифікованих ділянках забезпечена.

9. Збільшення енергетичної ефективності уніфікованого перетворювача підвищеної частоти тягової електропередачі багатосистемного електровоза, як при використанні тягових двигунів постійного струму, так і асинхронних, як при живленні від контактної мережі змінного, так і постійного струмів, відбувається за рахунок використання трансформатора підвищеної частоти з підвищеним значенням ККД, у порівнянні з трансформаторами промислової частоти, а також в результаті впровадження гібридних напівпровідникових ключів, що мають відносно низьке значення електричних втрат.

10. Збільшення напруги у контактній мережі постійного струму до рівня 6 кВ та використання багатосистемних електровозів з тяговою електропередачею на базі уніфікованого енергоефективного перетворювача підвищеної частоти дозволяє підвищити ККД енергосистеми постійного струму на 9,6% у разі використання багатосистемних електровозів з тяговими двигунами постійного струму та на 11,6% при використанні асинхронних тягових двигунів.

11. Основні теоретичні розробки та прикладні результати дисертаційної роботи впроваджено в локомотивному господарстві Укрзалізниці та на Запорізькому електровозоремонтному заводі (ПАТ «ЗЕРЗ»). Окремі результати досліджень впроваджено в навчальний процес Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Основні положення і результати дисертації опубліковані в таких роботах:

1. Муха А.М. Перспективна елементна база електричних кіл електро рухомого складу залізниць України / А.М. Муха, Д.С. Білухін // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2006 - №4. – С.32-34.

2. Дубинець Л.В. Структурна схема перспективного електровозу подвійного живлення / Л.В. Дубинець, Г.М. Чілікін, А.М. Муха // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки): [тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика»] – Дніпродзержинськ: ДДТУ. - 2007 - С.356 - 357.

3. Муха А.М. Обґрунтування вибору частоти тягового трансформатора багатосистемного електро рухомого складу / А.М. Муха, Л.В. Дубинець, О.Л. Маренич, О.А. Гусар // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2007 – №3. – С.28-29.

4. Муха А.М. До питання використання тягових двигунів постійного струму на багатосистемному електро рухомому складі залізниць. / А.М. Муха, Л. В. Дубинець, О. Л. Маренич // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. – 2008 – №20. - С.49 - 53.

5. Муха А.М. Визначення питомого об'єму статичних перетворювачів

тягового електроприводу з двигунами постійного струму для багатосистемних електровозів / А.М. Муха, О.В. Кузнецов // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. – 2008 - №25. – С.37-42.

6. Муха А.Н. О возможности модернизации электровозов переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями. / А.Н. Муха, В.Н. Безрученко, О.И. Гилевич, А.В. Шаповалов // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2007. - №14. - С. 30 – 34.

7. Муха А.М. Вплив підвищення напруги в контактній мережі постійного струму на величину втрат енергії / А.М. Муха, О.Ю. Балійчук // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. – 2010. - №31. – С. 100–105.

8. Муха А.М. Обґрунтування вибору потужності тягового перетворювача багатосистемних електровозів. / А.М. Муха // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. - 2007 – №19. – С.61-67.

9. Муха А.М. Визначення питомого об'єму статичних перетворювачів тягового асинхронного електроприводу / А.М. Муха // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2008. - №24. - С.71 - 77.

10. Муха А.М. Порівняльний аналіз перетворювальних структур тягового приводу перспективних багатосистемних електровозів з тяговими двигунами постійного струму / А.М. Муха // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2009 – №27. - С.93 - 98.

11. Муха А.М. Структурна надійність тягового перетворювача для багатосистемного електровоза з асинхронними тяговими двигунами. / А.М. Муха // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2009 – №28. - С. 45 – 52.

12. Муха А.М. Уніфікація як критерій порівняльної оцінки структурних схем тягового перетворювача для багатосистемного електровоза / А.М. Муха // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2009 – №29. - С. 71 – 75.

13. Муха А.М. Структурні схеми тягових перетворювачів для багатосистемних електровозів з асинхронним тяговим приводом / А.М. Муха // Збірник наукових праць “Гірнича електромеханіка та автоматика”, ДНГУ, Дніпропетровськ. - 2009 – №82. - С. 13 - 21.

14. Муха А.М. Варіаційний аналіз структурної надійності тягового перетворювача асинхронного електропривода для багатосистемного електровоза. / А.М. Муха // Науково-технічний журнал «Електроінформ»: [тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика»]. – Львів, 2009. – С. 416-417.

15. Муха А.М. Визначення співвідношення між вартістю та параметрами силових напівпровідникових приладів тягових перетворювачів багатосистемних електровозів. / А.М. Муха // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць, Харків. - 2009. - № 47.- С.46-53.

16. Муха А.М. Втрати у магнітопроводі трифазного тягового трансформатора підвищеної частоти / Муха А.М. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. – Дн-вськ: Видавництво Дніпропетр. нац. ун-ту. залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. - №35. - С. 81 – 88.

17. Муха А.М. Визначення функції попиту в задачі оптимального вибору структури тягового перетворювача багатосистемного електровозу / А.М. Муха // Збірник наукових праць “Гірнича електромеханіка та автоматика”, ДНГУ, Дніпропетровськ. - 2009. – №83. – С.25 - 32.

18. Муха А.М. Порівняльний аналіз параметричних рядів структур статичних перетворювачів тягового привода багатосистемних електровозів. / А.М. Муха // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки): [тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика»] – Дніпродзержинськ: ДДТУ. - 2010. - С.87 - 92.

19. Муха А.М. Енергоефективність перетворювача багатосистемного електровозу у режимі змінного струму / А.М. Муха // Східно-Європейський журнал передових технологій. - 2011. – №2/8 (50). – С.8-12.

20. Муха А.Н. Определение рациональной структуры преобразователя многосистемного электроподвижного состава / А.Н. Муха, Е.Я. Куриленко // Scientific proceedings of Riga technical university. Transport and engineering. – 2008. - ser. 6. - vol. 30. - P. 88-90.

21. Пат. UA 55283 МПК (2009) H02M 3/24 Перетворювач постійної напруги з трифазним мостовим випрямлячем / Муха А.М., Бондаренко Ю.С.; заявник та власник Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. - № заявки у 2010 06622; дата заявки 31.05.2010; дата публікації 10.12.2010. Бюл. №23.

22. Пат. UA 55282 МПК (2009) H02M 3/24 Перетворювач постійної напруги / Муха А.М., Балійчук О.Ю.; заявник та власник Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. - № заявки у 2010 06621; дата заявки 31.05.2010; дата публікації 10.12.2010. Бюл. №23.

Додаткові праці

23. Муха А.М. Підвищення напруги у контактній мережі постійного струму, як шлях енерго- та ресурсозберігання / А.М. Муха, О.Я. Куриленко, Р.В. Радіонов // Транспортні зв'язки. Проблеми та перспективи: міжнар. наук. – практ. конф., 29-30 травня 2008 р.: тези доп. - Д.: ДНУЗТ, 2008 – С. 74-75.

24. Муха А.М. Шляхи зниження впливу тягових вентильних перетворю-

вачів на тягову мережу / А.М. Муха, О.Я. Куриленко // Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті: міжнар. наук. – практ. конф., 24-26 травня 2007 р.: тези доп. - Д.: ДНУЗТ, 2007 – С. 38-39.

25. Муха А.М. Поліпшення експлуатаційних характеристик електровозів змінного струму. / А.М. Муха, В.М. Безрученко, О.І. Гілевич, А.В. Шаповалов // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: міжнар. наук. – практ. конф., 11-12 травня 2006 р.: тези доп. - Д.: ДНУЗТ, 2006 – С. 55-56.

26. Муха А.М. Підвищення робочих частот – перспективний шлях удосконалення тягового обладнання електровозів подвійного живлення. / А.М. Муха, Л.В. Дубинець, Г.М. Чілікін // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: міжнар. наук. – практ. конф., 24-25 травня 2007 р.: тези доп. - Д.: ДНУЗТ, 2007 – С. 107-108.

27. Муха А.М. До питання взаємного впливу системи тягового електропостачання та тягових статичних перетворювачів електрорухомого складу при підвищеній напрузі у контактній мережі / А.М. Муха, О.Я. Куриленко // Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті: міжнар. наук. – практ. конф., 03-05 червня 2009 р.: тези доп. - Д.: ДНУЗТ, 2009. - С. 33-34.

28. Муха А.М. Математичне моделювання статичних перетворювачів електрорухомого складу / А.М. Муха, О.Ю. Балійчук // Електрифікація залізничного транспорту «Транселектро-2010»: междунар. науч.-практ. конф., 27-30 сент. 2010 г.: тезисы докл. – Д.: ДНУЖТ, 2010. – С. 21 - 22.

29. Муха А.М. Параметри тягових трансформаторів підвищеної частоти та їх вплив на рейкові кола / А.М. Муха, О.Я. Куриленко // Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті: міжнар. наук. – практ. конф., 15-16 квітня 2010 р.: тези доп. - Д.: ДНУЗТ, 2010. – С.58-59.

30. Муха А.М. Режим роботи статичного перетворювача тягового приводу багатосистемних електровозів при вентильних двигунах. / А.М. Муха, О.Я. Куриленко, Р.В. Краснов // Енергозбереження на залізничному транспорті: міжнар. наук. – практ. конф., 29 вересня – 01 жовтня 2010 р.: тези доп. - Д.: ДНУЗТ, 2010. – С.12.

31. Муха А.М. Визначення «життєвого простору» для статичних тягових перетворювачів на електрорухомому складі. / А.М. Муха // Електрифікація залізничного транспорту «Транселектро-2008»: междунар. науч.-практ. конф., 30 сент.-04 окт. 2008 г.: тезисы докл. – Д.: ДНУЖТ, 2008. – С. 9.

32. Муха А.М. Критерії порівняльного аналізу варіантів побудови статичних перетворювачів тягового приводу багатосистемних електровозів. / А.М. Муха // Електрифікація залізничного транспорту «Транселектро-2009»: междунар. науч.-практ. конф., 03-05 июня 2009 г.: тезисы докл. – Д.: ДНУЖТ, 2009. – С. 17-18.

33. Муха А.М. Критерії вибору магнітних матеріалів для електромагнітних пристроїв підвищеної частоти / А.М. Муха // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: міжнар. наук. – практ. конф., 15-16 квітня 2010 р.: тези доп. - Д.: ДНУЗТ, 2010. - С. 98-99.

34. Муха А.М. Енергетична ефективність тягових електропередач діючих електровозів постійного та змінного струмів. / А.М. Муха // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: 71 міжнар. наук. – практ. конф., 14-15 квітня 2011 р.: тези доп. - Д.: ДНУЗТ, 2011. - С. 116-117.

АНОТАЦІЯ

Муха А.М. Розвиток наукових основ створення тягових електропередач багатосистемних електровозів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт. – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2011.

Дисертація присвячена проблемам, які пов'язані зі створенням уніфікованих тягових електропередач багатосистемних електровозів для забезпечення процесу перевезень одним видом локомотива при різних можливих сполученнях напруг у контактній мережі (3 кВ, 6 кВ, 12 кВ, 24 кВ постійного струму та 25 кВ змінного струму).

Запропоновано і науково обґрунтовано варіанти структурних схем статичних перетворювачів підвищеної частоти, які при різних сполученнях видів напруг та тягових двигунів забезпечують підвищення коефіцієнта корисної дії електричної тяги постійного струму до 79...84%.

Отримані наукові результати дозволяють надати рекомендації щодо проектування та виробництва нового енергоефективного багатосистемного електрорухомого складу, тягова електропередача якого базується на статичному перетворювачі підвищеної частоти.

Ключові слова: багатосистемні електровози, підвищена напруга постійного струму, коефіцієнт корисної дії, тяговий перетворювач, підвищена частота, уніфікація, енергетична ефективність.

АННОТАЦИЯ

Муха А.М. Развитие научных основ создания тяговых электропередач многосистемных электровозов. - Рукопись.

Диссертация на получение научной степени доктора технических наук за специальностью 05.22.09 - электротранспорт. - Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, 2011.

Диссертация посвящена проблемам, которые связаны с созданием унифицированных тяговых электропередач многосистемных электровозов для обеспечения процесса перевозок одним видом локомотива при разных возможных сочетаниях напряжений в контактной сети (3 кВ, 6 кВ, 12 кВ, 24 кВ постоянного тока и 25 кВ переменного тока), что является целесообразным с точки

зрения повышения эффективности эксплуатации как системы электроснабжения, так и электродвижущего состава.

В составе тяговой электропередачи многосистемного электровоза предлагается использовать статический преобразователь со звеном повышенной частоты. Такой преобразователь состоит из двух контуров: сетевого и тягового. Сетевой контур отвечает за взаимодействие тягового преобразователя с питающей контактной сетью, в независимости от уровня напряжения в ней. В режиме переменного тока в его состав входит: выпрямитель, фильтр-накопитель, инвертор, трансформатор повышенной частоты. В режиме питания от контактной сети постоянного тока из состава сетевого контура исключается входной выпрямитель. Тяговый контур обеспечивает питание и реализацию необходимых режимов работы тягового двигателя. При использовании асинхронных тяговых двигателей в состав тягового контура входят: выпрямитель, подключенный к вторичной обмотке трансформатора повышенной частоты и трехфазный инвертор.

Для уменьшения массогабаритных показателей электрооборудования многосистемного электровоза требуется повысить его рабочие частоты. С точки зрения уменьшения габаритов достаточной являться частота 500 Гц, а для уменьшения массы – 1400 Гц.

Разработаны теоретические положения по унификации преобразовательных структур многосистемных электровозов, определен уровень надежности этих структур.

Сравнение структурной надежности преобразовательных структур позволили выделить системы с наименьшим временем достижения вероятности безотказной работы уровня 0,95, которые были исключены из дальнейших исследований.

При проведении оптимизации преобразовательных структур, с целью выявления системы, имеющей наибольший уровень унификации, использовалась целевая функция. Целевая функция – есть математическое описание зависимости затрат на производство и использование данной продукции от значений параметров, которые оптимизируются, и от временных параметров.

В частности, в работе зависимость стоимости силовых полупроводниковых приборов от их параметров учтено при помощи параметра «ток-класс».

Исследованы основные вопросы относительно построения тягового трансформатора повышенной частоты и конструктивных показателей преобразователя. Обосновано, что с учетом влияния специфических условий эксплуатации тягового электроподвижного состава, для обеспечения нужных габаритов оборудования, энергетических показателей и других требований частота тока в предлагаемых преобразователях должна быть от 2076 Гц до 827 Гц, при использовании современных материалов для магнитопроводов трансформаторов мощностью от 1000 кВА до 6300 кВА и современных полупроводниковых приборов. Использование SGCT, IGCT приборов в составе преобразователей является более предпочтительным по отношению к IGBT: использование SGCT ти-

ристоров с принудительным воздушным охлаждением, по сравнению со статическими преобразователями на IGBT транзисторах с водяным охлаждением, позволяет уменьшить удельный объем статического преобразователя для асинхронного привода в 1,5 раза.

Рассмотрены вопросы электромагнитной совместимости многосистемного электровоза с системами СЦБ и связи электрифицированных участков железных дорог.

Предложенные и научно обоснованные варианты структурных схем статических преобразователей повышенной частоты, которые при разных сочетаниях видов напряжений и тяговых двигателей обеспечивают повышение коэффициента полезного действия электрической тяги постоянного тока до 79...84%.

Полученные научные результаты позволяют дать рекомендации по проектированию и производству нового энергоэффективного многосистемного электроподвижного состава, тяговая электропередача которого базируется на статическом преобразователе повышенной частоты.

Ключевые слова: многосистемные электровозы, повышенное напряжение постоянного тока, коэффициент полезного действия, тяговый преобразователь, повышенная частота, унификация, энергетическая эффективность.

ABSTRACT

Muha A.M. Development of scientific basis for designing of traction electric power transmissions for multisystem electric locomotives. - Manuscript.

Thesis for a doctor degree in engineering sciences in speciality 05.22.09 – electric transport. - Dnepropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, Dnepropetrovsk, 2011.

The thesis deals with designing of the uniform traction electric power transmissions for multisystem electric locomotives for realization of the transportation process with one type of locomotive at different values of voltage in overhead contact system (kV DC: 3kV, 6kV, 12kV, 24kV and 25 kV AC).

Variants of block diagrams of overfrequency static converters have been proposed and scientifically substantiated. These converters allow to raise coefficient of efficiency of DC electric traction up to 79...84%.

Scientific results obtained in the work allow to give recommendations for designing and manufacturing of a new energy efficient multisystem electric rolling stock, which traction electric power transmission is based on the static overfrequency converter.

Key words: multisystem electric locomotives, DC excess voltage, coefficient of efficiency, traction converter, overfrequency, unification, energy efficiency.

Муха Андрій Миколайович

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ СТВОРЕННЯ ТЯГОВИХ
ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ БАГАТОСИСТЕМНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Формат 60x84 1/16. Папір для множильних апаратів. Різограф.
Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. л.1,0. Тираж 100 прим.

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна
ДК №1315 від 31.03.03

Адреса університету і ділянки оперативної поліграфії:
вул. акад. В. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, 49010
www.diit.dp.ua

