

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Нікулін Віктор Сергійович

УДК 629.432:621.337

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ
МЕТРОВАГОНІВ З АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2007

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі «Системи електричної тяги» в Українській державній академії залізничного транспорту Міністерства транспорту і зв'язку України м. Харків

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент,
Хворост Микола Васильович,
Харківська національна академія міського господарства,
м. Харків, професор кафедри електричного транспорту

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Сінчук Олег Миколайович,
Кременчуцький державний політехнічний університет
ім. М.Остроградського, м. Кременчук, завідувач кафедри
електропостачання та енергоменеджменту

кандидат технічних наук, доцент,
Кривошеєв Сергій Юрійович,
Національний технічний університет «Харківський
політехнічний інститут», м. Харків, доцент кафедри
промислової та біомедичної електроніки

Провідна установа: Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту ім. академіка В.Лазаряна,
м. Дніпропетровськ

Захист відбудеться 10 жовтня 2007 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.15 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий « 01 » вересня 2007 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Любарський Б.Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В теперішній час згідно з Постановою Кабінету Міністрів України від 7 березня 2006 р. №257 «Про затвердження Державної програми будівництва та розвитку мережі метрополітенів на 2006 – 2010 рр.» розгорнуто роботи з проектування та виробництва вагонів для метрополітенів України. Це пов'язано з високим відсотком зносу рухомого складу метрополітенів та економічною недоцільністю закупівлі їх за кордоном. За програмою передбачається оновлення рухомого складу шляхом освоєння серійного виробництва метровагонів з асинхронною тяговою передачею з підвищеними енергетичними, масогабаритними і техніко-економічними показниками, що дозволить значно підвищити енергоефективність і надійність метровагонів завдяки більш гнучкому управлінню тяговими двигунами в пуско-гальмівних режимах і різкому скороченню кількості контактних елементів у силовій схемі електропередачі. Техніко-економічні показники тягових асинхронних електропередач метровагонів багато в чому залежать від технічної досконалості їх основних вузлів: блока електромагнітної сумісності (БЕМС) та перетворювально-регулюючого блока (ПРБ), роль яких з боку коефіцієнта корисної дії, якісних та масогабаритних показників при збільшенні пускової потужності метровагонів зростає.

Збільшення ж пускової потужності метровагонів обумовлена як доцільністю переходу на однозонну характеристику управління тяговими асинхронними двигунами для зменшення енергозатрат на тягу, так і доцільністю переходу від чисто моторвагонної тяги на змішану для зменшення експлуатаційних витрат.

Вирішення завдання забезпечення електромагнітної сумісності у сталих і перехідних режимах роботи метровагона з тяговою мережею традиційними засобами, а саме за рахунок використання пасивних *LC*-фільтрів, приводить при збільшенні потужності до неприйнятних масогабаритних показників тягової електропередачі.

Перехід до гібридних фільтрів та до підвищеної частоти широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) у ПРБ дозволяє поліпшити масогабаритні та фільтруючі характеристики БЕМС, але не вирішує завдання забезпечення електромагнітної сумісності в аномальних режимах роботи тягової мережі. При цьому треба мати на увазі, що при підвищенні частоти ШІМ, зростають комутаційні втрати в напівпровідникових приладах силових ключів ПРБ при використанні традиційної «жорсткої» комутації.

Загальне ж завдання зниження втрат потужності в ПРБ виходить на передній план також і при підвищенні напруги живлення та потужності тягових асинхронних двигунів, а також переході на їх управління від ПРБ на основі одного інвертора напруги у зв'язку з необхідністю забезпечення допустимих робочих режимів напівпровідникових ключів ПРБ при збереженні прийнятого у метровагонобудуванні підвагонного розміщення тягового електрообладнання і системи його охолодження.

Зменшення втрат потужності в ключах комутатора ПРБ можливе шляхом застосування більш енергоефективних силових високовольтних напівпровідникових приладів *IGBT* та *GCT*, які випускаються вже серійно, а також спеціальних схемотехнічних рішень щодо зниження комутаційних втрат в них. Так, для зменшення комутаційних втрат в силових напівпровідникових приладах ключів ПРБ пропонується використовувати режим однорідної (одноопераційної) комутації. Це дозволяє збільшити частоту ШІМ, при забезпеченні високих струмових навантажень ключів ПРБ поліпшити його масогабаритні показники та збільшити ККД і надійність роботи тягової асинхронної електропередачі.

Усе сказане вище дозволяє стверджувати, що тема дисертаційної роботи є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась на кафедрі систем електричної тяги УкрДАЗТ відповідно до планів науково-дослідних робіт академії, що проводяться за пріоритетними напрямками розвитку галузі у рамках теми №339-95Цтех «Розробка та дослідно-промислова реалізація високоефективної бортової системи електропостачання на базі тиристорного інвертора напруги для електровоза постійного струму» (ДР № 0196U001417), за завданням Укрзалізниці, за якою здобувач був виконавцем окремих розділів.

Матеріали дисертаційної роботи з теоретичного обґрунтування високоефективних тягових асинхронних електропередач використовувалися при виконанні госпдоговірної теми «Дослідження сучасного стану розвитку електропоїздів і розробка технічних вимог на електропоїзд змінного струму ЕПЛ 3 з асинхронним приводом для швидкісного сполучення», що виконувалась Українською державною академією залізничного транспорту за замовленням Міністерства транспорту та зв'язку України.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності тягових електропередач метровагонів з асинхронними двигунами шляхом обґрунтування вибору структури, удосконалення блоків і розробки інженерних методик розрахунку елементів тягової електропередачі у напрямку поліпшення енергетичних характеристик.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі основні завдання:

- виконати порівняльну оцінку трифазних і двофазних асинхронних електропередач;
- виконати оцінку рівня комутаційних перенапруг на вході і виході *LC*-фільтра БЕМС;
- проаналізувати коливальні режими роботи *LC*-фільтрів БЕМС і обрати найбільш доцільний спосіб їх демпфування;
- синтезувати гібридний фільтр, який забезпечує електромагнітну сумісність тягової асинхронної електропередачі метровагона і живильної тягової мережі при кращих масогабаритних показниках;
- синтезувати схему силового фазного модуля мостового інвертора при

застосуванні напівпровідникового ключа з однорідною комутацією, який забезпечує високі енергетичні показники в структурі ПРБ;

- розробити інженерні методики розрахунку елементів вузлів дросельної однорідної комутації (ВДОК) та втрат у снаберних конденсаторах силових ключів;
- розробити моделі стаціонарного та перехідного теплових режимів силових напівпровідникових ключів ПРБ.

Об'єкт дослідження – електромагнітні та теплові процеси, що протікають у БЕМС і ПРБ тягової асинхронної електропередачі метровагона.

Предмет дослідження – комутаційні і теплові характеристики елементів БЕМС і ПРБ тягової асинхронної електропередачі метровагона.

Методи дослідження. В роботі використані: при дослідженні структур БЕМС і ПРБ тягової асинхронної електропередачі метровагона при реалізації однорідної комутації - метод основних гармонік і метод комутаційних функцій; при розрахунку втрат у конденсаторі снабера силового напівпровідникового ключа - інтегральний метод; для моделювання перехідних теплових процесів - метод вузлових потенціалів; для перевірки достовірності теоретичних результатів застосовувалося цифрове імітаційне моделювання електромагнітних та теплових процесів, що протікають у напівпровідникових силових ключах перетворювачів БЕМС і ПРБ тягової асинхронної електропередачі метровагона з використанням спеціальних програм, а також фізичне моделювання на масштабному макетному зразку силового напівпровідникового ключа ПРБ тягової асинхронної електропередачі метровагона.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- одержав подальший розвиток обґрунтований вибір структури вхідного гібридного фільтра, що забезпечує електромагнітну сумісність тягової асинхронної електропередачі метровагона і тягової мережі живлення, на основі послідовного активного фільтра, що дає суттєве зниження маси фільтрового електрообладнання;

- одержала подальший розвиток методика визначення основних характеристик LC-фільтра БЕМС, що забезпечує захист при мережних перенапругах і близький до аперіодичного режим заряду його конденсатора при первинному підключенні та повторних підключеннях після відриву струмоприймача від контактної рейки;

- одержала подальший розвиток структура силового фазового модуля з вузлом однорідної комутації для мостових інверторів напруги з підвищеною частотою ШІМ, що забезпечує поліпшення їх енергетичних і масогабаритних показників за рахунок реалізації режиму «м'якої» комутації силових керуючих напівпровідникових приладів ключів;

- вперше запропоновано удосконалені методики розрахунку елементів вузла дросельної однорідної комутації та втрат у снаберних конденсаторах силових ключів, що дозволяє отримати раціональні значення їх параметрів;

- розроблено теплові моделі силових напівпровідникових ключів, які розташовані у герметичному корпусі з повітряним охолодженням, що дозволяють спростити розрахунок їх теплових характеристик у стаціонарному та перехідному теплових режимах.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

- удосконалення силових схем блоків тягової асинхронної електропередачі метровагона в напрямку спрощення та пом'якшення електромагнітних і теплових режимів роботи;
- визначення раціональних значень розрахункових параметрів елементів блоків з метою збільшення ККД, надійності, строку служби і поліпшення масогабаритних і вартісних показників.

Результати дисертації використовуються в науково-дослідних роботах в УкрДАЗТ, НТУ «ХП», МК «Енергозберігання» (м. Харків) та в СКБ ВАТ «Електромашинна» (м. Харків) зі створення силових ключів для тягових перетворювачів електрорухомого складу, в КП «Київський метрополітен» при розробці технічних вимог до тягової електропередачі на базі асинхронних двигунів для наступного покоління рухомого складу метрополітену, а також у навчальному процесі УкрДАЗТ при викладанні дисциплін «Основи промислової електроніки» і «Тягові статичні перетворювачі ЕРС» та дипломному проектуванні студентів спеціальності «Електричний транспорт», що підтверджено відповідними актами про впровадження.

Особистий внесок здобувача полягає в тому, що всі положення дисертації, які винесені на захист, отримані здобувачем одноосібно. Серед них:

- виконано аналіз електромагнітних процесів у вузлах одноопераційної комутації тягового інвертора і вдосконалено структуру силового фазного модуля для мостових інверторів напруги;
- запропоновано структуру вхідного гібридного фільтра БЕМС з активним фільтром послідовного типу і проведено оцінку його ефективності за масою;
- запропоновано застосування конструкції дроселя із замикаючим ярмом в якості комутуючого дроселя і визначено раціональні значення його параметрів та геометричних характеристик;
- доопрацьовано інтегральну методику розрахунку втрат у снаберних конденсаторах ключів;
- розроблено узагальнену теплову модель силового напівпровідникового ключа і визначено фактори, які необхідно враховувати при її складанні, розроблено теплові моделі силового напівпровідникового ключа в перехідному режимі.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися на: міжнародній науково-технічній конференції «Комп'ютер: наука, техніка, технологія, здоров'я» – Харків, Мішкольц: ХП, МУ (1993 р., м. Харків); науково-технічних конференціях кафедр Української державної академії залізничного транспорту (1996 – 2006 рр., м. Харків); семінарах наукової ради НАН України «Напівпровідникові та мікропроцесорні пристрої в електроенергетичних системах транспорту» з комплексних проблем «Наукові основи електроенергетики» (1998 – 2006 рр., м. Харків); міжнародному симпозиумі «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика» (2005 р., м. Харків).

У повному обсязі результати роботи доповідалися на розширеному засіданні кафедри систем електричної тяги УкрДАЗТ (2007 р.) за участю членів

спеціалізованої вченої ради Д 64.050.15.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 12 робіт, із яких 11 у фахових наукових виданнях ВАК України.

Структура дисертації. Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і 4 додатків. Повний обсяг дисертації складає 177 сторінок: із них 38 ілюстрацій у тексті; 11 ілюстрацій на 7 сторінках; 5 таблиць у тексті; 127 використаних джерел на 14 сторінках; додатки на 4 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, показано зв'язок роботи з науковими програмами, сформульовано мету і завдання дослідження, викладено методи дослідження, наукову новизну, практичне значення результатів дисертації і наведено відомості про апробацію роботи та публікації.

Розробкою, випробуванням і впровадженням нових напівпровідникових перетворювачів займалися такі відомі вчені в галузі електричного транспорту як Тулупов В.Д., Розенфельд В.Є., Тіхменьов Б.М., Трахтман Л.М., Ротанов М.А., Феоктістов В.П., Солодунов А.М., Іньков Ю.М. та інші. Сьогодні перед розробниками перетворювачів електроенергії для нових метропоїздів України стоїть комплекс задач зі створення БЕМС і ПРБ, які увійдуть у склад енергоефективних тягових асинхронних електропередач метровагонів. Для таких систем важливими є: високі надійність і ККД, мінімальні маса і габарити при відносно невеликій вартості та експлуатаційних витратах.

У розвиток вітчизняного частотно-регульованого асинхронного електроприводу для тягового рухомого складу значний внесок роблять наукові школи: Київська - під керівництвом академіка НАН України, проф., д.т.н. Шидловського А.К., Запорізька - під керівництвом проф., д.т.н. Андрієнка П.Д., Дніпропетровська - під керівництвом проф., д.т.н. Браташа В.О., Харківська - під керівництвом проф., д.т.н. Панасенка М.В.

У першому розділі проведено обґрунтування побудови структури тягової асинхронної електропередачі метровагона і визначено основні її блоки. Структура складається з послідовно з'єднаних:

- блока електромагнітної сумісності, який забезпечує функціональну і режимну сумісність тягової електропередачі метровагона і тягової мережі метрополітену;
- перетворювально-регулюючого блока, який забезпечує перетворення постійної напруги тягової мережі у змінну напругу, що регулюється за величиною і частотою, фазність якої відповідає фазності асинхронних тягових двигунів;
- електромеханічного блока, який забезпечує перетворення електричної енергії змінного струму в механічну енергію обертання вала асинхронних тягових двигунів та захист тягових асинхронних двигунів від ударних моментів при відмовах у ПРБ.

Розглянуто роботу ключа *IGBT* у мостових комутаційних структурах з індуктивним навантаженням при традиційній «жорсткій» комутації його силового

транзистора і силові схеми окремих блоків тягової електропередачі метровагонів з двофазними і трифазними двигунами з урахуванням рекомендацій робіт закордонних та вітчизняних авторів щодо забезпечення мінімально можливих масогабаритів силового тягового електрообладнання, сучасної елементної бази і принципів побудови ПРБ тягової асинхронної електропередачі метровагона.

Для висновку про доцільність використання у метровагонобудуванні двофазних тягових асинхронних двигунів проведено порівняльну оцінку двофазної та трифазної схем частотно-регульованого електроприводу: по-перше, за спектральним складом їх напруг і струмів, по-друге, за установленою потужністю їх вентильних комплектів і, по-третє, за режимами короткого замикання їх тягових двигунів при відмовах у комутаторах інверторів напруги.

Як показали теоретичні дослідження, при рівних комутаційних втратах у ключах ПРБ при реалізації «жорсткої» комутації у двофазній схемі можна у два рази збільшити частоту ШІМ і отримати пропорційне зниження вищих гармонік як у вихідному струмі, так і в струмі джерела живлення. Ця перевага є найбільш суттєвою для тягових електроприводів метровагонів, оскільки вхідний *LC*-фільтр, через високі вимоги до згладжування пульсацій струму в тяговій мережі, є найгрозоміздкішим вузлом БЕМС.

При визначенні установленої потужності вентильного комплексу силових схем трифазного і двофазного тягового асинхронного електроприводу враховувалася не тільки установлена потужність напівпровідникових ключів комутатора інвертора, а й установлена потужність чотириквadrантних ключів вузлів захисту від короткого замикання асинхронного двигуна при відмовах в комутаторі інвертора напруги, що і дає однаково установлену потужність стосовно вентильних комплектів цих двох схем.

За струмами короткого замикання асинхронних тягових двигунів при відмовах в інверторі напруги типу «пробиття» ключа двофазна і трифазна схеми практично є рівноцінними.

Таким чином, проведена порівняльна оцінка дозволяє стверджувати, що в тягових асинхронних електропередачах метровагонів може застосовуватися при практичній реалізації також і двофазна силова схема. Тому науково-технічні завдання підвищення ефективності тягової асинхронної електропередачі метровагона рівною мірою відносяться як до традиційної трифазної, так і до двофазної силових схем електропередач.

У другому розділі проведено дослідження режимів роботи і синтезу параметрів елементів блока забезпечення електромагнітної сумісності тягової електропередачі метровагонів та тягової мережі живлення. Запропонований БЕМС зменшує, а іноді зовсім виключає їх взаємний негативний вплив у робочих та аномальних режимах. Він забезпечує:

- допустимий рівень перенапруг на вході ПРБ при аномальних режимах роботи тягової мережі живлення, що обумовлюють появу перенапруг на вході тягової асинхронної електропередачі метровагона;
- аперіодичний (або близький до нього) процес заряду конденсатора *LC*-фільтра при підключенні тягової електропередачі до тягової мережі живлення і повторних

торканнях струмоприймачем контактної рейки після відриву;

- допустимий рівень пульсацій струму в тяговій мережі живлення при сталих та перехідних режимах роботи тягової передачі з точки зору надійного функціонування пристроїв зв'язку і автоматики метрополітену;

- м'який перехід у режим реостатного гальмування метровагона при відсутності в тяговій мережі споживачів енергії рекуперації і знятті напруги живлення (відрив струмоприймача, наїзд на нейтральну вставку, спрацьовування швидкодіючого вимикача);

- захист ПРБ від струмів розряду конденсатора LC -фільтра при коротких замиканнях у фазах комутатора інвертора.

Комутаційні перенапруги на вході тягової асинхронної електропередачі метровагону приводять до дуже небезпечних одноразових перенапруг на вході ПРБ, що є недопустимим з точки зору надійності його вентиляного комутатора. Найбільшою проблемою для працюючого метровагона є перенапруга, яка обумовлена відключенням від тягової мережі інших метровагонів з аварійним режимом у вигляді короткого замикання. Виконано оцінку рівня мережних комутаційних перенапруг на вході та виході LC -фільтра. Показано, що для кількісної оцінки величини мережних комутаційних перенапруг необхідно враховувати часткові значення індуктивності та активного опору тягової мережі метрополітену, які будуть максимальні для випадку, коли метропоїзд знаходиться посередині ділянки між двома підстанціями.

Для обмеження напруги на вході ПРБ застосовано часовий спосіб затримки наростання напруги на фільтровому конденсаторі C_d , при якому за допомогою індуктивності L_d забезпечується затримка наростання напруги на конденсаторі LC -фільтра і, відповідно, на вході вентиляного комутатора ПРБ, силові ключі якого найбільш вразливі до перенапруг. Водночас ця затримка використовується для відключення тягової асинхронної електропередачі метровагона від контактної рейки за допомогою автоматичного швидкодіючого вимикача. Дуже важливо, щоб осердя фільтрового дроселя не насичувалося до моменту часу, коли тягова передача відключиться швидкодіючим вимикачем від джерела живлення. Для цього повинна виконуватися умова

$$F_u = L_d(I_{I_{m}} - i_d) \leq WF_0(B_s - B_m), \quad (1)$$

де F_u – вольтсекундна площа прикладеної до обмотки дроселя напруги; F_0 – поперечний переріз осердя дроселя; W – число витків обмотки дроселя; B_s , B_m – індукція насичення і прийнята розрахункова робоча індукція матеріалу осердя відповідно; $I_{I_{m}}$ – амплітуда струму живлення.

Слід відмітити, що джерелом одиночних імпульсів на вході вентиляного комутатора ПРБ у тяговій асинхронній електропередачі метровагона можуть бути і коливальні процеси в LC -фільтрі при первинному підключенні, а також через нестійкість контакту між струмоприймачем метровагона і контактною рейкою у процесі руху метропоїзда. Для забезпечення аперіодичності процесу заряду конденсатора вхідного фільтра тягової передачі ЕРС постійного струму

використовують демпфування LC -фільтра за допомогою уведення в коло заряду додаткового демпуючого резистора, шунтованого контактором. Більш доцільним способом демпфування LC -фільтра відносно його застосування у тяговій асинхронній електропередачі метровагона є спосіб, який базується на використанні для придушення перенапруг на фільтровому конденсаторі регулятора реостатного гальма, який є обов'язковим елементом тягової асинхронної електропередачі метровагона.

Виконані теоретичні дослідження дозволяють синтезувати параметри елементів демпфованого одноланкового LC -фільтра, структура якого не потребує ускладнення силової схеми БЕМС. Однак, як показують експериментальні дослідження роботи ЕРС постійного струму з асинхронними двигунами в перехідних режимах, використання одноланкових LC -фільтрів у тяговій асинхронній електропередачі метровагона не повною мірою забезпечує електромагнітну сумісність метропоїздів з тяговою мережею у цих режимах. У зв'язку з цим запропоновано використовувати в тяговій асинхронній електропередачі метровагона гібридний фільтр, у якому придушення високочастотних гармонік забезпечує пасивний одноланковий LC -фільтр, а придушення низькочастотних гармонік – активний фільтр.

Проведені дослідження структур гібридних фільтрів показали, що більш доцільною структурою для БЕМС тягової асинхронної електропередачі метровагона є гібридний фільтр з послідовним вмиканням активного фільтра (рис.1).

Рис.1. Силова схема гібридного фільтра послідовного типу

Для забезпечення сталого режиму роботи активного фільтра необхідно на ємнісному накопичувачі підтримувати напругу, яка дорівнює або трохи більша амплітуди гармонік, що придушуються

$$U_{Cne} \geq K_{nu} \cdot U_d, \quad (2)$$

де U_d - постійна складова напруги на конденсаторі фільтра C_d ;

K_{nu} – коефіцієнт пульсацій напруги на конденсаторі фільтра C_d .

Установлено, що при забезпеченні електромагнітної сумісності метровагона з асинхронними двигунами пускової потужності 1000 кВт і тяговою мережею метрополітену маса гібридного фільтра менша в 3,5 рази в порівнянні з чисто пасивним фільтром, вирішуючим те ж завдання. При цьому придушення амплітуд гармонік струмів і напруг у діапазоні частот від 1 – 150 Гц у гібридному фільтрі збільшується у десятки разів, що є ще однією перевагою застосування цього типу фільтра.

У третьому розділі розглянуті питання підвищення ефективності ПРБ тягової асинхронної електропередачі метровагона. Досвід експлуатації автономних тягових перетворювачів, що побудовані на базі сучасних швидкодіючих силових модулів *IGBT*, разом з їх суттєвими перевагами виявив ряд недоліків. Вони пов'язані з необхідністю формування комутаційних траєкторій з безпечним для напівпровідникових ключів рівнем швидкості зростання напруги (du/dt) і струму (di/dt) . Це призводить до того, що в силових модулях *IGBT* автономних тягових перетворювачів, незважаючи на їх відносно високу швидкодію, дуже значні комутаційні втрати. В результаті знижується ККД тягових перетворювачів і обмежується робоча частота, що призводить до необхідності застосування «важких» вхідних силових фільтрів. Крім цього, круті фронти вихідної напруги викликають прискорене старіння ізоляції тягових двигунів і значне шкідливе електромагнітне випромінювання. Застосування додаткових силових вихідних фільтрів, що пропонують фірми-розробники перетворювачів, для рухомого складу не можна вважати найбільш доцільним варіантом рішення цих проблем у тягових електропередачах метровагонів.

Для виключення вказаних вище недоліків найбільш доцільно застосовувати схеми тягових перетворювачів з вузлами одноопераційної комутації. Такі схеми забезпечують формування фронтів напруги і струму в силових ключах з необхідною крутизою при мінімальних комутаційних втратах.

Схема фазового модуля мостового інвертора напруги з вузлом двоступеневої дросельної одноопераційної комутації (ВДОК) на базі схеми Мак-Мурі з поліпшеними техніко-економічними показниками, яка є досить перспективною для застосування у тягових інверторах асинхронних електропередач метровагонів, наведена на рис. 2.

Рис. 2. Схема фазового модуля (однофазного напівмоста)
із двоступеневою однорідною комутацією

ВДОК забезпечує увімкнення силових транзисторів $VT1$ і $VT2$ при нульовій напрузі на них. Для цього перед увімкненням транзистора включають чотириквadrантний ключ VS і через протифазний діод, який проводить струм i_0 , почне протікати наростаючий струм i_k . Під дією струму i_k проходить знеструмлення діода і відновлення його блокуючих властивостей. Так як діод запізнюється з вимиканням при нулі струму через нього, а вимикається тільки при деякому зворотному струмі $i_{зв}$, який може бути навіть більшим за i_0 , то при відновленні його блокуючих властивостей зворотний струм $i_{зв} = i_k - i_0$ переходить на діод ключа, що вмикається і тим самим створює на його транзисторі нульову напругу.

Як показує аналіз, габаритні розміри, маса і втрати у вузлах двоступеневої одноопераційної комутації визначаються, у першу чергу, відповідними параметрами комутуючого дроселя. Дроселі вузлів двоступеневої комутації дуже малої індуктивності працюють в імпульсному режимі при відносно малій скважності і високій швидкості зміни струму в обмотках. Проведені дослідження і роботи інших авторів дозволяють стверджувати, що для перетворювачів з жорсткими вимогами до габаритного об'єму, якими є тягові перетворювачі для рухомого складу, підходять тільки ті конструкції дроселів, у яких магнітне поле не виходить за межі внутрішньої порожнини котушки дроселя. Цим вимогам задовольняють тороїдальні дроселі та дроселі з замикаючим ярмом. Оскільки тороїдальні дроселі складні у виготовленні, більш доцільне застосування дроселів із замикаючим ярмом.

Для визначення геометричних і електричних характеристик комутуючого дроселя із замикаючим ярмом у функції базисного розміру котушки a використовують такі співвідношення:

$$L = \frac{\mu_0 W^2 F_M^*}{2h^*} a, \quad F_M^* \cong \left(1 + \frac{2}{3} \Delta^*\right)^2, \quad W = \frac{2 \cdot \Delta^* \cdot h^* \cdot K_k \cdot j}{I} a^2, \quad (3)$$

де W - сумарне число витків котушок; h^* - відносна висота котушки; F_M^* - відносний поперечний переріз магнітного потоку в еквівалентній нескінченно тонкій котушці; j - щільність струму; K_K - коефіцієнт заповнення котушки провідниковим матеріалом; Δ^* - відносна товщина котушки.

Для мінімізації втрат потужності в комутуючому дроселі визначені раціональні значення h^* та Δ^* .

Для розрахунку раціонального значення h^* прирівнюємо окремо для котушок та ярем фактичні втрати потужності та потужність, яка знімається у вигляді тепла із зовнішньої поверхні, і отримуємо питомі втрати потужності в котушках (P_k^*) та ярямах ($P_я^*$).

$$P_k^* = \frac{P_k}{S} = \alpha \tau_n (4 + 2\pi\Delta^*) K_a^2 \sqrt{\frac{h^*}{S f_{ei}}} = K_p \sqrt{h^*},$$

$$P_я^* = \frac{P_я}{S} = \frac{K_n \gamma_c B_m^2 P_y I_я^*}{4 K_{\phi u} f_{\phi u} K_k \Delta^* K_j K_a^{1/2} h^{*7/8}} \left(\frac{f_{\phi i}}{S} \right)^{1/8} = \frac{K_{pя}}{h^{*7/8}}, \quad (4)$$

де S - потужність дроселя; K_p та $K_{pя}$ - коефіцієнти, які не залежать від h^* .
Мінімум сумарних втрат відповідає умові

$$\frac{dP^*}{dh^*} = \frac{d(P_k^* + P_я^*)}{dh^*} = 0. \quad (5)$$

Звідки

$$h_{рац}^* = \left(\frac{7K_{pя}}{4K_p} \right)^{8/11},$$

$$P_{min}^* = 1,93 K_p^{7/11} K_{pя}^{4/11}. \quad (6)$$

Для розрахунку раціонального значення Δ^* необхідно знати максимально допустиму товщину стрічки за умови втрат від вихрових струмів.

$$\Delta_{np} = 1,35 \frac{\rho j}{B_{mk} f_{ei}} \sqrt{P_{ex}^*},$$

$$B_{mk} = \frac{\sqrt{2} \cdot \mu_0 I \cdot W}{2h}, \quad (7)$$

де B_{mk} - амплітуда індукції магнітного поля, що створюється в котушці еквівалентним синусоїдальним струмом I з частотою f_{ei} ; ρ - питомий електричний опір провідникового матеріалу; j - щільність струму в провіднику;

$P_{ex}^* = 0,1 - 0,2$ - допустимі відносні втрати от вихрових струмів.

Встановлена з рахуванням малості Δ^* приблизна умова

$$\Delta_{\text{пр}} \sim \frac{1}{\Delta^*}, \quad (8)$$

із якої видно, що для підвищення допустимого $\Delta_{\text{пр}}$ необхідно пропорційно знизити товщину котушки Δ^* .

Розрахунок параметрів стержнів, що насичуються, які формують ступінь малого струму тривалістю t_{cm} при включенні та виключенні вузла комутації, визначається з рівняння

$$W \cdot F_n \cdot \Delta B = \frac{U_d}{2} \cdot t_{cm}, \quad (9)$$

де F_n – поперечний переріз феритового стержня; $\Delta B \cong 2B_s$ – прирощення індукції в стержні на інтервалі ступеня малого струму; B_s – індукція феріта, що насичується.

Приєднання конденсаторів снабера (на рис. 2 снаберні конденсатори показані пунктиром) дозволяє практично позбавитися від комутаційних втрат і при вимиканні силових транзисторів фазового модуля, а також обмежити крутість фронтів вихідної напруги. На рис. 3 наведено комутаційні процеси в схемі рис. 2 із снаберними конденсаторами, які показують, що перед переходом збиткового струму $i_{zb} = i_k - i_0$ на діод, що вмикається, виконується коливальний розряд снаберного конденсатора до нуля з передачею енергії, що запасується в ньому, в навантаження. Отже, чергове вимикання транзистора ключа буде виконуватися при нульовій напрузі на снаберному конденсаторі.

Рис.3. Комутаційні процеси в ВДОК інвертора із снаберним конденсатором

Характеристикою втрат енергії у вузлі комутації в першому наближенні є діючий струм. На рис. 4 показана залежність квадрата діючого струму від швидкості зміни струму i_k . З цієї залежності видно, що поблизу точки мінімуму діючий струм мало зростає в порівнянні з мінімальним значенням. Практично можна приймати швидкість зміни струму комутації в межах 0,7 – 1,4 від його мінімальної величини.

Рис. 4. Залежність квадрату діючого струму ВДОК від швидкості зміни струму

При розрахунку втрат потужності в снаберному конденсаторі встановлено, що, оскільки напруга на конденсаторі сильно відрізняється від синусоїдальної і потребує урахування великої кількості гармонік, доцільно замінити суму втрат, обумовлених окремими гармоніками прикладеної напруги інтегралом від функції втрат P_r , яка вважається безперервною, а також розкласти втрати на складові, обумовлені окремими фронтами напруги.

При нескінченно короткому імпульсі усі гармоніки прямокутного ідеалізованого струму однакові і залежать тільки від площі імпульсу та періоду. При цьому, функція втрат змінюється за законом, близьким до гіперболічного, і при співвідношенні $t_\phi / T \leq 0,02$ похибка не перевищує 15%, що припустимо для інженерних розрахунків.

Визначено залежність фактичних і розрахункових втрат потужності в снаберному конденсаторі від відстані між фронтами наростання і спаду напруги t_m при допущенні, що повні втрати дорівнюють сумі втрат, обумовлених кожним фронтом окремо.

Встановлено, що при наявності припустимої похибки розрахунку, умова незалежності фронтів може бути прийнята при $t_m \geq 0,1T$, при менших значеннях t_m фактичні втрати будуть менші за розрахункові.

Незначна результуюча похибка розрахунку втрат інтегральним методом виходить у зв'язку з тим, що дві складові втрат мають різні знаки.

У четвертому розділі розглянуті питання моделювання теплових процесів в силових ключах ПРБ тягової асинхронної електропередачі метровагона. Методика теплових розрахунків дуже громіздка, що пов'язано зі складним

характером взаємозв'язків елементів силових напівпровідникових ключів один з одним, з корпусом і навколишнім середовищем. Точне урахування усіх факторів призводить до дуже складних теплових моделей, користуватися якими на практиці досить важко. Тому в тепловій моделі доцільно враховувати найбільш суттєві фактори, нехтуючи несуттєвими.

Розроблена узагальнена теплова модель в стаціонарному режимі силового ключа стосовно його розміщення в герметичній оболонки блоку ПРБ, на основі якої в конкретних умовах можна спростити визначення раціонального теплового режиму силового ключа.

У зв'язку з тим, що найбільш вразливою і найбільш нагрітою ділянкою силового ключа ПРБ є *p-n*-перехід силового напівпровідникового приладу, доцільно оцінювати вплив різних факторів на температуру саме *p-n*-переходу.

Встановлено, що для моделювання перехідних теплових процесів доцільно застосовувати метод вузлових потенціалів, при якому базисними змінними є теплові потоки і перегрів між вузлами гілок схеми та незалежним вузлом, що характеризує термопотенціал оточуючого середовища. Цей метод має більш високу стійкість обчислювального процесу, навіть при великому відхиленні постійних часу.

Порівняльний аналіз несиметричної і симетричної конструкцій тепловідводу силового ключа ПРБ показує, що при перегріві $\tau = 50 - 70$ °С в сталому тепловому режимі симетричне коло теплопередачі силового напівпровідникового приладу дозволяє підвищити потужність розсіювання в 1,3 – 1,5 разів, а в годинному – в 1,5 – 1,6 разів.

У п'ятому розділі виконано порівняльний аналіз комутаційних втрат в комутаторі інвертора напруги при різних структурах тягової асинхронної електропередачі метровагону. При ідентичних вихідних даних комутаційні втрати в 3-х фазній схемі з ВДОК менше в 4,9 рази, а в 2-х фазній схемі з ВДОК - менше в 8,7 разів, ніж в 3-х фазній схемі інвертора з безснаберним режимом роботи силових ключів.

Розроблено установку для експериментального дослідження характеристик вузла двоступеневої одноопераційної комутації для фізичного моделювання, яка дозволяє проводити дослідження вузла комутації з параметрами, близькими до тих, що будуть в реальному метровагоні при малій статичній потужності навантаження. Отримані експериментальні осцилограми напруг і струмів елементів вузла комутації підтвердили теоретичні положення.

Проведене імітаційне комп'ютерне моделювання функціонування гібридного фільтра послідовного типу підтвердило його фільтруючу ефективність.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена розробці науково обґрунтованих основ підвищення ефективності тягових електропередач метровагонів з асинхронними двигунами шляхом поліпшення техніко-економічних показників основних вузлів:

БЕМС та ПРБ при використанні гібридних фільтрів в БЕМС та одноопераційної комутації в силових ключах ПРБ.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Виконано аналіз силових схем частотно-регульованого електроприводу електрорухомого складу постійного струму з асинхронними двигунами, який дозволив обґрунтувати вибір структури тягової асинхронної електропередачі метровагона для метровагона підвищеної потужності. Проведено порівняльну оцінку трифазних і двофазних схем тягових асинхронних електропередач і встановлено, що для тягової асинхронної електропередачі метровагона при рівних комутаційних втратах в ключах більш доцільно використовувати двофазну схему тягової асинхронної електропередачі, що дозволяє вдвічі збільшити частоту ШІМ і отримати зниження потужності LC - фільтра БЕМС.

2. Встановлено, що коли тривалість імпульсу комутаційної перенапруги мережі на вході LC - фільтра тягової електропередачі метровагона менша чверті періоду власних коливань недемпфованого LC - фільтра, то величина перенапруги на виході LC - фільтра буде меншою в порівнянні з величиною перенапруги (ΔU) на його вході; при більших тривалостях імпульсу комутаційної перенапруги ця величина буде близькою до ΔU і не буде залежати від тривалості комутаційного імпульсу перенапруги мережі.

3. Запропоновано демпфувати коливальні процеси в LC - фільтрі, що обумовлені початковим зарядом фільтрового конденсатора, а також процесами його заряду при повторному торканні струмоприймачем метровагона контактної рейки після відриву, використовуючи регулятор динамічного гальма, який є невід'ємною частиною тягової електропередачі метровагонів.

4. Запропоновано для забезпечення електромагнітної сумісності тягової асинхронної електропередачі метровагона і тягової мережі метрополітену використовувати гібридний фільтр послідовного типу, який складається із пасивного LC - фільтра, котрий забезпечує придушення високочастотних гармонік, та активного фільтра послідовного типу – для придушення низькочастотних гармонік. В порівнянні з чисто пасивним, гібридний фільтр має масу в 3,5 рази менше.

5. Для забезпечення високих енергетичних та масогабаритних показників ПРБ тягової асинхронної електропередачі метровагона розроблено фазовий модуль для мостових інверторів, який складається із двоквADRантних силових напівпровідникових ключів знакозмінного струму і схеми ВДОК з комутуючим дроселем, штучною нульовою точкою джерела живлення, створеною ємнісним дільником, чотириквADRантним ключем, в котрому практично відсутні комутаційні втрати в силових напівпровідникових приладах ключів при одночасному обмеженні крутизни фронтів вихідної напруги.

6. Виконано дослідження з підвищення ефективності ВДОК для ПРБ метровагонів. Встановлено, що для тягових перетворювачів метровагонів найбільш доцільно застосовувати конструкції комутуючих дроселів з замикаючим ярмом. Аналіз їх конструкції дозволив виявити раціональні значення в напрямку мінімізації втрат потужності в ньому.

7. Встановлено співвідношення, які дозволяють отримати раціональні значення за відносною товщиною котушки комутуючого дроселя з замикаючим ярмом, що дало можливість визначити максимально-допустиму товщину стрічки за умов мінімізації втрат від вихрових струмів в обмотці дроселя.

8. Запропоновано удосконалені методики розрахунку елементів ВДОК та втрат у снаберних конденсаторах силових ключів, що дозволяє отримати раціональні значення їх параметрів (комутаційні втрати, масогабарити, втрати у комутуючому дроселі та снаберних конденсаторах) стосовно використання ВДОК в ПРБ метровагонів.

9. Проаналізовано теплові моделі управляючих силових ключів (УСК) та розроблено узагальнену теплову модель УСК з урахуванням їх розміщення в герметичній оболонці блока ПРБ метровагону, яка дозволяє суттєво спростити розрахунок теплових режимів силових напівпровідникових ключів. Визначено найбільш доцільний метод дослідження перехідних і стаціонарних теплових режимів УСК (метод вузлових потенціалів). Виконано моделювання перехідних та стаціонарних теплових режимів УСК і дано рекомендації щодо застосування несиметричної та симетричної конструкцій УСК.

10. Вірогідність теоретичних розробок і можливість практичної реалізації УСК з одноопераційною комутацією ПРБ тягової асинхронної електропередачі метровагона стосовно метровагонів підвищеної потужності підтверджено цифровим імітаційним та фізичним моделюванням при високій збіжності результатів.

11. Результати дисертації використовуються при проведенні науково-дослідних робіт в УкрДАЗТ, НТУ «ХПІ», МК «Енергозберігання», в СКБ ВАТ «Електромашини» та в КП «Київський метрополітен» при розробці технічних вимог до тягової електропередачі на базі асинхронних двигунів для наступного покоління рухомого складу метрополітену, а також в навчальному процесі УкрДАЗТ при викладанні дисциплін «Основи промислової електроніки» і «Тягові статичні перетворювачі ЕРС» та дипломному проектуванні студентів спеціальності «Електричний транспорт», що підтверджено відповідними актами про впровадження.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Темкина Л.М., Панасенко Н.В., Никулин В.С. Сравнительный анализ коммутирующих дроселей // Вестник Харьковского политехнического института. - Харьков: Вища школа. Изд – во при Харьк. ун – те, 1981. - Вып. 6. – С. 51 – 52.

Здобувачем рекомендовано конструкцію дроселя із замикаючим ярмом для ВДОК транспортних перетворювачів.

2. Панасенко Н.В., Аникеева К.Н., Никулин В.С. Расчет стационарного теплового режима полупроводниковых преобразовательных устройств // Электротехника. – М.: Энергоатомиздат, 1989. - №4. - С. 50 – 53.

Здобувачем розроблена узагальнена теплова модель силових ключів напівпровідникових перетворювальних пристроїв.

3. Анікеева К.М., Нікулін В.С. Вплив різних факторів на тепловий режим напівпровідникових пристроїв // Зб. наук. пр. ХарДАЗТ. – Харків: ХарДАЗТ, 2000. – Вип. 39. - С. 18 – 24.

Здобувачем визначено фактори, які необхідно враховувати при складанні теплової моделі напівпровідникових пристроїв.

4. Гончаров Ю.П., Панасенко М.В., Хворост М.В., Чумак В.В., Нікулін В.С. Тягові інвертори з одноопераційною комутацією // Зб. наук. пр. УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2003. – Вип. 55 - С. 31 – 40.

Здобувачем виконано аналіз електромагнітних процесів у вузлах одноопераційної комутації тягового інвертора.

5. Хворост М.В., Гончаров Ю.П., Семененко О.І., Нікулін В.С. Комутуючі дроселі тягових автономних перетворювачів з вузлами двоступеневої одноопераційної комутації // Зб. наук. пр. УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2004. – Вип. 57. - С. 46 – 53.

Здобувачем встановлено раціональні значення параметрів комутуючого дроселя із замикаючим ярмом.

6. Нікулін В.С., Хворост М.В., Гончаров Ю.П., Семененко О.І. Оптимізація параметрів вузлів двоступеневої одноопераційної комутації тягових автономних перетворювачів рухомого складу // Зб. наук. пр. УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2004. – Вип. 64. - С. 153 – 158.

Здобувачем визначено раціональні геометричні характеристики комутуючого дроселя.

7. Хворост М.В., Гончаров Ю.П., Панасенко М.В., Замаруєв В.В., Чумак В.А., Панасенко Н.М. Хворост В.Ю., Нікулін В.С. Види комутації та енергетичні характеристики в електричних колах з ключовими елементами // Електротехніка і Електромеханіка, 2005. – №4. - С. 67 - 72.

Здобувачем проаналізовані електромагнітні процеси у вузлі дросельної комутації.

8. Хворост Н.В., Никулин В.С., Капустян М.А. Построение входного фильтра блока электромагнитной совместимости тяговой асинхронной электропередачи метровагона // Зб. наук. пр. УкрДАЗТ. - Харків: УкрДАЗТ, 2005. - Вип. 69. – С. 115 – 124.

Здобувачем запропонована структура вхідного фільтра з активним фільтром послідовного типу.

9. Хворост Н.В., Никулин В.С., Гончаров Ю.П., Ивахно В.В., Замаруєв В.В. Методика определения потерь в коммутирующих конденсаторах тяговых преобразователей подвижного состава // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДАЗТ, 2005. - №6 – С. 94 – 97.

Здобувачем доопрацьована інтегральна методика розрахунку втрат в конденсаторах ключів.

10. Нікулін В.С. Обґрунтування вибору структури тягової асинхронної електропередачі метровагонів // Зб. наук. пр. УкрДАЗТ. - Харків: УкрДАЗТ, 2006. - Вип. 76. – С. 139 – 142.

11. Хворост Н.В., Никулин В.С. Оценка эффективности гибридного фильтра блока электромагнитной совместимости тяговой электропередачи метровагона и контактной сети питания метрополитена // Інформаційно – керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДАЗТ, 2006. - №4. – С. 97 – 100.

Здобувачем проведена оцінка ефективності за масою гібридного та чисто пасивного фільтрів.

12. Тимченко Н.А., Никулин В.С. Математическое моделирование тепловых режимов тиристорного блока //: Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Компьютер: наука, техника, технология, здоровье». – Харьков, Мишкольц: ХПИ, МУ, 1993. – С. 88 - 90.

Здобувачем запропоновано застосування метода вузлових потенціалів при моделюванні теплових характеристик тиристорного блоку у перехідному режимі.

АНОТАЦІЯ

Никулин В.С. Підвищення ефективності тягових електропередач метровагонів з асинхронними двигунами. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.22.09 – електротранспорт. Українська державна академія залізничного транспорту, Харків, 2007.

В дисертації розглянуто шляхи підвищення ефективності тягових електропередач метровагонів з асинхронними двигунами. Для вирішення цієї задачі запропоновано схему ВДОК, яка дозволяє практично позбавитися від комутаційних втрат в силових напівпровідникових приладах комутатора інвертора, при одночасному обмеженні крутизни фронтів вихідної напруги, а також удосконалені методики розрахунку елементів фазного модуля, що дозволяє мінімізувати їх енергетичні та масогабаритні параметри.

Запропоновано демпфувати коливальні процеси в LC-фільтрі, що обумовлені початковим зарядом фільтрового конденсатора, а також процесами його заряду при повторному торканні струмоприймачем контактної рейки після відриву, використовуючи регулятор динамічного гальма, та використовувати гібридний фільтр послідовного типу для забезпечення електромагнітної сумісності тягової асинхронної електропередачі метровагона і тягової мережі метрополітену.

Розроблено узагальнену теплову модель УСК ПРБ, визначено найбільш доцільні методи дослідження перехідних і стаціонарних теплових режимів УСК і дано рекомендації щодо застосування несиметричної та симетричної конструкцій УСК.

Ключові слова: електрообладнання електротранспорту, тягова асинхронна електропередача метровагона, блок електромагнітної сумісності, перетворювально - регулюючий блок, одноопераційна комутація, управляючий силовий ключ, комутаційні втрати, гібридний фільтр послідовного типу, тепла модель УСК.

АННОТАЦИЯ

Никулин В.С. Повышение эффективности тяговых электропередач метровагонов с асинхронными двигателями. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 – электротранспорт. Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков, 2007.

В диссертации рассмотрены пути повышения эффективности тяговых электропередач метровагонов с асинхронными двигателями. Для решения поставленной задачи предложено использовать в управляемых силовых ключах преобразовательно-регулирующего блока тяговой асинхронной электропередачи метровагона режим однооперационной коммутации ключей, что обеспечивает уменьшение коммутационных потерь в них. Разработана схема узла двухступенчатой однооперационной коммутации с нелинейным коммутирующим дросселем и искусственной нулевой точкой источника питания, которая позволяет практически избавиться от коммутационных потерь в силовых полупроводниковых приборах коммутатора инвертора при одновременном ограничении крутизны фронтов выходного напряжения.

Установлено, что для тяговых преобразователей подвижного состава наиболее целесообразно применять конструкции коммутирующих дросселей с замыкающим ярмом. При выполнении обмотки коммутирующего дросселя в виде широкой тонкой ленты получены рациональные значения по относительным высоте и толщине катушки дросселя, что дало возможность минимизировать потери мощности в нем. Установленный внутри катушки насыщающийся сердечник, позволяет также снизить коммутационные потери в четырехквadrантном коммутирующем ключе узла двухступенчатой однооперационной коммутации. Предложены усовершенствованные методики расчета элементов фазного модуля, позволяющие минимизировать их энергетические и массогабаритные параметры.

Выполнен анализ силовых схем частотно-регулируемого электропривода электроподвижного состава постоянного тока с асинхронными двигателями, и обоснован выбор структуры тяговой асинхронной электропередачи метровагона. Проведена сравнительная оценка трехфазных и двухфазных схем тяговых асинхронных электропередач для вывода о целесообразности их использования в метровагоностроении.

Предложено демпфировать колебательные процессы в LC -фильтре, обусловленные начальным зарядом фильтрового конденсатора, а также процессами его заряда при повторных касаниях токоприемником контактного рельса после отрыва, используя регулятор динамического тормоза, а для обеспечения электромагнитной совместимости тяговой асинхронной электропередачи метровагона и тяговой сети метрополитена использовать гибридный фильтр последовательного типа.

Разработана обобщенная тепловая модель управляемого силового ключа, позволяющая несложно рассчитывать его рациональные тепловые режимы.

Определены наиболее целесообразные методы исследования переходных и стационарных тепловых режимов управляемых силовых ключей, выполнено моделирование их переходных и стационарных тепловых режимов, и даны рекомендации по применению несимметричной и симметричной конструкций управляемых силовых ключей.

Ключевые слова: электрооборудование электротранспорта, тяговая асинхронная электропередача, блок электромагнитной совместимости, преобразовательно-регулирующий блок, однооперационная коммутация, управляемый силовой ключ, коммутационные потери, гибридный фильтр последовательного типа, тепловая модель УСК.

SUMMARY

Nikulin V.S. Efficiency increase of tractive electricity transmissions of underground cars with asynchronous engines. - The Manuscript.

The thesis for the degree of Candidate of Science in the speciality 05.22.09 – Electric Transport. The Ukrainian State Academy of Railway Transport, Kharkiv, 2007.

The thesis deals with the ways of efficiency increase of tractive electricity transmissions of underground cars with asynchronous engines. For the solution of the assigned task it has been offered to use the node circuit of double-stage single operational commutation with nonlinear commutating throttle and artificial zero point of the power supply. The given node circuit allows to get rid practically of commutating losses in the power semi-conductor devices of the inverter switchboard under simultaneous restriction of output voltage fronts slope. It also has been offered the calculation method of the node elements of double-stage single operational commutation making possible minimize their power, weight and overall parameters.

The thesis offers to damp oscillatory processes in LC-filter caused by an initial charge of the filter condenser and also by charge processes at repeated contacts by the current collector of a contact rail after detachment using the dynamic brake regulator. It offers to use hybrid filter of series type for ensuring of electromagnetic compatibility of the tractive asynchronous underground car electricity transmission with the underground traction network.

The generalized thermal model of a controlled power key making possible to compute simply efficient thermal conditions has been developed. The most expedient research methods of transitive and stationary thermal conditions of controlled power keys have been determined. The modelling of their transitive and stationary thermal conditions has been made and the recommendations on application of the asymmetrical and symmetrical controlled power keys designs have been given.

Key words: electric equipment of the electric transport, tractive asynchronous electricity transmission, electromagnetic compatibility module, transforming and adjusting module, single operational commutation, controlled power key, commutating losses, hybrid filter of series type, controlled power key thermal model.

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Підвищення ефективності тягових електропередач
метровагонів з асинхронними двигунами

Нікулін Віктор Сергійович

Надруковано згідно з оригіналом автора

Відповідальний за випуск к.т.н., доц. Семененко О.І.

Підписано до друку 17 липня 2007 р.
Формат паперу 60x84 1/16. Папір офсетний.
Умовн.-друк. арк. 0,9. Обл.- вид. арк. 1,1.
Замовлення № 324. Тираж 100 прим.

Видавництво УкрДАЗТ, свідоцтво ДК № 2874 від 12.06.2007 р.
Друкарня УкрДАЗТ
61050, м. Харків – 50, пл.. Фейєрбаха, 7