

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

ХВОРОСТ МИКОЛА ВАСИЛЬОВИЧ



УДК 621.33:629.432

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ
МЕТРОПОЛІТЕНІВ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

А в т о р е ф е р а т

**дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук**

Дніпропетровськ – 2011

Дисертація є рукописом.

Робота виконана на кафедрі електричного транспорту Харківської національної академії міського господарства та в Державному науково-дослідному центрі залізничного транспорту України.

Науковий консультант:	доктор технічних наук, професор Панасенко Микола Васильович , Харківська філія Державного науково-дослідного центру залізничного транспорту України, Міністерство інфраструктури України, головний науковий співробітник.
Офіційні опоненти:	доктор технічних наук, професор Гетьман Геннадій Кузьмич , Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна, Міністерство інфраструктури України, завідувач кафедри електрорухомого складу;
	доктор технічних наук, професор Андрієнко Петро Дмитрович , ВАТ Науково-дослідний інститут «Перетворювач» (м. Запоріжжя), перший заступник голови правління;
	доктор технічних наук, професор Гусевський Юрій Іллєч , Українська державна академія залізничного транспорту, Міністерство інфраструктури України, професор кафедри систем електричної тяги.

Захист дисертації відбудеться "26" травня 2011 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. академіка В.А. Лазаряна, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна, 49010, м. Дніпропетровськ, вул. академіка В.А. Лазаряна, 2.

Автореферат розісланий "___" _____ 2011 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,

д.т.н., професор



М.О. Костін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дисертації. Метрополітени забезпечують високу спроможність міських пасажирських перевезень при значній швидкості та безпеці руху. На теперішній час на метрополітенах України перевезення пасажирів забезпечується, в основному, вагонами з колекторними двигунами постійного струму послідовного збудження із живленням з номінальною напругою 825 В від підземних тягових підстанцій, які підключаються безпосередньо до міської енергомережі 6 (10) кВ. Витрати електроенергії на живлення поїздів у таких системах складають $80 \div 95$ % від загальних витрат електроенергії на метрополітенах і є значною складовою собівартості пасажирських перевезень. Так, на ДП „Харківський метрополітен” у 2009 р. витрати на оплату спожитої поїздами електроенергії склали понад 40 млн. грн., а це близько 30% витрат у собівартості перевезень пасажирів. Моніторинг обсягів енергоспоживання вказує на подальше збільшення цих витрат.

Значна ж частина цієї електроенергії припадає на втрати в тягових підстанціях, тяговій мережі, тягових електроприводах вагонів і їх гальмівних реостатах. Окрім цього, тягові підстанції з шестипульсними діодними випрямлячами формують порівняно низький коефіцієнт потужності зовнішньої енергомережі та суттєво в години „пік” збільшують її навантаження. Вагони з тяговими колекторними двигунами постійного струму є трудомісткими при технічному обслуговуванні і ремонті. Це обумовлює необхідність пошуку нових ефективних технічних рішень щодо системи електричної тяги в цілому та її основних складових, що дозволить знизити витрати як енергетичних, так і матеріальних, трудових, фінансових ресурсів при експлуатації метрополітенів. Необхідність пошуку нових ефективних рішень із ресурсозбереження, зокрема, з енергозбереження, є не тільки доцільним стосовно перспективних ліній метро, а й важливим при проведенні реконструкції об’єктів ліній метрополітенів і модернізації рухомого складу, що експлуатується.

Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є подальший розвиток наукових основ побудови високоефективних систем електричної тяги метрополітенів з урахуванням світових досягнень у галузях силової електроніки, перетворювальної техніки, мікропроцесорної техніки, електромашинобудування та автоматизованого електроприводу. При цьому обов’язково повинно бути враховано повне коло системи від зовнішньої енергомережі до тягових двигунів вагонів. Вирішення цієї проблеми має бути комплексним, оскільки величина напруги живлення системи електричної тяги, структура тягового електропостачання, тип перетворювальних агрегатів підстанцій і пунктів живлення тягової мережі, величина напруги живлення тягової мережі, вид тяги поїздів, структура тягового електроприводу вагонів метро, тип їх тягових двигунів і перетворювачів, режимів керування тяговими двигунами, а також їх тип суттєво впливають як на капіталовкладення, так і на експлуатаційні показники метрополітенів, фонд оплати праці, споживання матеріалів і запчастин, витрати електроенергії. Тому тема дисертаційної роботи, яка направлена на подальше вдосконалення наукових основ системи

електричної тяги метрополітенів України в напрямку підвищення рівня енергозбереження, а також зниження витрат матеріальних, трудових і фінансових ресурсів при експлуатації метрополітенів є актуальною, оскільки відповідає меті Державної програми енергозбереження України та пріоритетним напрямкам сучасної державної економічної політики.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дисертаційна робота виконана відповідно до планів наступних державних програм та планів науково-дослідних робіт за завданням „Укрзалізниці”:

– Державної програми будівництва і розвитку мережі метрополітенів на 2006 – 2010 рр., (Затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 7 березня 2006 р., №257);

– Державної програми „Розвиток рейкового рухомого складу соціального призначення для залізничного транспорту та міського господарства” (Затверджено постановою Кабінету Міністрів України від 2 червня 1998 р., №769);

– „Розробка технічних вимог до перетворювальних агрегатів на базі дванадцятипульсних напівкерованих випрямлячів з реверсивним вольтододатком для тягових підстанцій постійного струму із стабілізованою напругою і безконтактним захистом при коротких замиканнях у тяговій мережі” (ДР № 0110U003712);

– „Розроблення технічної документації на дослідний зразок дванадцятипульсового перетворювального агрегату з реверсним вольтододатком і безконтактним захистом від короткого замикання для тягових підстанцій постійного струму” (ДР № 0110U003713);

– „Дослідження технічного стану пристроїв тягового електропостачання та техніко-економічне обґрунтування можливих варіантів проведення модернізації при організації швидкісного руху на Кримському напрямку” (ДР № 0110U003656).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розвиток наукових основ електричної тяги для підвищення ефективності роботи метрополітенів за рахунок розробки і практичної реалізації методів та заходів з енергозбереження на основі оптимізації параметрів підсистем електропостачання та тягового електроприводу вагонів.

Для досягнення поставленої мети вирішені наступні задачі:

1. Дослідження структури та режимів роботи систем електричної тяги, що використовуються на метрополітенах.
2. Оцінка технічної досконалості підсистем електричної тяги.
3. Розробка основ теорії та моделювання енергоефективних напівкерованих дванадцятипульсних випрямлячів із реверсивним вольтододатком – стабілізаторів напруги для головних тягових підстанцій метрополітенів із повздовжньою лінією живлення постійного струму.
4. Розробка методики аналізу тягових мостових автономних інверторів напруги з вузлами однорідної комутації, які забезпечують „м'яку” комутацію силових ключів при синусоїдальній широтно-імпульсній модуляції вихідної напруги.

5. Аналіз силової схеми перетворювача постійної напруги з проміжною ланкою однофазного струму підвищеної частоти і розробка алгоритму його функціонування, що забезпечує, „м'яку” комутацію силових ключів.

6. Моделювання й аналіз електромагнітних процесів у силовому перетворювачі постійної напруги однорідної структури і вибір конструкції електромагнітного трансформатора проміжної ланки підвищеної частоти та структури високовольтих ключів.

7. Наукове обґрунтування однозонної характеристики керування тяговими асинхронними двигунами вагона й оцінка впливу відхилень діаметрів коліс на рівномірність струморозподілення між двигунами вагонів метрополітену.

8. Обґрунтування структури блоку електромагнітної сумісності тягового асинхронного електроприводу вагона з тяговою мережею в усталених і перехідних режимах.

9. Розробка методики розрахунку і схемотехнічних рішень захисту від струмів короткого замикання тягових асинхронних двигунів вагонів.

10. Наукове обґрунтування структури і параметрів вхідного фільтра реверсивного вольтододатка.

11. Формування та реалізація практичних рекомендацій щодо визначення та вибору стратегій підвищення рівня ресурсозбереження при експлуатації метрополітенів.

Об'єкт дослідження – електромагнітні та електроенергетичні процеси в системі електричної тяги метрополітену.

Предмет дослідження – енергозбереження при експлуатації метрополітенів.

Методи дослідження ґрунтуються на системному підході з використанням теорії електричної тяги, теорії перетворювальної техніки для аналітичного визначення параметрів елементів електрообладнання, теорії активних і пасивних фільтрів, теорії автоматизованого електроприводу для дослідження трифазних і двофазних тягових електроприводів вагонів із «м'якою» комутацією напівпровідникових ключів автономних інверторів напруги, теорії тягового електропостачання, математичного аналізу і моделювання для аналізу і синтезу параметрів елементів системи “перетворювач – асинхронний двигун”, а також чисельних методів розрахунку.

Наукова новизна отриманих результатів. Вирішено науково-технічну проблему – енергозбереження при експлуатації метрополітенів за рахунок вдосконалення системи електричної тяги метрополітенів, яка враховує необхідність переходу на розподільне тягове електропостачання з повздовжньою високовольтною лінією живлення постійного струму та поїзди змішаної структури, сформовані з вагонів із тяговими асинхронними двигунами та безмоторними вагонами, що дозволяє суттєво підвищити енергоефективність і надійність системи електричної тяги метрополітенів.

Уперше:

1. Вперше створено комплексну концепцію побудови ефективної системи електричної тяги, що базується на застосуванні системи глибокого вводу, яка забезпечує енергозбереження при експлуатації метрополітенів.

2. Запропоновано нову структуру тягового електропостачання на основі використання повздовжньої високовольтної лінії живлення електрорухомого складу, що дає можливість підвищити рівень ресурсозбереження на метрополітенах.

Одержали подальший розвиток:

3. Основи теорії дванадцятипульсних напівкерованих випрямлячів із реверсивним вольтододатком, які дозволяють забезпечити стабілізацію напруги живлення в контактній мережі.

4. Теорія автономних інверторів напруги з „м'якою” комутацією силових ключів для тягових асинхронних електроприводів вагонів метрополітенів, побудованої на основі застосування вольтодобавочних модулів, чим забезпечується підвищення коефіцієнту корисної дії тягового асинхронного електропривода.

5. Наукові основи побудови обернених силових перетворювачів із проміжною ланкою однофазного змінного струму підвищеної частоти на основі застосування однорідних перетворювальних структур, що забезпечує стабілізацію напруги в контактній мережі при роботі електрорухомого складу в режимі пуску та гальмування.

6. Принципи побудови силових гібридних фільтрів послідовного типу, які забезпечують електромагнітну сумісність тягового асинхронного електроприводу вагонів і тягової мережі метрополітену, чим досягається зменшення втрат електричної енергії в мережах, термін дії та стійкість роботи обладнання.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробці методик розрахунку параметрів та технічних вимог до основних елементів системи електричної тяги метрополітенів із повздовжньою високовольтною лінією постійного струму.

Удосконалено:

1. Аналітичні методики розрахунку параметрів вузлів тягового асинхронного електроприводу, що дає можливість оптимізувати їх характеристики.

2. Методики аналізу трифазного і двофазного тягових асинхронних електроприводів вагонів, відносно їх основних характеристик та надійності роботи тягового інвертора напруги.

3. Алгоритм керування тяговими асинхронними двигунами вагонів метрополітену.

Результати роботи впроваджено: У ВАТ „Харківметропроект”; комунальному підприємстві „Харківський метрополітен”; ВАТ „Крюківський вагонобудівний завод” (м. Кременчук); Харківській національній академії міського господарства.

Результати роботи містять рекомендації щодо побудови енергоефективного тягового електропостачання ліній метрополітенів та рекомендації з підвищення тягових властивостей електроприводів рухомого складу.

Упровадження підтверджується відповідними актами про використання результатів досліджень дисертації організаціями, підприємствами, науковими установами та навчальними закладами.

Особистий внесок здобувача. У працях, написаних у співавторстві за темою дисертаційної роботи, здобувачеві належить:

- створення комплексної концепції побудови ефективної системи електричної тяги, яка забезпечує енергозбереження при експлуатації метрополітенів [5];
- доопрацювання теорії автономних інверторів напруги з „м’якою” комутацією силових ключів для тягових асинхронних електроприводів вагонів метрополітенів [32, 34, 38, 40, 47];
- подальший розвиток теорії дванадцятипульсних напівкерованих випрямлячів із реверсивним вольтододатком, які дозволяють забезпечити стабілізацію напруги живлення в контактній мережі [11, 24, 31];
- удосконалення алгоритму керування тяговими асинхронними двигунами вагонів метрополітену [3, 9, 19, 29, 39];
- доопрацювання основ теорії обернених силових перетворювачів із проміжною ланкою однофазного змінного струму підвищеної частоти на основі однорідних перетворювальних структур, що забезпечують стабілізацію напруги в контактній мережі при роботі електрорухомого складу в режимі пуску та гальмування [14];
- структура тягового електропостачання з повздовжньою високовольтною лінією живлення електрорухомого складу, що дає можливість підвищити рівень ресурсозбереження на метрополітенах [32, 47];
- подальший розвиток теорії силових гібридних фільтрів послідовного типу для забезпечення електромагнітної сумісності тягового асинхронного електроприводу вагонів і тягової мережі метрополітену [6, 21, 26, 27];
- удосконалення методики аналізу трифазного і двофазного тягових асинхронних електроприводів вагонів, відносно їх основних характеристик та надійності роботи тягового інвертора напруги [2-3, 10, 12, 22];
- аналітична методика розрахунку параметрів вузлів тягового асинхронного електроприводу, що дає можливість оптимізувати їх характеристики [12].

Апробація результатів дисертації. Основні матеріали і результати дисертаційної роботи доповідалися на 15 науково-технічних, 3 науково-практичних міжнародних конференціях та на постійно діючому галузевому семінарі НАН України, зокрема: на міжнародних науково-технічних конференціях „Проблеми розвитку рейкового транспорту”, „Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика”, „Силова електроніка і енергоефективність” (Україна, Крим, 2003 – 2010 рр.); міжнародних науково-технічних конференціях „Проблеми сучасної електротехніки” (Україна, Київ, 2004 - 2010 рр.); на 65-й міжнародній науково-практичній конференції „Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту” (Україна, Дніпропетровськ, 2006 р.); на 2-й науково-практичній конференції „Впровадження наукоємних технологій на магістральному і промисловому залізничному транспорті” (Україна, Крим, 2006 р.); науково-технічних конференціях Харківської національної академії міського господарства та ДП “Державний науково-дослідний центр залізничного транспорту України» (Харків, 2005- - 2010 рр.); семінарі „Підвищення ефективності підсистем електричної тяги залізниць і метрополітенів” та семінарі „Тягово-енергетичні аспекти підвищення ефективності систем електричної тяги постійного і змінного струму”; секції 8 „Фізико-технічні проблеми енергетики електричного та дизель-електричного транспорту” Наукової ради НАН України з комплексної

проблеми „Наукові основи електроенергетики”(Україна, Харків, НТУ „ХПІ”, 2003 – 2009 рр.).

Повністю дисертація доповідалась на засіданнях кафедри „Електричний транспорт” Харківської національної академії міського господарства і науково-технічній раді Державного підприємства „Державний науково-дослідний центр залізничного транспорту України” та на засіданні міжкафедрального наукового семінару кафедр теоретичних основ електротехніки, автоматизованого електроприводу, електрорухомого складу, електропостачання залізниць в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна.

Публікації. Основні результати досліджень опубліковано в 47 наукових працях з яких-45 статей у виданнях, затверджених ВАК України як фахові, 33 праці - у фахових виданнях, опубліковано не більш як з трьома співавторами, з них 8 – без співавторів.

Структура роботи. Дисертаційна робота має вступ, шість розділів, висновки, список використаної літератури та додатки. Повний обсяг дисертації складає 350 сторінок, у тому числі 302 сторінки основного тексту, 4 таблиці, 119 рисунків, список використаної літератури із 264 найменувань на 28 сторінках, 4-х додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі подано загальну характеристику роботи, доведено актуальність і зв'язок її з науковими програмами і темами, сформульовано мету роботи та завдання, які необхідні для досягнення, визначено наукову новизну і практичну цінність роботи.

Показано основний внесок здобувача та апробацію результатів дисертації.

У першому розділі розкрито проблему ресурсозбереження на метрополітенах, наведено аналіз сучасних підходів до побудови енергоефективних систем електричної тяги метрополітенів та приведено основні шляхи вирішення проблеми.

Згідно з прийнятою у 2006р. “Державною програмою будівництва та розвитку мережі метрополітенів на 2006-2010 роки” актуальним є вирішення проблеми підвищення рівня технічного оснащення метрополітенів та ефективності їх роботи шляхом оновлення як рухомого складу, так і енергетичного устаткування. Одним із основних напрямів розв'язання цієї проблеми Програмою передбачається освоєння виробництва і виготовлення на вітчизняних підприємствах вагонів із асинхронним тяговим електроприводом та пристроїв тягового електропостачання з підвищеним ресурсом працездатності і енергоефективності. Вирішення цих завдань потребує, в першу чергу, відповідного наукового супроводження розробок, принципово нових технічних рішень щодо тягового електропостачання і рухомого складу, які відповідають сучасним світовим досягненням.

Аналіз стану і шляхів підвищення енергоефективності систем електричної тяги метрополітенів світу показали, що основою підвищення рівня енергозбереження є збільшення напруги в контактній мережі до 1500 В та

використання тягових асинхронних двигунів. При цьому в повній мірі повинні використовуватися заходи щодо вдосконалення системи живлення метрополітенів від зовнішніх енергомереж, самого тягового електропостачання метрополітенів, а також тягових електроприводів вагонів, оскільки від структури силових схем, елементної бази, принципів управління залежать їх техніко-економічні показники.

Підвищення потужності тягових асинхронних двигунів вдвічі у порівнянні з колекторними тяговими двигунами постійного струму, що знаходяться в експлуатації, перехід до однозонної характеристики керування дозволять на лініях зменшити час розгону та реалізувати рекуперативне гальмування і, тим самим, знизити витрати електроенергії на тягу.

Збільшення осьової потужності вагонів метро та перехід до групового управління від одного автономного інвертора гостро ставить також питання щодо забезпечення безпеки руху при відмовах в інверторі, які приводять до одночасного переходу тягових асинхронних двигунів вагона в режим короткого замикання. З метою зменшення споживання метрополітенами реактивної енергії із зовнішньої енергомережі для електроживлення тягового навантаження доцільно переходити на більш багатопульсні схеми випрямлячів трифазного змінного струму.

Аналіз досліджень щодо удосконалення системи електричної тяги на залізничному транспорті, які стали можливими завдяки плідній праці наукових колективів під керівництвом Андрієнко П.Д., Аржанкінова Б.О., Бадера М.Б., Барського В.О., Буркова А.Т., Браташа В.О., Гетьмана Г.К., Гончарова Ю.П., Гусевського Ю.І., Доманського В.Т., Жемерова Г.Г., Інькова Ю.М., Колпахчяна П.Г., Курбасова А.С., Мамошина Р.Р., Мірошніченко Р.І., Омеляненко В.І., Панасенко М.В., Плохова Є.М., Ротанова М.О., Сасенко Ю.Л., Сенько В.І., Сокола Є.І., Соколова С.Д., Тартаковського Е.Д., Шалімова М.Г., Шидловського А.К., Щербака Я.В., Феоктістова В.П. та інших показав, що в роботах цих шкіл не достатньо приділяється уваги вдосконаленню системи електричної тяги метрополітенів.

У дослідженнях із метою підвищення рівня ресурсозбереження в комунальному господарстві, в тому числі і на міському електротранспорті, які виконувались під керівництвом Далеки В.Х., Маляренка В.А., Харченка В.Ф., Шутенка Л.М., та інш. також комплексно не вирішувались питання підвищення енергоефективності електротяги на метрополітенах.

Тому на основі аналізу результатів наукових досліджень в напрямку вдосконалення системи електричної тяги постійного струму метрополітенів на захист вноситься система тягового електропостачання ліній метрополітену (рис.1) на основі повздовжньої високовольтної лінії постійного струму.

На схемі позначено: НГТП₁, НГТП₂ – наземні головні тягові підстанції; ПЛ – повздовжня високовольтна лінія живлення постійного струму напруги 12 кВ; ППЖ_і (де $i = 1, 2, \dots, n$) – підземні пункти живлення тягової мережі (ТМ), КР, ПР – контактні і поїздні рейки тягової мережі відповідно; L_n відстань між кінцевими станціями лінії метрополітену, поблизу яких розміщуються головні тягові підстанції; l_n – відстань між станціями на лінії, в підземних приміщеннях

кожної з яких розміщені пункти живлення тягової мережі; РУ 110 (220) кВ – розподільна установка змінного струму; РП_{ПЛ} – розподільна установка постійної напруги ПЛ; РП_{ТМ} – розподільна установка постійної напруги ТМ; ПА – перетворювальні агрегати тягових підстанцій; НЕ – накопичувач енергії тягових підстанцій напругою 12 кВ живлення тягової мережі напругою 1500 В.

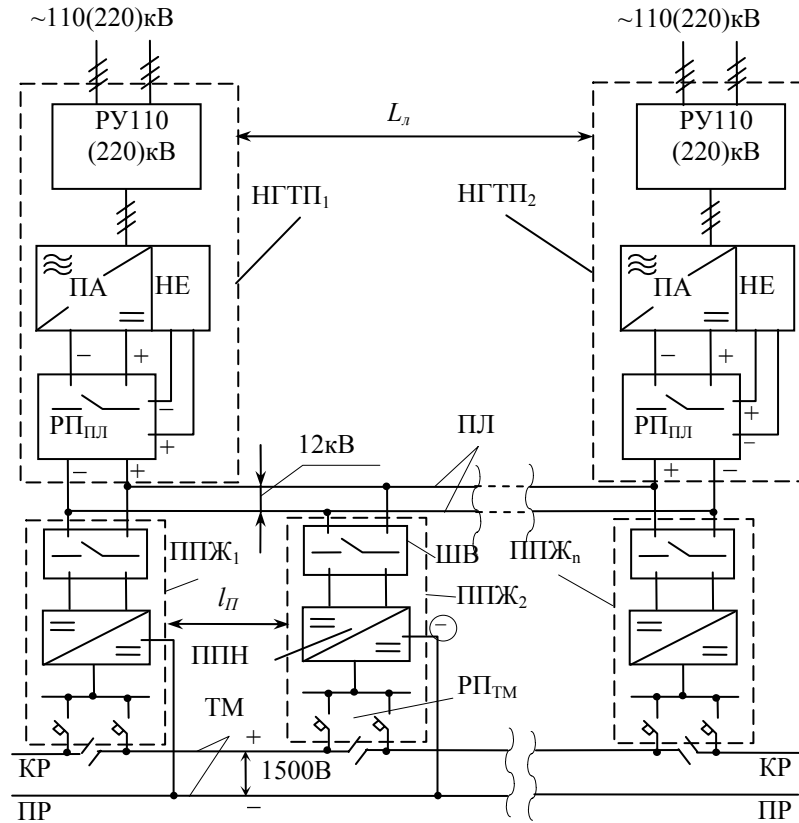


Рис. 1 - Структура схеми живлення ліній метрополітену

Структура силової схеми тягового асинхронного електроприводу з груповим управлінням двигунами приведена на рис. 2.

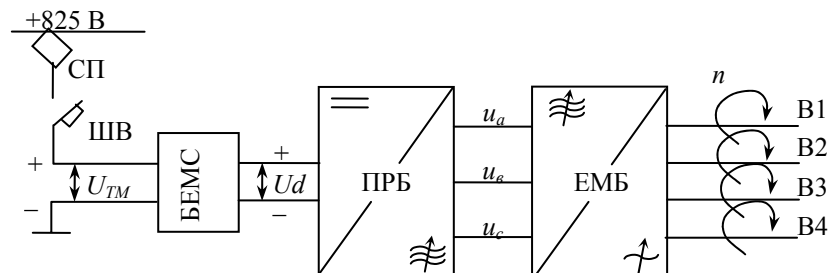


Рис. 2 - Структура силової схеми тягового асинхронного електроприводу вагона з груповим управлінням двигунами

На схемі позначено: СП – струмоприймач; ШВ – швидкодіючий вимикач; U_{TM} – напруга в тяговій мережі; БЕМС – блок електромагнітної сумісності; U_d – постійна напруга живлення перетворювально-регулювального блока (ПРБ); u_a ,

u_b, u_c – трифазна змінна напруга, регульована по величині і частоті для живлення електромагнітного блоку (ЕМБ); В1 – В4 – вали чотирьох тягових асинхронних двигунів

У другому розділі викладено основи теорії енергоефективних випрямлячів – стабілізаторів напруги для перетворювальних агрегатів наземних головних тягових підстанцій метрополітенів, що забезпечують живлення поздовжньої високовольтної лінії постійного струму стабілізованою напругою 12 кВ. Наведено результати досліджень режимів роботи перетворювальних агрегатів головних тягових підстанцій метрополітенів.

Рекомендовано при проектуванні використовувати перетворювальні агрегати тягових підстанцій постійного струму тягового електропостачання постійного струму на основі дванадцятипульсних схем тиристорних випрямлячів послідовного типу, в яких вирішення задачі стабілізації вихідної напруги забезпечується за рахунок фазового регулювання їх комутаторів, що мають ряд негативних чинників щодо коефіцієнта потужності мережі живлення та гармонічного складу випрямленої напруги.

Показано, що зняття цих негативів у фазокерованих випрямлячах-стабілізаторах напруги потребує суттєвого збільшення установленної потужності електрообладнання тягових підстанцій. Тому в нових розробках перетворювальних агрегатів для тягових підстанцій постійного струму більш доцільно використовувати дванадцятипульсні схеми тиристорних, діодних чи діодно-тиристорних випрямлячів із реверсивним вольтододатком, які дозволяють не тільки забезпечити стабілізацію напруги U_d на фідерах підстанцій при коливаннях струмів та напруги в мережі живлення, але й при деякому ускладненні вольтододатка ще й реалізувати високий коефіцієнт потужності без суттєвого погіршення форми струму, а також забезпечити безконтактне підключення (відключення) агрегата від тягової мережі.

В усталеному режимі як тиристорний, так і діодно-тиристорний основний випрямляч (ОВ) працює з кутом управління тиристорами $\alpha_{ОВ}=0$. Вольтододаток (ВД) же, у сталому режимі може працювати як у чисто фазокерованому режимі, тобто коли кут управління його тиристорами $\alpha_{ВД}$ змінюється в межах від 0 до 180° , а також і в режимі однополярної широтно – імпульсної модуляції (ШІМ). У першому випадку вольтододаток може бути побудований на одноопераційних тиристорах; у другому випадку – тільки на двоквadrантних ключах знакозмінної напруги аналогом яких є двоопераційні тиристори GTO і GCT (рис.3).

При стандартному допустимому відхиленні напруги в мережі живлення $\pm 10\%$ та відносному падінню напруги 5% в перетворювачі при протіканні номінального струму відносний запас по діапазону регулювання вихідної напруги перетворювача стабілізатора напруги повинен складати:

$$\Delta U^* \geq 0,25. \quad (1)$$

Отже, реверсивний фазокерований вольтододаток повинен створювати на своєму виході регульовану за величиною та знаком напругу з максимальною величиною

$$U_{\partial m} = U_{\text{л}} \cdot \frac{\Delta U^*}{2} = U_{\text{л}} \chi, \quad (2)$$

поточна величина U_{∂} якої залежить від глибини регулювання τ

$$U_{\partial} = U_{\partial m} \cdot \tau, \text{ де } -1 \leq \tau \leq 1 \quad (3)$$

і яка додається (віднімається) до (від) напруги U_d основного випрямляча (ОВ), тобто,

$$U_{\text{л}} = U_d \pm U_{\partial} = (U_{d1} + U_{d2}) \pm U_{\partial}. \quad (4)$$

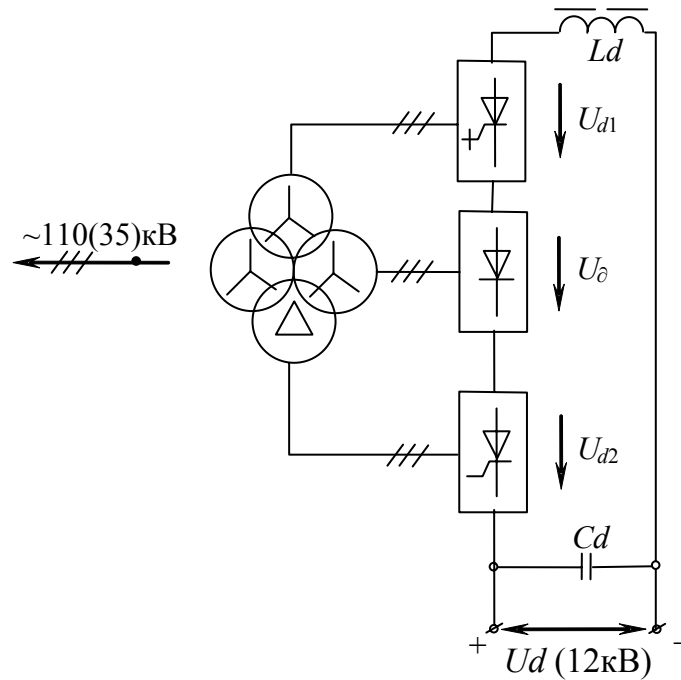


Рис. 3 – Дванадцятипульсний випрямляч із вольтододатком

Реверсивний характер вольтододатка дозволяє зменшити його установлену потужність вдвічі і, отже, для даного випадку $\Delta U^* = 0,25$ вона складає всього 12,5% від потужності основного випрямляча.

При використанні для стабілізації напруги $U_{\text{л}}$ фазокерованого вольтододатка на одноопераційних тиристорах коефіцієнт потужності мережі живлення дещо знижується у порівнянні з чисто діодним дванадцятипульсним випрямлячем без вольтододатка, але його погіршення все ж таки є суттєво меншим, ніж у схемі чисто дванадцятипульсного тиристорного випрямляча – стабілізатора напруги. Співвідношення реактивних потужностей керованого дванадцятипульсного випрямляча – стабілізатора напруги з кутом управління $\alpha_{\text{м}}$ і некерованого дванадцятипульсного випрямляча ($\alpha=0$) вольтододатком на одноопераційних тиристорах – стабілізаторах напруги визначається формулою:

$$K_{\varrho} = 2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\Delta U^*}} - 1, \quad (5)$$

із якої видно, що чим менша величина ΔU^* , тобто чим менша потужність вольтододатка, тим це співвідношення буде більшим. Зокрема, при типовій

величині $\Delta U^* = 0,25$ маємо $K_Q = 5,3$, тобто реактивна потужність дванадцятипульсного випрямляча – стабілізатора напруги з реверсивним фазоуправляємим вольтододатком є десь у 5 разів меншою, ніж реактивна потужність тиристорного дванадцятипульсного випрямляча-стабілізатора напруги без вольтододатка. Схема реверсивного вольтододатка (рис. 4), який може працювати ще і в режимі ШІМ, окрім трифазного мостового комутатора на GTO (GCT) тиристорах та вихідного $L_d C_d$ - фільтра, спільного з фільтром основного випрямляча, включає в себе обов'язково ще і вхідний трифазний L_s, C_d – фільтр, індуктивностями якого, як правило, є тільки фазні індуктивності розсіювання L_s перетворювального трансформатора.

Методом однополярної ШІМ у кожній із фаз регульованого вольтододатка можна сформувати струм i_e заданої форми, що не перевищує за амплітудою величину вихідного струму перетворювача i_d із заданим кутом зсуву ϕ його першої гармоніки 50 Гц i_{e1} по відношенню до першої гармоніки фазної напруги U_e .

При цьому для збереження ВД у повній мірі функцій стабілізації вихідної напруги перетворювача U_d необхідно дещо збільшити розрахункову вихідну напругу широтно-імпульсного регульованого вольтододатка (ШІР - ВД) у порівнянні з максимальною розрахунковою напругою U_{dm} фазокерованого вольтододатка (ФР ВД).

Потрібний коефіцієнт збільшення напруги K_U ШІР – ВД у порівнянні ФР ВД, або, що одне і те, коефіцієнт збільшення його установленої потужності визначається співвідношенням:

$$K_U = \sqrt{1 + \frac{\pi^2 \cdot i_c^{*2}}{12 \cdot \chi^2}}, \quad (6)$$

де i_c^* - відносний реактивний струм ШІР ВД

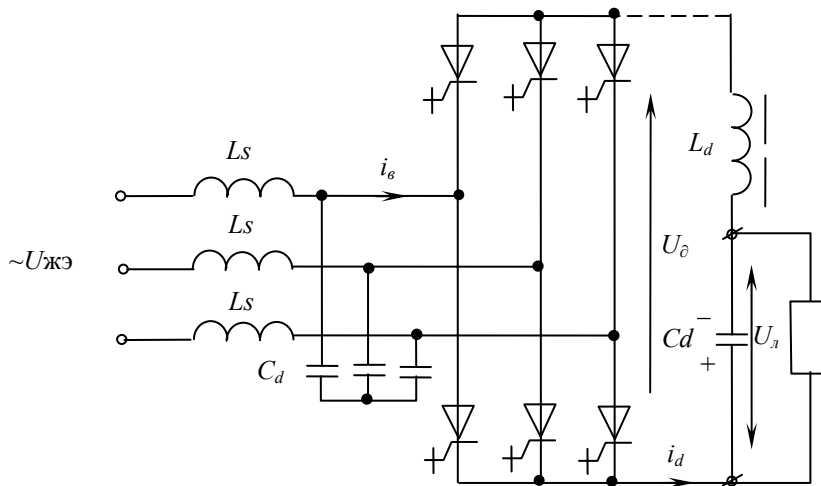


Рис. 4 - Принципова схема вольтододатка

Якщо не має потреби генерувати реактивний струм ($i_c^* = 0$), то збільшення установленої потужності ШІР - ВД не потрібно ($K_U = 1$). При $i_c^* \neq 0$ на величину

K_U в тій же пропорції впливає і вихідна (початкова, тобто при $i_c^* = 0$) установлена потужність вольтододатка χ , оскільки при зменшенні χ зменшується і потрібний реактивний струм, що генерує ШПР ВД у мережу. Розрахунки показують, що ШПР ВД вигідно генерувати в мережу відносно невеликий реактивний струм ємнісного характеру, що практично не потребує збільшення його установленної потужності. Так, при $\chi = 0,125$ генерація в мережу відносно ємнісного струму $i_c^* = 0,09$ приведе до збільшення установленної потужності ШПР ВД у порівнянні з ФР ВД всього на 20%. Результуючий коефіцієнт потужності мережі живлення підвищується до 0,98, що вже відповідає рекомендаціям нових стандартів. Щодо демпфування вхідного LC -фільтра ШПР ВД, то в роботі запропоновано структуру фазного блока управління комутатора із зворотнім зв'язком, що дозволяє досягти ефективного демпфування L_s, C_d – фільтра вольтододатка (рис. 5).

Елемент із позначкою К є фазним комутатором ШПР ВД. Датчик напруги ДН вимірює напругу на ємності конденсатора C_d фази вхідного фільтра. Полосовий фільтр із передаточною функцією W_ϕ виділяє із напруги U_ϕ на конденсаторі C_d сигнали з частотами в межах резонансної частоти фільтра.

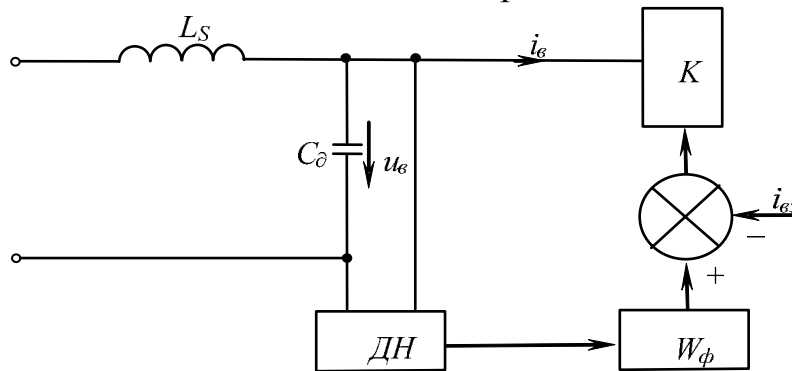


Рис. 5 - Структура блоку керування комутатора ШПР ВД

Його вихідний сигнал додається до сигналу завдання i_{gz} по струму фази і цей сумарний сигнал і відпрацьовується комутатором. Вважаючи комутатор неперервною ланкою з коефіцієнтом підсилення k , одержуємо для складової струму i_g , пов'язаної з дією зворотного зв'язку, наступне співвідношення:

$$i_{g0} = k \cdot k_d \cdot W_\phi \cdot U_\phi, \quad (8)$$

де k_d – передаточний коефіцієнт датчика напруги.

Із (8) випливає, що зворотній зв'язок створює еквівалентну провідність

$$y = k \cdot k_d \cdot W_\phi, \quad (9)$$

яка увімкнена паралельно конденсатору C_d фільтра.

Характеристики фільтра залежать як від модуля його передаточної функції W_p , так і від величини його добротності q , які, в свою чергу, є функцією характеристичного опору еквівалентної демпфуючої ланки.

На рис. 6 показані функції $|W_p|_{om}^{om} = f_1(\rho^*)$ і $q_{om} = f_2(\rho^*)$ із яких видно, що чим менший відносний характеристичний опір демпфуючої ланки ρ^* , тим менший максимум передаточної функції $|W_p|$ і, отже, максимум вихідної напруги U_e , та тим меншій величині добротності відповідає оптимум.

Так як зниження ρ^* веде до збільшення установленної потужності ШІР ВД, то в роботі одержані залежності для розрахунку величини ρ^* при якій збільшення установленної потужності є допустимим.

При реактивній потужності на ємностях фільтра $i_\rho^* = 0,5$ для прикладу $I_\Gamma^* = 0,05$, $U_\Gamma^* = 0,05$, та $f_\rho^* = f_\rho / f_c = 4$ (200 Гц) найменша величина відносного характеристичного опору складе всього $\rho_{\min}^* = 1,78$, що у відповідності до залежності $q_{om} = f_2(\rho^*)$ дає $q = 1,7$. У цьому випадку збільшення установленної потужності ШІР ВД не перевищить 12%, що є допустимим. При менших значеннях i_ρ^* ця величина буде ще менш значущою.

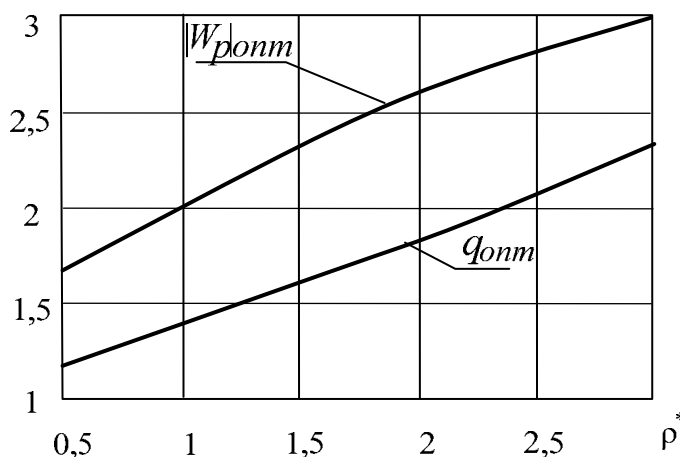


Рис. 6 – Залежність добротності q і модуля передаточної функції $|W_p|$ від характеристичного опору ланки демпфування

Проведений аналіз впливу результуючого коефіцієнта підсилення кола зворотного зв'язку k_n на стійкість в ході перехідних процесів показав, що при практично максимальній частоті модуляції $f_{ui} = 1800$ Гц величина його не повинна перевищувати 3. У протилежному випадку пульсації вхідного струму перетворювача при перехідних процесах стають стійкими.

Деяким недоліком засобу демпфування з керування є те, що цей засіб не діє в режимі холостого ходу перетворювача ($i_d = 0$).

У третьому розділі наведено теоретичні основи побудови енергоефективних силових високовольтних перетворювачів постійної напруги з проміжною ланкою змінного струму підвищеної частоти для перетворювальних агрегатів підземних пунктів живлення тягової мережі метрополітенів із повздовжньою високовольтною лінією постійного струму напруги 12 кВ.

Запропонована концепція побудови силових високовольтних перетворювачів постійної напруги для підземних пунктів живлення тягової мережі метрополітенів із повздовжньою високовольтною лінією постійного струму лежить в площині використання схем перетворювачів постійної напруги з проміжною ланкою однофазного змінного струму підвищеної частоти як на основі дуальних вентильних ланок первинної і вторинної сторін, так і на основі однорідних ланок. У схемі перетворювача постійної напруги для пунктів живлення тягової мережі метрополітенів в якості однієї з ланок використовується перетворювач, що працює в залежності від напрямку потоку електроенергії чи інвертором напруги, чи випрямлячем струму (ІН-ВС). Друга ланка діє як інвертор струму або як випрямляч напруги (ІС-ВН). Перетворювачі постійної напруги однорідної структури стосовно їх використання в підземних пунктах живлення тягової мережі доцільно будувати на основі вентильних ланок типу “інвертор напруги-випрямляч струму” (ІН-ВС), оскільки це дозволяє обійтись без дроселів фільтра, або багаторазово зменшити їх установлену потужність.

Запропонований в роботі алгоритм функціонування для перетворювача постійної напруги дуальної структури (рис.7,а), суть якого полягає в забезпеченні реалізації “м’якої” комутації ключів у всьому діапазоні струмових навантажень перетворювача, що дозволяє рекомендувати його в якості перетворювача постійної напруги для підземних пунктів живлення тягової мережі метрополітенів.

Зміна напрямку потоку електроенергії в схемі (рис.7,а) забезпечується за рахунок зміни напрямів струмів у джерелах U_{Π} і $U_{\text{В}}$. Тому первинну вентильну ланку достатньо виконати на традиційних двоквадрантних ключах знакозмінного струму, в той час як у вторинній вентильній ланці потрібне використання чотирьохквадрантних ключів. Позитивною особливістю цієї схеми є те, що в ній може бути використано однорідну розподілену комутацію ключів, при якій у первинній вентильній ланці примусовим (під напругою) є тільки вимикання, а увімкнення є природнім; у вторинній ланці — навпаки. Для розвантаження ж від комутаційних втрат при вимиканні ключів у первинній вентильній ланці достатньо включити паралельно первинній обмотці електромагнітного трансформатора один снаберний конденсатор C (на рис.7,а він показаний пунктиром), а при увімкненні ключів вторинної ланки достатньо спроектувати електромагнітний трансформатор на задану індуктивність розсіювання L_s для обмеження скважності наростання струму і затримки наростання напруги на ключах (на рис.7,а) індуктивність розсіювання L_s не позначена).

При напрямку потоку електроенергії зліва направо (режим передачі енергії на тягу) первинна ланка ІН-ВС діє як автономний інвертор напруги, що формує на обмотках електромагнітного трансформатора напругу прямокутної форми (рис.7,б).

Зняття в схемі (рис.7,а) комутаційних проблем ключів дозволяє підняти допустиму частоту проміжної ланки змінного струму, від якої безпосередньо

залежить маса і втрати потужності в силових електромагнітних елементах схеми: трансформатора і дроселях вхідного і вихідного LC-фільтрів.

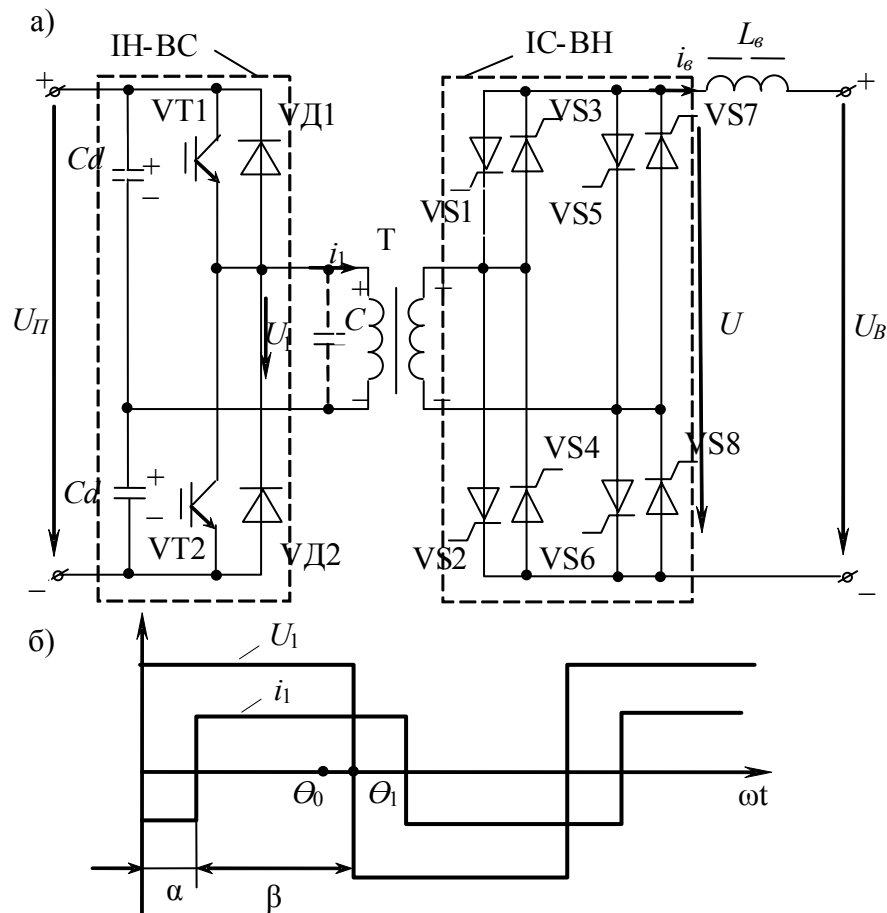


Рис.7 - Силова схема перетворювача постійної напруги (а) і діаграми напруги та струму при роботі вторинної ланки в режимі випрямляча (б)

При цьому, якщо індуктивність розсіювання L_s трансформатора T не обмежує реалізацію алгоритму, що забезпечує однорідну розподілену комутацію ключів, то наявність додаткового снаберного конденсатора C визиває необхідність доповнення в алгоритм функціонування схеми як при малих струмових навантаженнях, так і при пуску схеми, коли снаберний конденсатор C є ще не зарядженим. Ці доповнення розроблені в роботі і стосуються забезпечення постійного часу перезарядки снаберного конденсатора C від $+U_H/2$ до $-U_H/2$ та використання першого заряду снаберного конденсатора C до напруги $U_H/2$ від вторинного джерела U_B за допомогою тиристорів вторинної вентильної ланки. Працездатність запропонованого алгоритму керування перетворювачем дуальної структури (рис.7,а) було перевірено на комп'ютерній моделі.

Стримуючими чинниками використання таких перетворювачів постійної напруги для підземних пунктів живлення тягової мережі метрополітенів є:

- труднощі реалізації високовольтних потужних високочастотних двоквADRантних ключів знакозмінного струму для первинної ланки на двохопераційних приладах з обмеженими швидкодією і робочою напругою;
- труднощі реалізації потужних високовольтних електромагнітних трансформаторів проміжної ланки змінного струму підвищеної частоти із-за несинусоїдальності струмів в їх обмотках.

У значній мірі ці проблеми зменшуються в перетворювачах постійної напруги однорідної структури (рис.8) при використанні частотного керування, яке по своїй суті реалізує в номінальних режимах близьку до синусоїди форму струмів в обмотках електромагнітного трансформатора та “м’яку” комутацію ключів у вентильних ланках.

У проміжній ланці змінного струму підвищеної частоти схеми (рис.8) встановлюється електромагнітний трансформатор з індуктивністю розсіювання x^* у межах $(15 \div 20)\%$. Ємності дільника $C_{вх}$ створюють з індуктивністю x^* послідовний коливальний контур з резонансною частотою, співпадаючою з номінальною частотою змінного струму проміжної ланки. Пунктирний прямокутник у позначенні ключів 1 та 2 високовольтного ІН-ВС означає, що ключ може виконуватися достатньо просто на послідовному з’єднанні IGBT-приладів.

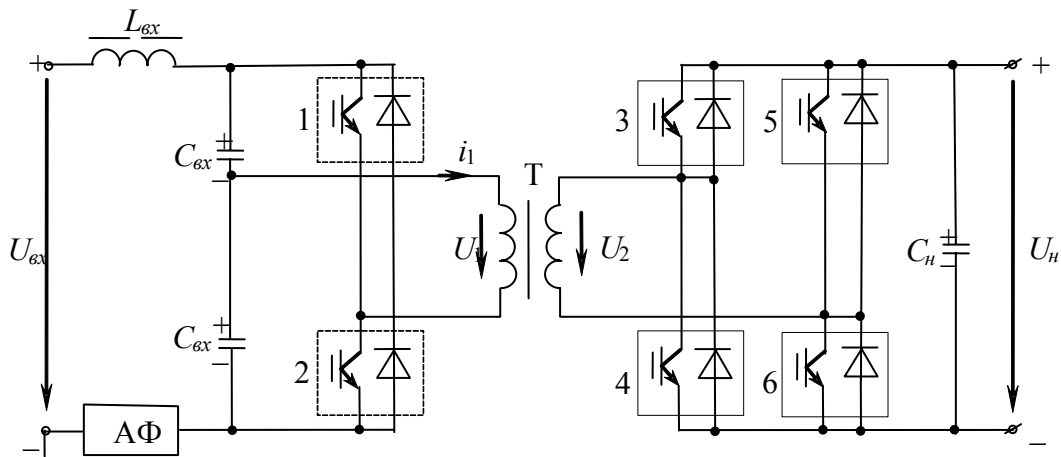


Рис.8 - Силовая схема перетворювача напруги однорідної структури з частотним керуванням

Для аналітичного визначення параметрів елементів резонансного контуру L і C , де L -індуктивність розсіювання обмоток трансформатора, а $C=2C_{вх}$ -ємність дільника напруги, конденсатори якого по відношенню до змінного струму є з’єднаними паралельно, використовується метод основних гармонік: для аналітичного визначення характеристик у режимах струмообмеження – метод фазової площини. При реалізації режиму струмообмеження, який забезпечується за рахунок підвищення частоти перемикачів f у первинній вентильній ланці, відносно значення частоти при короткому замиканні на виході ($U_H=0$) визначається для заданого значення x^* максимально допустимою відносною розрахунковою величиною діючого струму короткого замикання I_K^*

$$f_K^* = \frac{f_K}{f_P} = \frac{1}{k_{\Phi C} \cdot x^* \cdot I_K^*} . \quad (12)$$

Так, для $x^*=0,2$ при $I_K^*=1,5$ частота перемикачів зросте всього втричі, що є цілком допустимим для короткочасного режиму роботи електронного трансформатора.

Для забезпечення стійкості процесу струмообмеження у всьому діапазоні напруг навантаження U_H при збереженні заданого перевантаження ключів, необхідно ввести додатковий зворотній зв'язок по уставці струмообмеження згідно структури рис.9.

Амплітудний контролер АК перемикає в комутаторі провідної ланки кожен раз, коли модуль фактичного струму i_1' перевищить уставку струмообмеження i_K . У колі основного зворотного зв'язку блок $t(\phi i)$ фіксує значення поточного часу t у точках нулів струму i' , що дозволяє визначити поточний час t_H від початку чергового такту, під яким розуміється час від чергового переходу струму i' через нульове значення. Функціональний блок F_{cn} формує лінійно завдання i_K .

Додатковий зворотній зв'язок вмикається до силової схеми датчиком напруги ДН і містить пропорційну (П) і диференціальну (Д) ланки. П-ланка компенсує спад уставки струмообмеження при збільшенні напруги U_H , що вноситься основним зворотнім зв'язком.

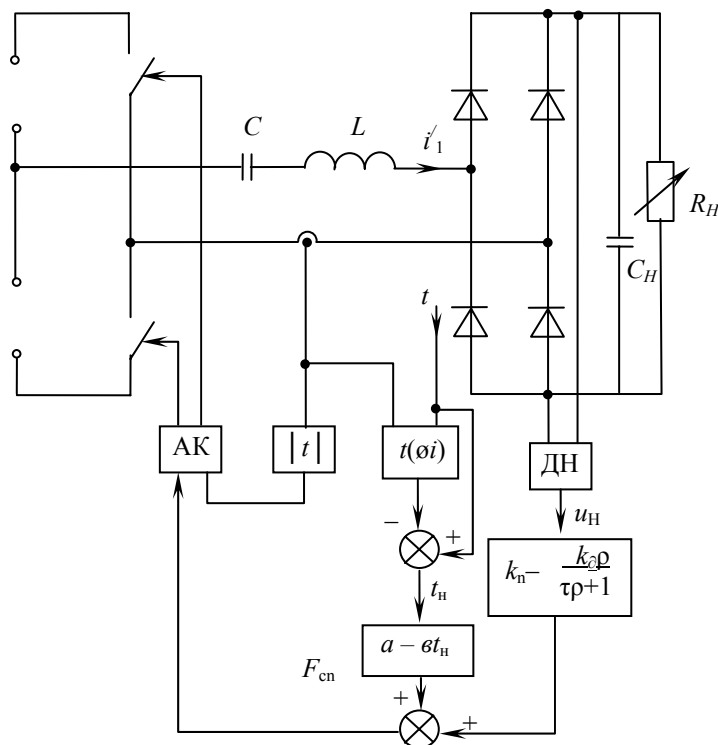


Рис.9- Структура системи частотного струмообмеження

Так як навантаження не є джерелом незалежної проти-ЕРС, а є сукупністю фільтрової ємності C_H і змінного в процесі роботи опору R_H , то для придушення автоколивань в режимах близьких до холостого ходу ($R_H \rightarrow \infty$) і

вводиться у зворотній зв'язок ланка Д, невелика постійна часу якої τ подавляє складову пульсацій напруги навантаження, обумовлену кінцевою ємністю C_H . Комп'ютерне моделювання підтверджує досяжність всіх усталених режимів при пуску.

При наявності в ключах високовольтної ланки ємнісних снаберів, керування схемою при зміні струму навантаження виконується таким чином, щоб забезпечити мінімально необхідний струм i_{kmin} для перезаряду конденсатора снабера. Для цього точка комутації t_1 по мірі зниження навантаження спочатку зміщується вліво до моменту досягнення струмом i_1 свого амплітудного значення, а потім схема переходить в переривчастий режим роботи, який пояснюється діаграмами на рис.10.

В якості конструкції електромагнітного трансформатора проміжної ланки змінного струму підвищеної частоти перетворювачів постійної напруги для підземних пунктів живлення контактної мережі метрополітенів пропонується конструкція стержневого типу з осердям із холоднокатаної електротехнічної сталі у вигляді тонкої стрічки з симетричним розміщенням двох котушок та магнітними шунтами для стабілізації індуктивності розсіювання і випрямлення форми силової лінії магнітного потоку розсіювання та із форсованим способом рідинного охолодження.

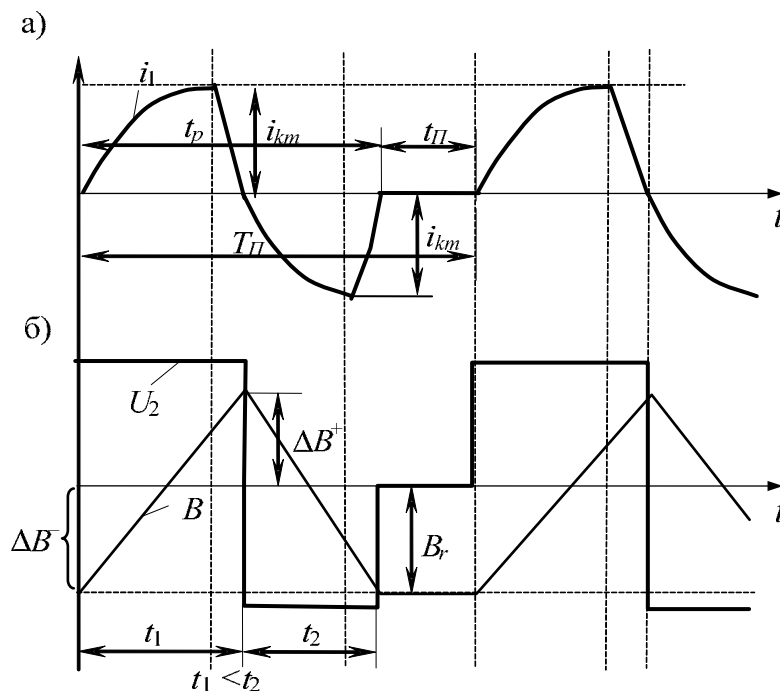


Рис.10 – Робота перетворювача однорідної структури в переривчастому режимі: а) – діаграма струму i_1 в проміжній ланці змінного струму; б) – напруга на вторинній обмотці U_2 та індукція в осерді трансформатора проміжної ланки змінного струму

Як впливає із кривих (рис.11), витрати активних матеріалів на побудову трансформатора, що працює на частоті 1кГц, скорочуються більш чим у сім

разів, а втрати потужності – приблизно в 3(три) рази у порівнянні з відповідними величинами для трансформатора тієї ж потужності при промисловій частоті 50 Гц та використанні листової сталі товщиною 0,35 мм. Такий радикальний ефект від підвищення частоти досягається тільки при використанні форсованих способів охолодження трансформатора.

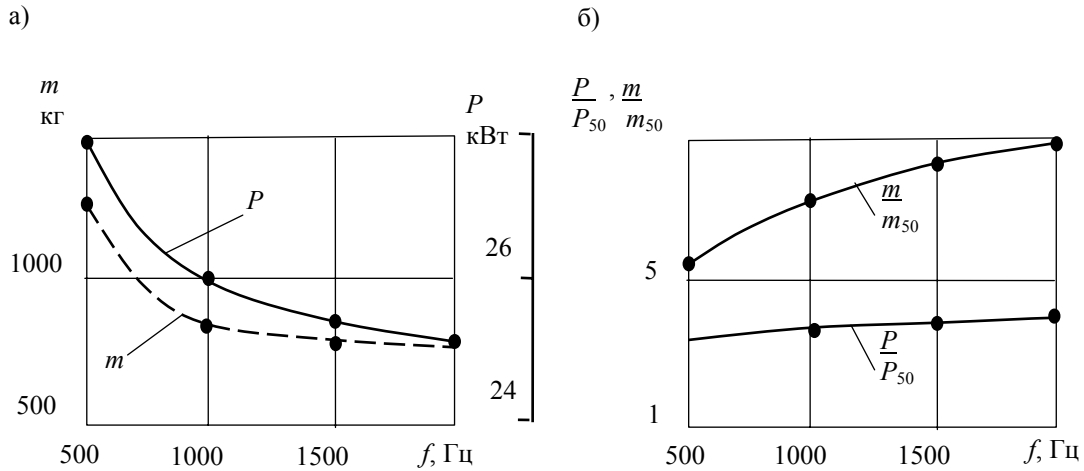


Рис.11 - Маса (m) та втрати (P) трансформатора в абсолютних одиницях (а) та по відношенню до цих характеристик трансформатора при 50 Гц (б)

Значення $\alpha \cdot \tau_{\Pi} = 7500 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$, для якого побудовані залежності (рис.11), відносяться до масляного примусового охолодження з нагрівом поверхні до 50°C . При використанні примусового повітряного охолодження ($\alpha \cdot \tau_{\Pi} = 2000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$) ефект від підвищення частоти є більш скромним. Важливою є також та особливість, що з підвищенням інтенсивності охолодження втрати потужності зростають в дуже малій мірі, в той же час як маса знижується набагато швидше.

Особливістю ж запропонованого режиму природної (однорідної) комутації ключів при нульових струмах перетворювача однорідної структури з частотним керуванням при сталому режимі є те, що при ній забезпечується не тільки “м’яка” комутація ключів, але й формуються “м’які” фронти напруги на обмотках трансформатора проміжної ланки змінного струму.

У четвертому розділі наведено наукові результати вибору структур і режимів роботи тягового асинхронного електроприводу вагонів метро підвищеної потужності з груповим керуванням тяговими двигунами.

По-перше, в роботі пропонується переглянути традиційну двозонну концепцію керування тяговими асинхронними двигунами вагона метро в діапазоні його швидкостей від 0 до $V_{\max}$ у напрямку переходу на однозонну характеристику $U/f = \text{const}$ у всьому діапазоні експлуатаційних швидкостей. Ефективність такого переходу обумовлюється зниженням струмового навантаження асинхронних тягових двигунів (АТД). За рахунок скорочення часу робочої частини руху поїзда на міжстанційному перегоні. Іншим позитивом переходу до однозонної характеристики керування АТД є

можливість реалізації чисто рекуперативного гальмування з гранично допустимим гальмовим моментом у всьому діапазоні експлуатаційних швидкостей.

По-друге, запропоноване групове керування АТД вагона від одного інвертора, хоча і спрощує силову схему тягового електропривода, вимагає виконання з точки зору допустимого струморозподілення між АТД дуже жорстких вимог щодо характеристик АТД і діаметрів колісних пар. Так, для забезпечення допустимої нерівномірності струморозподілення в силових колах електродвигунів при середньому діаметрі колеса вагона метро $D=0,9$ м допустиме відхилення діаметрів коліс не повинно перевищувати 2,7 мм.

Поряд із перевагами однозонного групового керування асинхронними тяговими двигунами вагона можливе замикання виводів статорних обмоток чотирьох АТД при деяких відмовах у перетворювально-регулювальному блоці. У роботі показано, що найбільш важким із точки зору струму короткого замикання АТД є комбіноване двофазно-трифазне коротке замикання, яке відбувається при “пробої” або “не вимиканні” одного із ключів інвертора. Відносно величини найбільшої амплітуди фазного струму у порівнянні з амплітудою номінального фазного струму АТД у цьому випадку визначається співвідношенням:

$$|I_{ш}^*| = \frac{1}{x_c^*} (1 + \sqrt{2} \cdot e^{-0,375T_p/\tau}), \quad (13)$$

де x_c^* - відносний опір сумарної індуктивності розсіювання на приведеній частоті обертання ротора ω_p ;

$T_p = 2\pi / \omega_p$ - період частоти ротора;

$\tau = \alpha_c / R_c$ - постійна часу статорної обмотки.

Кратність ударних моментів, обумовлених струмами короткого замикання при відмовах в інверторі по відношенню до номінальних значень зростає в рази, що, як наслідок, може призвести до ушкодження в механічній частині привода візків із відповідними наслідками щодо безпеки руху. Для усунення негативних наслідків стосовно ударних моментів на валах АТД вагона в роботі пропонуються схеми захисту, із яких найбільш доцільною в метробудуванні є схема (рис.12).

Стримуючим чинником на шляху впровадження в вагонобудуванні групового однозонного керування АТД є реалізація високовольтного потужного автономного інвертора напруги підвищеної частоти з повітряним охолодженням.

У роботі показано, що підвищену частоту і потужність тягових автономних інверторів напруги з силовими високовольтними напівпровідниковими двоопераційними приладами обмеженої швидкодії можна реалізувати за рахунок введення в схему інвертора вузлів однорідної дросельної комутації, які реалізують з чисто ємнісними снаберами “м’яку” комутацію ключів вентильного комутатора інвертора на частотах 2 і більше кГц практично

без зниження паспортної навантажувальної здатності по струму двоопераційних приладів.

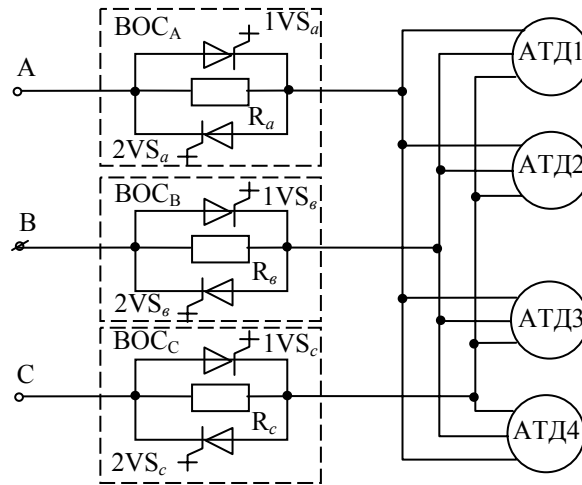


Рис. 12 - Силова схема електромеханічного блоку вагона з фазними вузлами захисту

У теоретичному плані побудова і аналіз таких потужних високовольтих мостових тягових інверторів з ШІМ є новою задачею і стосується вона, в основному, визначенню характеристик функціонально завершених фазових модулів (рис 13 а) із “м’якою” комутацією двоквадратних ключів знакозмінного струму.

Фазовий модуль з “м’якою” комутацією ключів (рис. 13 а) складається із двоквадратних ключів знакозмінного струму з чисто ємкісними снаберами 1 і 2, які комутують з частотою ШІМ та вузла однорідної дросельної комутації (ВОК), що включає в себе комутуючі конденсатори C_1 , C_2 у вигляді ємнісного дільника вхідної напруги U_d , чотириквадратний ключ VS , який будується, як правило, на основі двоопераційних тиристорів GCT і лінійний комутаційний дросель L із вебер – амперною характеристикою (рис. 13, б).

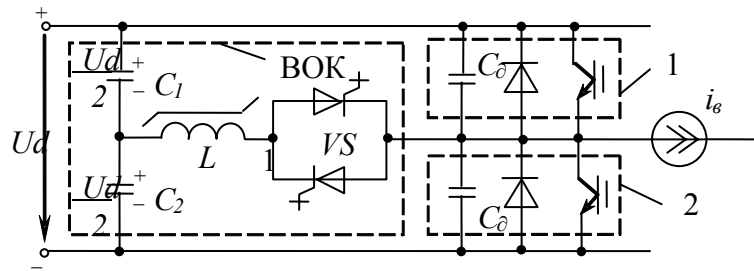
Вузол комутації ВОК фазного модуля підключається до роботи силової схеми лише на короткий інтервал часу T_k в момент t_0 (рис. 13, в), який передуює безпосередньо заданому моменту t_2 (рис. 13 в) чергового переключення ключів 1 і 2. Це і дозволяє “м’яко” перевести вихідний струм із діодів цих ключів на протилежні двоопераційні керовані прилади практично без крізних струмів та комутаційних втрат при їх ввімкненні.

Приєднання снаберних конденсаторів C_d , у свою чергу, дозволяє практично повністю позбутися комутаційних втрат і при вимиканні двоопераційних приладів ключів 1 і 2, а також обмежити крутизну фронтів вихідної напруги.

Очевидно, що чергова комутація у комутаторі фазового модуля може початися тільки тоді, коли закінчиться попередня. Це створює обмеження по діапазону регулювання при ШІМ, які можуть бути мінімізовані стабілізацією інтервалу переходу t_n , на протязі якого вихідна напруга змінює полярність. Тут

основним дестабілізуючим фактором є струм навантаження i_{θ} , зменшення якого уповільнює перезаряд снаберних конденсаторів.

а)



б)

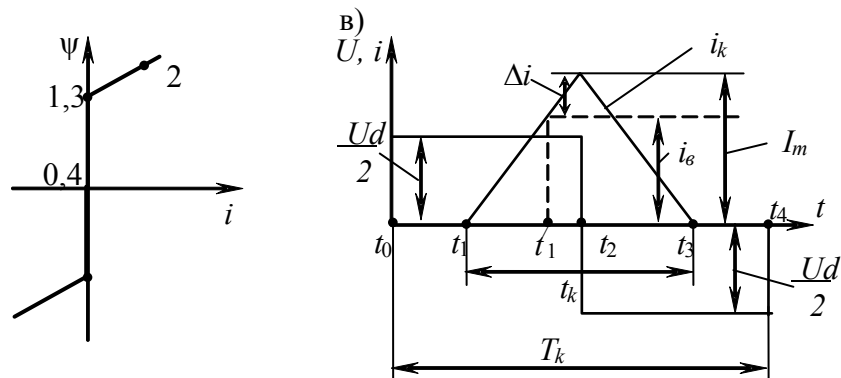


Рис. 13 - Силова схема фазового модуля з „м'якою” комутацією ключів (а): ВОК – вузол однорідної дросельної комутації (VS– чотириквadrантний ключ; C_1, C_2 –конденсатори комутації; L – комутуючий дросель); 1,2– двоопераційні ключі знакозмінного струму з чисто ємнісними снаберами (C_{θ}); вебер-амперна характеристика комутуючого дроселя (б); діаграми струму і напруги комутуючого дроселя L в інтервалі „м'якої” комутації при ввімкненні ключа 1 і відсутності снаберного конденсатора

Компенсувати цей фактор можливо, підвищуючи частку струму перезаряду, яка постачається ВОК, що, в свою чергу, дещо підвищує встановлену потужність його елементів.

У роботі вирішено задачу параметричної оптимізації характеристик дроселя ВОК при умові забезпечення доцільної величини втрат в котушці від вихрових струмів. Пропонується характеристики дроселя із замикаючими ярмами визначати узагальненим рівнянням

$$y = y_{\theta} \cdot \Pi \cdot \left(\frac{x_i}{x_{\theta}} \right)^{U_x}, \quad (14)$$

де x_i, x_{θ} - вихідні величини і їх базисні значення;

U_x - число (показник степені), що характеризує ступінь впливу;

y і y_{θ} - характеристика дроселя і її величина при базисній сукупності вихідних величин;

Π - символ добутку співмножників, розміщених у правій частині рівняння.

Показники степені U_x вираховуються чисельно із співвідношень

$$U_x = \left(\frac{x_{\delta}}{y_{\delta}} \right) \cdot \left(\frac{dy}{dx} \right) \cdot U_{\delta}. \quad (15)$$

Запропонована конструкція комутуючого дроселя ВОК дає приблизно в 1,6 разів менші втрати потужності, ніж конструкція чисто повітряного дроселя. Стосовно блоку електромагнітної сумісності то основною ланкою, щодо якої в роботі вирішуються задачі теоретичного класу, є вхідний гібридний фільтр на основі одноланкового пасивного LC -фільтра і послідовного активного фільтра.

У роботі розроблена лінеаризована модель системи фільтрації гібридного фільтра, яка з урахуванням традиційної системи струмового керування з регулятором по збуренню в каналі енергонакопичувача (рис.14). Коефіцієнт подавлення K_n системи фільтрації гібридного фільтра є зворотною величиною модуля передаточної функції

$$W_n = \frac{di_d}{di_u} = \frac{1}{C_d \cdot p \left(\frac{U_{co} \cdot C \cdot p}{i_{d0} \cdot W_p} + W_k \right)}. \quad (15)$$

Практичним засобом у напрямку підвищення коефіцієнта подавлення K_n є “жорстке” завдання вихідної напруги, яке виключає негативний вплив кінцевої величини ємності. C енергонакопичувача в каналі гармонік, в основу якого доцільно покласти замкнену структуру з широкополосною настройкою. У цьому випадку активною ланкою гібридного фільтра будуть подавляватися низькочастотні неканонічні гармоніки всього діапазону частот, в якому працюють системи СЦБ метрополітену. Що стосується подавлення канонічних гармонік, то тут достатньо мати пасивну LC -ланку гібридного фільтра з резонансною частотою на рівні 100 Гц.

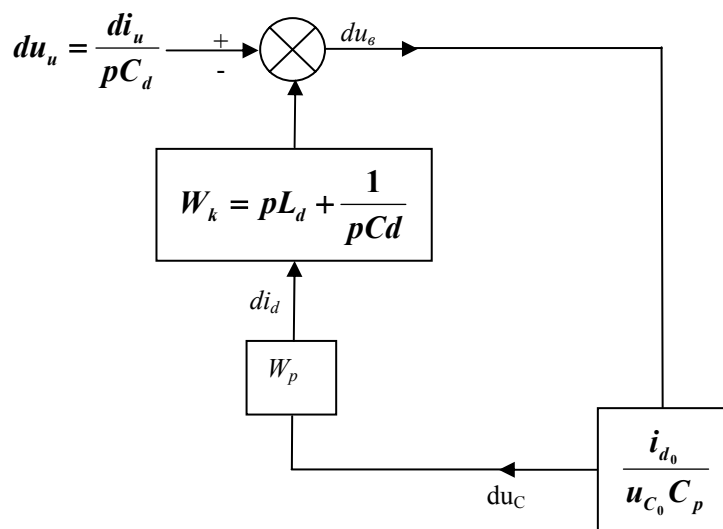


Рис.14 - Модель гібридного фільтра

П'ятий розділ роботи присвячено дослідженню тягових електроприводів вагонів метрополітену з «м'якою» комутацією напівпровідникових ключів автономних інверторів напруги.

У роботі виконано порівняльну оцінку двох схем асинхронного тягового приводу з трифазними та двофазними тяговими двигунами для випадку коли не потребується конструкційних змін у комутаторах тягових перетворювачів та в статорних обмотках двигунів.

Установлено, що стала потужність вентильних комплектів двофазної і трифазної схем тягових асинхронних електроприводів вагонів метро з однозонним груповим управлінням тяговими двигунами є однаковою і більшою в 5,41 разів від максимальної вихідної потужності навантаження.

Щодо переваг двофазної схеми, то в ній блок струмообмеження є конструкційно більш простим, так як має два фазних вузла захисту проти трьох у трифазній схемі тягового асинхронного електроприводу. Крім цього, вона дає менші втрати потужності у чотирьохквadrантних ключах вузлів захисту по причині того, що напруга на фазних обмотках двигуна приблизно вдвічі вища, чим у трифазній схемі. Отже, в тій же пропорції менший і сумарний струм цих обмоток.

Стосовно відносних величин аварійних фазних струмів асинхронних тягових двигунів у двофазній і трифазній схемах при відмовах в інверторі напруги типу “пробиття” двох чи одного ключів, що відповідно призводить до симетричного і несиметричного коротких замикань статорних обмоток двигунів, то тут також результати порівняльного аналізу говорять на користь двофазної схеми. Так, при симетричному короткому замиканні (двофазному у двофазній схемі і трифазному у трифазній) максимальна величина амплітуди аварійного фазного струму у трифазній схемі сягає $7,5 I_{mN}^{(3)}$ проти $6,3 I_{mN}^{(2)}$ у двофазній (де I_{mN} – амплітуда фазного струму у номінальному режимі роботи двигуна). При несиметричному короткому замиканні (однофазному у двофазній схемі і двофазно – трифазному у трифазній) ці величини відповідно складають $8 I_{mN}^{(3)}$ і $7 I_{mN}^{(2)}$.

Найбільш суттєвим чинником, стосовно переваги двофазного асинхронного тягового електроприводу вагона метро, є те, що у двофазній мостовій схемі інвертора можлива реалізація однополярної синусоїдальної ШІМ вихідної напруги. У трифазній мостовій схемі інвертора напруги може бути реалізовано тільки двополярну синусоїдальну ШІМ вихідну напругу, що дає вдвічі більші відносні перепади напруги і, отже, більші комутаційні втрати потужності в керованих напівпровідникових приладах комутатора трифазного мостового інвертора напруги, ніж у двофазній мостовій схемі інвертора. Остання обставина і дозволяє при однакових величинах комутаційних втрат у керованих напівпровідникових приладах двофазної і трифазної мостових схем інверторів збільшити у двофазній схемі частоту ШІМ і, отже, знизити розміри силових фільтрів та підвищити коефіцієнт корисної дії тягових асинхронних двигунів.

Кількісна оцінка величин гармонійних складових частоти ШІМ на вході і виході двофазної і трифазної схем інверторів напруги в роботі виконана на основі аналізу спектральних характеристик комутаційних функцій $S_{ш}$, які пов'язують між собою вхідні і вихідні параметри (напруги і струми) цих схем. Залежність для відносних гармонік вихідної напруги від глибини регулювання – $U_{ш}^* = S_{ш}^* = F(C_p)$ для двофазної і трифазної мостових схем інверторів напруги (рис. 15 а (крива 3 і крива 2 відповідно)).

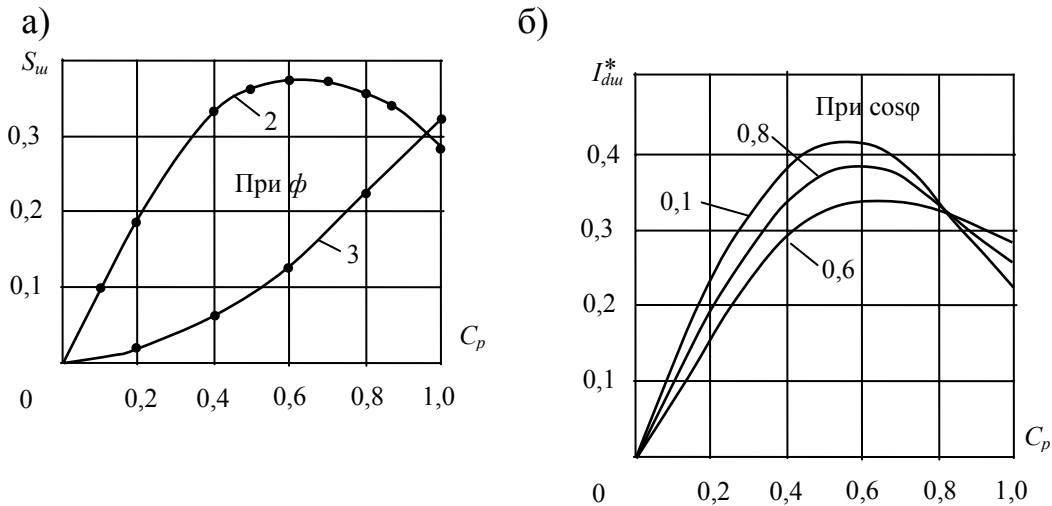


Рис. 15 - Залежності відносних гармонік вихідної напруги інверторів напруги з синусоїдальною ШІМ: а): 2) – для двофазної схеми; 3) – для трифазної схеми; б) залежності відносної величини першої гармоніки ШІМ у вхідному струмі від глибини регулювання при спрощеному алгоритмі керування

Стосовно залежностей для відносних діючих значень гармонік із частотою ШІМ I_{dm}^* забезпечує у вхідному струмі від глибини регулювання C_p , то для трифазної схеми залежність $I_{dm}^{*(3)} = F_3(C_p)$ співпадає з залежністю для комутаційної функції $S_{ш}^{*(3)} = F_3(C_p)$, (рис. 15 а) відображається кривою 3. Для двофазного мостового інвертора напруги з ШІМ величини гармонік вхідного струму залежать від алгоритму керування. Оптимальним, з точки зору мінімізації їх амплітуд, є такий алгоритм, при якому гармоніки з частотою ШІМ, обумовлені кожною із двох вихідних фаз, знаходиться у протифазі одна до іншої і, отже, результуюча амплітуда дорівнює різниці амплітуд складових. Розрахунки показують, що відносна величина гармоніки частоти ШІМ у вхідному струмі змінюється в залежності від глибини регулювання (рис. 15 б).

Якщо ж порівняти одержані вище залежності для дво- і трифазної схем мостових інверторів напруги, то можна бачити, що найбільші величини гармонік з частотою ШІМ як на вході, так і на виході інверторів при оптимальних алгоритмах управління приблизно однакові. Одночасно ці гармоніки є невеликими у порівнянні з основними гармоніками. Останнє пояснюється для трифазної схеми виключення нульової послідовності, а для двофазної – вдвічі меншим комутаційним перепадом при однополярній ШІМ.

Отже, при рівних комутаційних втратах, у двофазній схемі можна у два рази збільшити частоту ШІМ і одержати тим самим пропорційне зниження вищих гармонік як на вході, так і на виході. Останнє і є найбільш суттєвим для тягових асинхронних електроприводів вагонів, так як вхідний LC – фільтр із-за високих вимог до згладжування пульсацій тягового струму є дуже громіздким вузлом. Крім позитивного чинника, двофазна схема мостового інвертора, побудована на боці однофазних мостових комутаторів, дозволяє спростити організацію “м’якої” комутації керованих напівпровідникових приладів із метою подальшого зниження в них комутаційних втрат і, отже, підняття частоти ШІМ, а також інших негативних наслідків, обумовлених високою швидкістю перемикачів ключових елементів.

Порівняльна оцінка сумарних втрат у схемах трифазного і двофазного інверторів напруги з “м’якою” комутацією в роботі виконана за наступними вихідними даними:

- потужність інвертора: $P_H=1000$ кВт;
- напруга живлення інвертора: $U_d=1500$ В;
- частота несучої синусоїдальної ШІМ: $f_{ш}=3 \cdot 10^3$ Гц;
- коефіцієнт модуляції вихідної напруги інвертора: $k_H \leq 1$;
- максимальна тривалість комутаційного інтервалу ВОК на періоді ШІМ: $t_k=33 \cdot 10^{-6}$ с;
- максимальна частота вихідної напруги інвертора при $P_H=1000$ кВт: $f_{max}=100$ Гц;
- характеристика керування тяговими двигунами в діапазоні частот 0–100 Гц; однозонна;
- коефіцієнт потужності асинхронних тягових двигунів: $\cos\varphi=0,9$.

Встановлено, що сумарні втрати потужності в трифазному і двофазному комутаторах з ВОК інверторів напруги потужності 1000 кВт складають відповідно:

$$\Delta P^{(3)} = P_{сш}^{(3)} + 3 \cdot P_{ВОК}^{(3)} = 7930 + 3 \cdot 482 = 9376 \text{ Вт}, \quad (16)$$

$$\Delta P^{(2)} = P_{сш}^{(2)} + 2 \cdot P_{ВОК}^{(2)} = 6006 + 2 \cdot 292,2 = 6591,6 \text{ Вт}, \quad (17)$$

тобто різниця між ними складає 2784,4 Вт на користь двофазної схеми.

Таким чином, не дивлячись на те, що двофазні асинхронні тягові двигуни за своїми масогабаритними показниками при однаковій потужності дещо (на 7 – 8%) поступаються трифазним асинхронним тяговим двигунам, право на “життя” в вагонобудуванні, поряд з трифазним асинхронним електроприводом має і двофазний.

У шостому розділі наведено результати аналізу і моделювання системи “перетворювач – асинхронний двигун”, алгоритми керування тяговими асинхронними двигунами при виході на природну характеристику, електромеханічні рівняння подібності, що пов’язують геометричні розміри асинхронного двигуна з його механічними і електричними параметрами та Matlab – моделі запропонованих вузлів стосовно їх використання для задач аналізу і синтезу в підсистемах електричної тяги метрополітенів.

При аналізі і синтезі параметрів елементів системи “перетворювач – асинхронний двигун” у роботі одержав подальший розвиток аналітичний, метод, заоснований на переході в рівняннях всієї електричної частини системи від узагальнюючих i_u – координат до i_ψ – координат. Приклад такого переходу для еквівалентної схеми асинхронного двигуна наведено на рис. 16.

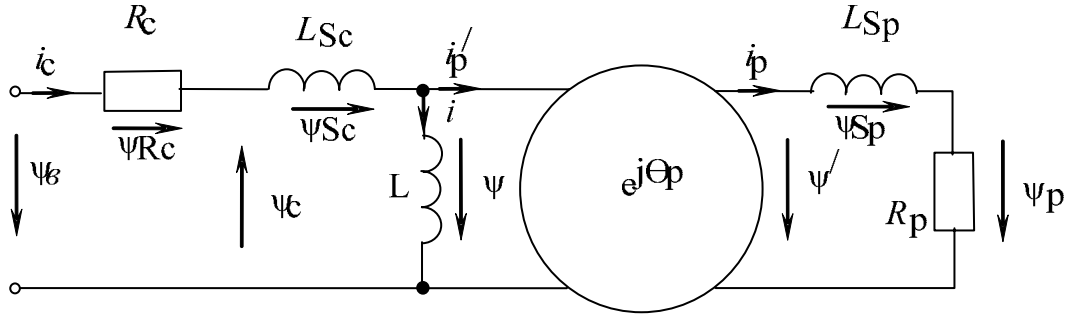


Рис. 16 - Еквівалентна схема асинхронного двигуна в i_ψ -базисі

Еквівалентна схема асинхронного двигуна у i_ψ – базисі містить чотири типа елементарних ланок:

- джерело потокозчеплення $\psi_c = \int U_c \cdot dt$, де U_c – напруга джерела живлення;
- потокозчеплення резистора $\psi_R = R \cdot \int_0^t dt + \psi_{Rn}$, ψ_{Rn} – негативне значення потокозчеплення; ця ланка є інерційною ланкою;
- потокозчеплення індуктивності $\psi_L = L \cdot i$, яка представляє собою пропорційну ланку;
- ланку повороту, яка враховує обертання ротора і перетворююча координата у відповідності з рівняннями

$$i'_p = i_p \cdot e^{j\theta_p}, \quad \psi_p = \psi' \cdot e^{j\theta_p}, \quad (18)$$

де θ – поточний кут повороту ротора;

i'_p і ψ'_p – приведені значення струму ротора і потокозчеплення, пов'язаного з основним магнітним потоком.

Потокозчеплення інерційних ланок R_c і R_p є змінними стану електричної частини системи в i_ψ – координатах. Вони незалежні і тому порядок системи є рівний двом. Початкові потокозчеплення ψ_{Rn} визначаються або розрахунком попереднього сталого режиму в i_ψ – координатах або відомим початковим значенням струмів i_c , i , i_p , які є змінними стану в i_u – координатах, таким чином, щоб задовольнялося рівняння другого закону Кіргофа:

$$\psi' = \psi \cdot e^{-j\theta_p} = \psi_{sp} + \psi_p; \quad \psi_c = \psi_{Rc} - \psi_B = -(\psi_{sc} + \psi). \quad (19)$$

Друге рівняння (19) вказує на те, що у загальному випадку, при врахуванні як вільної так і вимушеної складових процесу початкове ψ_{Rc} можна задавати будь-яким, але так, щоб зберігалось початкове значення потокозчеплення статора $\psi_c = \psi_{Rc} - \psi_B$.

У роботі на прикладі розрахунку режимів короткого замикання асинхронного тягового двигуна, що виникають в результаті “пробиття” ключів

комутатора інвертора напруги показані позитивні якості запропонованого аналітичного методу при використанні операторної форми захисту $i\psi$ – базиса стосовно перебігу приблизного вирішення задач, які тепер зводяться, по суті, до визначення початкових значень потокозчеплень ротора і статора.

Покращити керування асинхронними тяговими двигунами вагонів метро в режимі їх можливої роботи на природній характеристиці дозволяє запропонований в роботі симетричний алгоритм керування асинхронними двигунами в режимі ослаблення поля, який, на відміну від традиційного, дозволяє достатньо просто реалізувати контроль за обертаючим моментом при виході двигуна на природну характеристику за рахунок спеціального закону зміни вихідної частоти інвертора f , що усуває згасаючі коливання зміни моменту.

Виконаний аналіз сталого режиму роботи асинхронного електроприводу з використанням операторної еквівалентної $i\psi$ – моделі електричної частини системи “перетворювач – асинхронний двигун” показав, що вільні складові струмів статора і ротора обумовлюють пульсації складової обертаючого моменту двигуна. При цьому, тільки складова з постійною часу статора τ_c є шкідливою, так як вона обумовлює пульсації моменту двигуна.

Пульсації моменту створюють небажані динамічні навантаження на механічну частину привода візків, тому бажано керувати інвертором напруги в режимі роботи двигуна на природній характеристиці так, щоб вільні складові з постійною часу статора не створювалися. Для виключення вільних складових із постійною часу статора, необхідно для зміни частоти безпосередньо виходити на сталий годограф нової частоти. На рис. 17 а показано найбільш простий варіант такого годографа вектора керування інвертором.

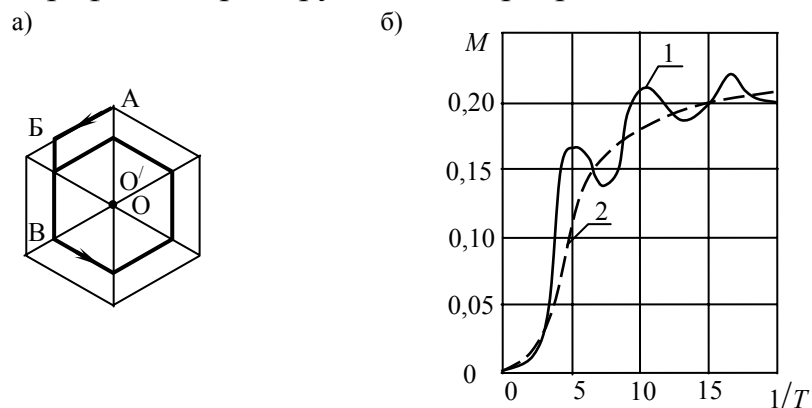


Рис. 17 - Годограф вектора (а), та результати моделювання зміни моменту на валу асинхронного двигуна (б): 1 – при традиційному алгоритмі керування інвертором; 2 – при симетричному алгоритмі керування інвертором

Для цього подається приріст тривалості міжкомутаційного інтервалу, що відповідає новому значенню частоти (відрізок АБ), а потім виконується повернення до попереднього значення міжкомутаційного інтервалу (відрізок БВ). Це і виводить робочу точку на новий сталий годограф. Після цього можна або працювати з новим значенням частоти як частоти сталого режиму, або проводити подальшу зміну частоти шляхом парного приросту

міжкомутаційного інтервалу за схемою: нове значення міжкомутаційного інтервалу, повернення до попереднього і т.д. На рис. 17 б наведені результати моделювання зміни моменту на валу асинхронного двигуна при стрибкоподібній зміні тривалості міжкомутаційного інтервалу T із яких видно, що запропонований симетричний алгоритм керування дозволяє усунути виконання повільно затухаючих коливальних складових моменту, які є притаманними при традиційному алгоритмі керування інвертором (крива 1), надаючи процесу зміни моменту аперіодичний характер (крива 2).

Для вирішення задач синтезу тягового асинхронного електроприводу вагона, в роботі на роль “чернеточної” аналітичної моделі пропонуються аналітичні електромеханічні рівняння подібності, які пов’язують геометричні розміри двигуна з механічними характеристиками системи: обертаючим моментом, передаточним відношенням редуктора та електричними характеристиками: індуктивністю розсіювання, намагнічуючим струмом тягового двигуна.

Основним рівнянням подібності, яке зв’язує базисний розмір L_6 (периметр щілини) з величиною обертаючого моменту M на валу асинхронного двигуна є:

$$L_6^4 = 2\sqrt{2\pi} \cdot \frac{M}{k_k \cdot k_c \cdot k_z \cdot (1 - k_z) \cdot b^* \cdot c^* \cdot B_m \cdot j}, \quad (20)$$

де k_z - магнітний (для зубців) коефіцієнт хвильової зони; $(1 - k_z)$ - електричний (пазовий) коефіцієнт хвильової зони; k_c - коефіцієнт заповнення осердя у осьовому напрямку; k_k - коефіцієнт заповнення паза статора; $b^* = b/L_6$ - відносна довжина ротора; $c^* = c/L_6$ - відносна висота пазів статора; B_m - амплітуда індукції в зубці; j - діюче значення густини струму в обмотках.

Оскільки мінімум параметра L_6 досягається при $k_z^{\text{onm}} = 0,5$, коефіцієнт k_z можна змінювати в достатньо широких межах.

Оцінку впливу основних характеристик систем, номінальної частоти f і передаточного числа редуктора n на масоенергетичні характеристики (масу m і втрат P_k) тягового асинхронного двигуна можна виконати, використовуючи одержані в роботі пропорції подібності:

$$L_6 \sim \sqrt{f}, \quad m \sim \frac{1}{\sqrt{f}}, \quad P_k \sim \frac{1}{\sqrt{f}}, \quad L_6 \sim \left(\frac{1}{n}\right)^{3/4}, \quad m \sim \left(\frac{1}{n}\right)^{1/4}, \quad P_k \sim \left(\frac{1}{n}\right)^{1/4}. \quad (21)$$

У дисертаційній роботі розроблено комплекс спеціальних моделей в середовищі Matlab для систем електроживлення повздовжньої лінії постійного струму метрополітенів стабілізованою напругою, для трифазного автономного інвертора з гібридним фільтром на основі послідовного активного фільтра перетворювально-регулювального блока вагона метро підвищеної потужності, а також асинхронного тягового двигуна, який описується рівняннями у іψ-координатах.

Як приклад, (рис.18) наведено в позначках Matlab 6 структуру однієї із модифікацій трифазного автономного інвертора напруги з гібридним входним фільтром на основі послідовного активного фільтра.

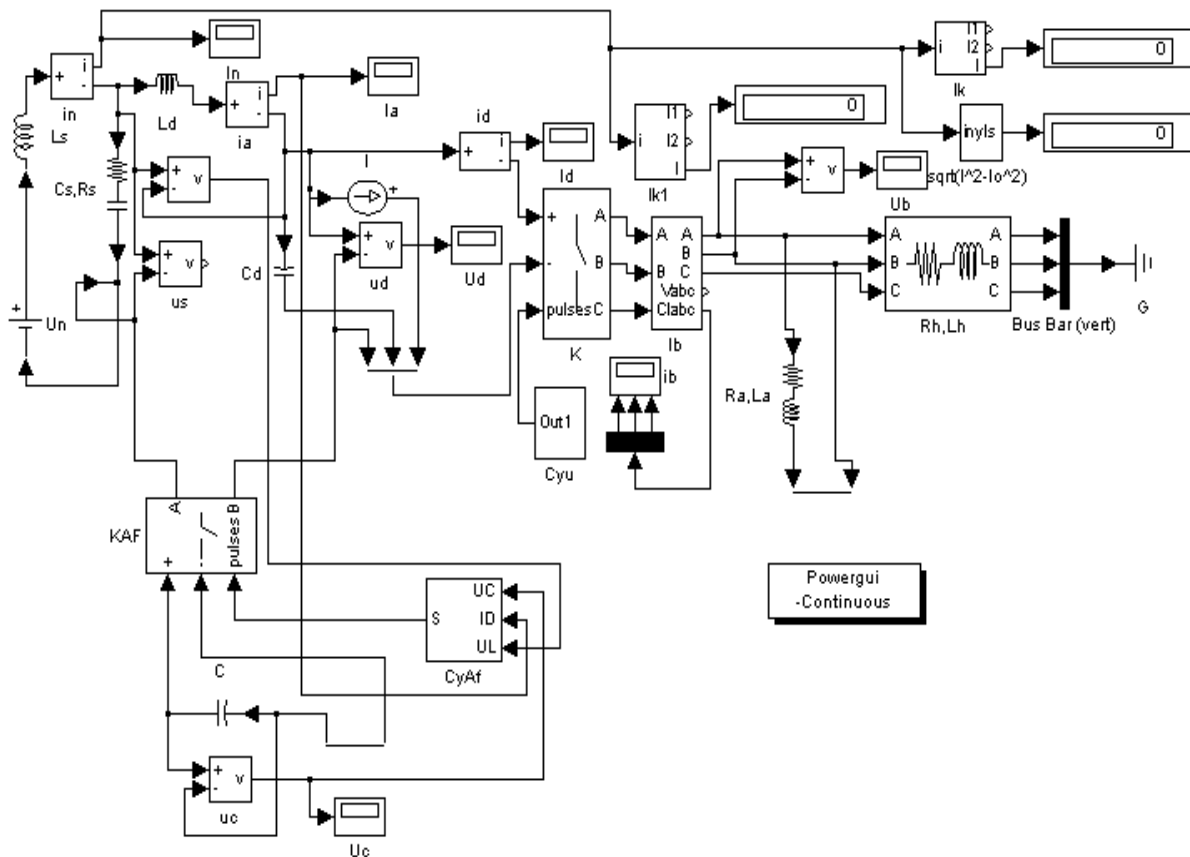


Рис. 18 - Структура моделі трифазного автономного інвертора напруги

Силовa схема моделі включає джерело живлення U_{II} , основний пасивний фільтр $L_d C_d$, трифазний мостовий комутатор K автономного інвертора напруги, трифазне симетричне навантаження R_h, L_h , однофазне навантаження L_a, R_a , яке створює асиметрію вихідних струмів, комутатор KAf послідовного активного фільтра (АФ), енергонакопичувач C , додаткові пасивні фільтри L_s, C_s, R_s і джерела струму I для завдання додаткових гармонічних складових вхідного струму.

У дисертаційній роботі також розглянуто питання практичної реалізації результатів досліджень на виробництві, наукових установах та навчальних закладах.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі теоретичних і експериментальних досліджень вирішено актуальну науково-технічну проблему – енергозбереження при експлуатації метрополітенів за рахунок вдосконалення системи електричної тяги метрополітенів, яка враховує перехід на розподільне тягове електропостачання з повздовжньою високовольтною лінією живлення постійного струму та поїзди змішаної структури, що формуються з вагонів із

тяговими асинхронними двигунами та безмоторними, що дозволяє суттєво підвищити енергоефективність і надійність системи електричної тяги метрополітенів.

За результатами проведеної роботи можна зробити наступні висновки.

1. Дослідження структури та режимів роботи систем електричної тяги метрополітенів показали, що ще в недостатній мірі використовуються досягнення науково-технічного прогресу та внутрішні резерви підприємств. Особливо це стосується вирішення питань проблеми енергозбереження, оскільки витрати на оплату електроенергії перевищують 30 % у собівартості пасажирських перевезень. Зокрема, коефіцієнт корисної дії тягових підстанцій не перевищує 0,95, а тягових електроприводів вагонів метро - 0,80.
2. Встановлено, що вітчизняні метрополітени, які використовують систему електричної тяги напругою 825 В на основі децентралізованого електропостачання з підземними тяговими підстанціями на базі перетворювальних шестипульсних діодних випрямлячів і поїздів із тяговими колекторними двигунами постійного струму, потребують реконструкції, а також модернізації технічних засобів.
3. Розроблено основи теорії та проведено моделювання енергоефективних напівкерованих дванадцятипульсних випрямлячів із реверсивним вольтододатком – стабілізаторів напруги для головних тягових підстанцій метрополітенів із повздовжньою лінією живлення постійного струму. Використання таких стабілізаторів напруги дозволяє при незначному збільшенні установленої потужності (на 10 ÷ 15%) перетворювального агрегату забезпечити стабілізацію напруги на шинах тягової підстанції у всьому діапазоні коливань напруги живлення при коефіцієнті потужності мережі живлення не нижче 0,98. При цьому перехід на більш високу випрямлену напругу, а саме 12 кВ, дає можливість підняти коефіцієнт корисної дії головних тягових підстанцій до 0,955.
4. Коефіцієнт корисної дії автономних інверторів напруги на IGBT-модулях з „м’якою” комутацією при частоті синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції 3 кГц і напрузі живлення 1500 В тягового асинхронного електроприводу потужністю до 1000 кВт є не меншим за 0,90.
5. На основі аналізу силової схеми перетворювача постійної напруги з проміжною ланкою однофазного струму підвищеної частоти доопрацьовано алгоритм його функціонування, що забезпечує, „м’яку” комутацію силових ключів та дає можливість реалізувати коефіцієнт корисної дії пунктів живлення тягової мережі до 0,955. Підвищення рівня напруги в тяговій мережі до 1500 В дозволяє покращити енергетичні показники тягового електроприводу.
6. Науково обґрунтовано умови вибору конструкції електромагнітного трансформатора проміжної ланки підвищеної частоти та структуру високовольтних ключів і їх снаберів. Використання на тяговій мережі метрополітенів перетворювачів постійної напруги з проміжною ланкою однофазного змінного струму підвищеної частоти дозволяє здійснювати,

поряд із функцією трансформації постійної напруги без генерації реактивної потужності, двосторонній обмін електроенергією між повздовжньою високовольтною лінією живлення і тяговою мережею.

7. Доведено доцільність однозонної характеристики керування тяговими асинхронними двигунами вагона, що дозволяє зменшити масо-габаритні показники електрообладнання тягового електроприводу підвищеної потужності та витрати електроенергії на тягу за рахунок скорочення часу розгону і гальмування.

8. Визначений рівень відхилень діаметрів коліс, від якого залежить на рівномірність струморозподілення між двигунами, забезпечує коригування нормативів експлуатації з метою раціонального використання енергетичних та матеріальних ресурсів.

9. Розроблений блок електромагнітної сумісності тягового асинхронного електроприводу вагона з тяговою мережею в усталених і перехідних режимах забезпечує вирішення задач щодо обмеження перенапруг у всіх режимах роботи тягового електропостачання. При цьому новим елементом силової схеми блока електромагнітної сумісності, у порівнянні з традиційною силовою схемою, є активний фільтр послідовного типу, який забезпечує зменшення маси фільтрового обладнання у 3,5 рази.

10. Запропоновано методику розрахунку і схемотехнічні рішення захисту від струмів короткого замикання тягових асинхронних двигунів вагонів, які при відмовах в інверторі напруги типу „пробиття” ключа або несанкціоноване спрацювання тиристорного короткозамикача, вирішують задачу обмеження на рівні номінального пускового моменту ударних гальмових моментів на валах тягових асинхронних двигунів.

11. Науково обґрунтовано структуру і параметри вхідного фільтра реверсивного вольтододачка, що забезпечує стабілізацію напруги в поздовжній лінії живлення.

12. Отримані результати дозволяють зробити висновок, що покращення техніко-економічних показників підсистем електричної тяги метрополітенів можливе за рахунок переходу на електропостачання з повздовжньою високовольтною лінією постійного струму 12 кВ, випрямлячів-стабілізаторів напруги, живлення тягової мережі підвищеною напругою 1500 В, а стосовно поїздів – переходу до асинхронного електроприводу підвищеної потужності, з однозонною характеристикою керування.

13. Наукові положення, висновки та рекомендації, які отримані в дисертаційній роботі, впроваджено в ряді практичних розробок для підприємств, організацій та установ, що проектують, виготовляють та експлуатують технічні засоби метрополітенів, а також впроваджено в навчальний процес для підготовки спеціалістів і магістрів.

Упровадження запропонованих заходів з енергозбереження тільки на комунальному підприємстві «Харківський метрополітен» забезпечило зменшення споживання матеріальних ресурсів на 7,3 % (у кількісному вираженні) і енергетичних ресурсів до 2,4 % (тобто, в середньому 2, 39 млн. кВт-год за рік).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- 1 Хворост Н.В. Эксплуатационные характеристики управляемых полупроводниковых приборов тяговых преобразователей электроподвижного состава / Н.В. Хворост // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2003. – №2. – С. 31–36.
- 2 Сравнительный анализ спектральных и коммутационных характеристик двухфазной и трехфазной схем частотно-регулируемого электропривода / Н.В. Хворост, В.В. Чумак, Ю.П. Гончаров [та ін.] // Вестник НТУ „ХПИ”, „Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика”. – 2003. – Вып. 10, Т.2. – С. 460 – 464.
- 3 Режимы тяговых двигателей при отказах инвертора напряжения в двухфазном асинхронном электроприводе / Н.В. Хворост, В.В. Чумак, Ю.П. Гончаров [та ін.] // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2003. – №9 (67). – С. 29 – 34.
- 4 Хворост Н.В. Электрические железные дороги: этапы и перспективы развития / Н.В. Хворост, Н.В. Панасенко // Електротехніка і Електромеханіка. – 2003. – №4. – С. 104–114.
- 5 Хворост Н.В. Концепция новой структуры системы электрической тяги для метрополитена / Н.В. Хворост // Научно-техн. сборник „Коммунальное хозяйство городов”. – 2003. – Вып. 53. – С. 172 – 179.
- 6 Хворост Н.В. Режимы работы сетевого фильтра тяговой электропередачи с полупроводниковыми преобразователями магистрального электроподвижного состава постоянного тока / Н.В. Хворост, В.А. Чумак // Електротехніка і Електромеханіка. – 2004. – №1. – С. 87–92.
- 7 Переход к $i\psi$ -координатному базису при моделировании частотно-регулируемых электроприводов. / Н.В. Хворост, Ю.П. Гончаров, Н.В. Панасенко [та ін.] // Технічна електродинаміка, тем. випуск „Проблеми сучасної електротехніки”. – 2004. – №6. – С. 41–46.
- 8 Обратимый преобразователь для связи двух линий постоянного тока в системе распределенного тягового электроснабжения. / Н.В. Хворост, Ю.П. Гончаров, Н.В. Панасенко [та ін.] // Технічна електродинаміка. Тем. випуск „Проблеми сучасної електротехніки”. – 2004. – №6. – С. 99–106.
- 9 Управление асинхронным частотно-регулируемым электроприводом в режиме вывода на естественную характеристику двигателя / Н.В. Хворост, Ю.П. Гончаров, Н.В. Панасенко [та ін.] // Технічна електродинаміка. Тем. випуск „Силовая електроніка та енергоефективність”. – 2004. – №1. – С. 74 – 77.
- 10 Хворост М.В. Порівняльна оцінка вентильних комплектів двофазного і трифазного тягових асинхронних електроприводів / М.В. Хворост, В.А. Чумак, Н.М. Панасенко // Електротехніка і Електромеханіка. – 2004. – №2. – С. 89–94.
- 11 Хворост М.В. Підвищення ефективності дванадцятипульсових випрямлячів тягових перетворювальних агрегатів метрополітенів з повздовжньою високовольтною лінією живлення постійного струму / М.В. Хворост // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2004. – №3. – С. 50 – 54.

- 12 Хворост М.В. Аналітична методика розрахунку струмів короткого замикання трифазних тягових асинхронних двигунів у системі частотно-регулюємого електропривода з інверторами напруги / М.В. Хворост, В.А. Чумак, Н.М. Панасенко // Праці ІЕД НАН України. –2004. –№3(9). – С.70 – 78.
- 13 Хворост М.В. Базові положення теорії випрямлячів-стабілізаторів напруги для перетворювальних агрегатів головних тягових підстанцій метрополітенів з повздовжньою лінією постійного струму / М.В. Хворост // Научно-техн. сборник „Комунальное хозяйство городов”. –2004. –№60. – С. 326 – 247.
- 14 Хворост М.В. Силові схеми перетворювальних агрегатів головних тягових підстанцій метрополітена з повздовженою лінією живлення / М.В. Хворост, В.В. Божко // Електротехніка і Електромеханіка. –2005. –№1. – С. 106–109.
- 15 Хворост М.В. Способи компенсації відходу потенціалу штучної нульової точки джерела живлення /М.В. Хворост, В.С. Нікулін // Збірник наук. праць УкрДАЗТ. –2005. –Вип. 68. – С. 126–131.
- 16 Хворост Н.В. Накопитель энергии для тяговой сети метрополитена /Г.В. Омеляненко, Н.В. Хворост, В.Е. Бондаренко // Вісник НТУ „ХПІ”. –2005. –№36. – С. 47–56.
- 17 Хворост М.В. Система керування перетворювальними агрегатами тягових підстанцій з повздовжньою високовольтною лінією постійного струму. /М.В. Хворост, В.В. Замаруєв, В.В. Божко, В.Е. Бондаренко // Вісник НТУ „ХПІ”. –2005. –№36. – С. 141–146.
- 18 Тяговий електропривод метровагонів з однозонною характеристикою керування /М.В. Хворост, Ю.П. Гончаров, М.В. Панасенко [та ін.] // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. –2005. –№4. – С. 25–30.
- 19 Влияние формы характеристики управления тяговыми асинхронными двигателями метровагонов на равномерность токораспределения при питании от общего инвертора / Н.В. Хворост, Ю.П. Гончаров, Н.В. Панасенко [и др.] // Вісник Східноукр. Нац. університету ім. В. Даля. –2005. –№8(90), част.2. – С. 73–78.
- 20 Хворост Н.В. Электромеханические уравнения подобия и их применение при синтезе системы, „полупроводниковый преобразователь – тяговый асинхронный двигатель” /Н.В. Хворост // Електротехніка і Електромеханіка. –2005. –№3. – С. 50 – 55.
- 21 Хворост Н.В. Построение входного фильтра блока электромагнитной совместимости тяговой асинхронной электропередачи метровагона /Н.В. Хворост, В.С. Никулин, М.А. Капустян // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. –2005. –Вип. 69. – С. 115–124.
- 22 Хворост М.В. Тяговий трифазний мостовий інвертор напруги на основі вузла однорідної комутації з лінійним дроселем / Ю.П. Гончаров, М.В. Панасенко, М.В. Хворост [та ін.] // Научно-техн. сборник „Комунальное хозяйство городов”. –2006. –Вып. 67. – С. 271–278.

- 23 Хворост Н.В. Улучшение энергетических и динамических характеристик схем мягкой коммутации устройств силовой электроники с запираемыми полупроводниковыми приборами / Н.В. Хворост, Ю.П. Гончаров, В.В. Ивахно // Технічна електродинаміка. Тем. випуск „Проблеми сучасної електротехніки”. – 2006. – №2. – С.113–120.
- 24 Хворост М.В. Демпфований вхідний фільтр вольтододатка на двоопераційних тиристорах дванадцятипульсних випрямлячів тягових перетворювальних агрегатів метрополітена / М.В. Хворост, В.В. Божко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2006. – №3. – С. 41–45.
- 25 Хворост Н.В. Силовые активные фильтры для систем частотно-регулируемого привода на электрическом транспорте / Н.В. Хворост, Ю.П. Гончаров, Ю.В. Чурсина // Технічна електродинаміка. Тем. випуск „Силовая електроніка та енергоефективність”. – 2006. – Ч.1. – С. 19–26.
- 26 Хворост М.В. Вхідний фільтр двоопераційного вольтододатка дванадцятипульсного випрямача тягових перетворювальних агрегатів метрополітена / М.В. Хворост, В.В. Божко, М.О. Капустян // Тематичний випуск НАН України „Технічна електродинаміка. Силовая електроніка та енергоефективність”. – 2006. – Ч.2. – С. 23–26.
- 27 Хворост Н.В. Оценка эффективности гибридного фильтра блока электромагнитной совместимости тяговой электропередачи метровагона и к контактной сети питания метрополитена / Н.В. Хворост, В.С. Никулин // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2006. – №4. – С. 97–100.
- 28 Хворост Н.В. Оценка эффективности применения преобразователей с мягкой коммутацией в тяговых частотно-регулируемых электроприводах / Н.В. Хворост // Вісник СХУ ім. В. Даля. – 2006. – №8(102), т. 2. – С. 93–104.
- 29 Хворост М.В. Тягова асинхронна електропередача метровагона підвищеної ефективності. / Хворост М.В. // Електротехніка і Електромеханіка. – 2006. – №5. – С. 71–76.
- 30 Хворост М.В. Система електротягового забезпечення підвищеної ефективності для метрополітенів / М.В. Хворост, В.В. Божко // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – №6. – С. 79–86.
- 31 Хворост М.В. Параметры вольтододаткового входного фильтра, демпфованого по управлінню дванадцятипульсного випрямляча – стабілізатора напруги. / М.В. Хворост, В.В. Божко // Вісник НТУ „ХПІ”. – 2006. – № 42. – С. 14–20.
- 32 Хворост М.В. Моделювання режимів роботи силових схем електронних трансформаторів постійної напруги для пунктів живлення тягової мережі метрополітенів / М.В. Хворост // Вестник НТУ „ХПІ”, „Проблеми автоматизированного электропривода. Теория и практика”. – 2008. – Вып. 30. – С. 385 – 386.
- 33 Хворост М.В. Шляхи удосконалення перетворювальних агрегатів тягових підстанцій метрополітенів / М.В. Хворост // Вісник Східноукраїнського нац. ун-та. – 2008. – №5 (123), ч. 1. – С. 180 – 184.

- 34 Управление преобразователями на основе полупроводниковых ключей с вольтамперной характеристикой, дуальной характеристике тиристора / Ю.П. Гончаров, Н.В. Хворост, А.В. Ересько [и др.] // Технічна електродинаміка. Тем. випуск „Силовая електроніка та енергоефективність”. –2003. –Ч.1. – С. 23–26.
- 35 Двухтактные инверторы напряжения с однородной коммутацией на основе дросселей насыщения / В.В. Чумак, Н.В. Хворост, Ю.П. Гончаров [и др.] // Технічна електродинаміка. Тем. вип. „Силовая електроніка та енергоефективність”. –2003. –Ч. 2. – С. 66 – 71.
- 36 Совершенствование электрической тяги постоянного тока железных дорог Украины для скоростного пассажирского движения / Н.В. Хворост, Ю.П. Гончаров, Н.В. Панасенко [и др.] // Залізничний транспорт України. –2003. –№6. – С.11–18.
- 37 Тягові інвертори з одноопераційною комутацією / Ю.П. Гончаров, М.В. Панасенко, М.В. Хворост [та інш.] // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. –2003. –Вип. 55. – С. 31 – 40.
- 38 Комутуючі дроселі тягових автономних перетворювачів з вузлами двоступеневої одноопераційної комутації / М.В. Хворост, Ю.П. Гончаров, О.І. Семененко [та ін.] // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. –2004. –Вип. 57. – С. 46 – 53.
- 39 Хворост Н.В. Асинхронный тяговый привод с защитой от ударных моментов на валу двигателя и электрическим тормозом повышенной эффективности / Н.В. Хворост, Ю.П. Гончаров, Н.В. Панасенко // Вісник Східноукраїнського нац. ун-та. –2004. –№8 (78), ч. 1. – С. 249 – 255.
- 40 Оптимізація параметрів вузлів двоступеневої одноопераційної комутації тягових автономних перетворювачів рухомого складу / В.С. Нікулін, М.В. Хворост, Ю.П. Гончаров [та ін.] // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. –2004. –Вип. 64. – С. 153 – 158.
- 41 Хворост Н.В. Анализ расхода электроэнергии и энергосбережение на Харьковском метрополитене / Н.В. Хворост, В.И. Ляхов, М.В. Ляхов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті –2005. –№4. – С. 87–90.
- 42 Переход к $i\psi$ – координатному базису при моделюванні частотно – регулюємих електроприводов / Ю.П. Гончаров, Е.И. Сокол, А.Ю. Бару, Н.В. Хворост [и др.] // Вестник НТУ „ХПИ”, „Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика”. –2005. – Вып. 45. –С. 40 – 44.
- 43 Види комутації та енергетичні характеристики в електричних колах з ключовими елементами / М.В. Хворост, Ю.П. Гончаров, М.В. Панасенко [та ін.] // Електротехніка і Електромеханіка. –2005. –№4. С. 67–72.
- 44 Методика определения потерь в коммутирующих конденсаторах тяговых преобразователей подвижного состава / Н.В. Хворост, В.С. Никулин, Ю.П. Гончаров [и др.] // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. –2005. –№6. – С. 94–97.

- 45 Хворост Н.В. Выбор мощности тяговых электрических двигателей для вагонов метрополитена / П.М. Пушков, Н.В. Хворост, А.П. Турканов // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. –2006. –Вип. 72.– С. 90–97.
- 46 Хворост Н.В. Характеристики системы “инвертор напряжения – двигатель” при прогнозном управлении по результирующему вектору тока / П.М. Пушков, Н.В. Хворост, А.П. Турканов // Технічна електродинаміка. Тем. вип. „Силовая електроніка та енергоефективність”. –2006. –Ч. 4. – С. 45–50.
- 47 Електронні трансформатори для систем електричної тяги з живленням від контактної мережі постійного струму / М.І. Сергієнко, Ю.П. Гончаров, М.В. Панасенко, В.В. Замаруєв, М.В. Хворост [та ін.] // Вісник Східноукраїнського нац. ун-та. –2009. –№4 (134), ч. 1. – С. 183 – 188.

АНОТАЦІЯ

Хворост М.В. Розвиток наукових основ систем електричної тяги метрополітенів. – 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.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню науково – технічної проблеми – енергозбереження при експлуатації метрополітенів за рахунок вдосконалення систем електричної тяги метрополітенів.

У роботі запропоновані концепції побудови тягового електропостачання метрополітенів і тягових електроприводів вагонів на основі розподільної структури з повздовжньою високовольтною лінією постійного струму, наземними головними тяговими підстанціями глибокого вводу, розташованими по кінцям ліній метрополітену, підземних пунктів живлення тягової мережі напругою 1500 В.

Для підвищення безпеки руху поїздів розроблено схему електромашинного блоку вагонів із груповим однозонним управлінням тяговими двигунами, яка обмежує величину струмів короткого замикання двигунів при відмовах в інверторі і тим самим не допускає руйнівних ударних моментів на валах двигунів.

Проведено порівняльну оцінку трифазних і двофазних асинхронних тягових електроприводів з точки зору їх енергозбереження.

Вдосконалено методи моделювання пристроїв підсистем електричної тяги, що спрощують вирішення задач аналізу і синтезу параметрів пристроїв, а також задачі віртуальних експериментів щодо підтвердження теоретичних результатів роботи.

Ключові слова: енергозбереження, метрополітен, електрична тяга, тягова підстанція, асинхронний двигун, випрямляч, автономний інвертор напруги.

АННОТАЦИЯ

Хворост Н. В. Развитие научных основ систем электрической тяги метрополитенов. - 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.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-технической проблемы - энергосбережению при эксплуатации метрополитенов за счет совершенствования системы электрической тяги метрополитенов, учитывающая переход на распределительное тяговое электроснабжение с продольной высоковольтной линией питания постоянного тока и поезда смешанной структуры, которые формируются из вагонов с тяговыми асинхронными двигателями и безмоторными, что позволяет существенно повысить энергоэффективность и надежность системы электрической тяги метрополитенов.

Исследования структуры и режимов работы систем электрической тяги метрополитенов показали, что еще в недостаточной мере используются достижения научно-технического прогресса и внутренние резервы предприятий. Особенно это относится к проблеме энергоснабжения, поскольку расходы на оплату электроэнергии превышают 30 % в себестоимости пассажирских перевозок. В частности, тяговые подстанции имеют коэффициент полезного действия до 0,95, а коэффициент полезного действия тяговых электроприводов вагонов метро не превышает 0,80.

В работе выполнена оценка технического совершенства подсистем электрической тяги, которые являются основой повышения уровня энергосбережения. Показано, что отечественные метрополитены, которые используют систему электрической тяги напряжением 825 В с подземными тяговыми подстанциями на базе шестипульсных диодных выпрямителей и поездов с тяговыми двигателями постоянного тока нуждаются в реконструкции, а также модернизации технических средств.

Разработаны основы теории и проведено моделирование энергоэффективных двенадцатипульсных выпрямителей с вольтдобавкой – стабилизаторов напряжения для тяговых подстанций метрополитенов с продольной линией питания постоянного тока. Использование таких стабилизаторов напряжения позволяет при незначительном увеличении установленной мощности преобразовательного агрегата обеспечить стабилизацию напряжения на шинах тяговой подстанции во всем диапазоне колебаний напряжения питания при коэффициенте мощности сети питания не ниже 0,98. При этом переход на высшее выпрямленное напряжение, а именно 12 кВ, дает возможность поднять коэффициент полезного действия главных понижающих подстанций 0,955.

Разработана методика анализа тяговых мостовых автономных инверторов напряжения с узлами однородной коммутации, которые обеспечивают

„мягкую” коммутацию силовых ключей при синусоидальной широтно-импульсной модуляции исходного напряжения.

Показано, что коэффициент полезного действия автономных инверторов напряжения на IGBT-модулях с „мягкой” коммутацией при частоте широтно-импульсной модуляции 3 кГц и напряжению питания 1500 В.

На основе анализа силовой схемы преобразователя постоянного напряжения с промежуточным звеном однофазного тока повышенной частоты доработан алгоритм его функционирования, что обеспечивает „мягкую” коммутацию силовых ключей и дает возможность реализовать коэффициент полезного действия пунктов питания тяговой сети 0,955. Повышение уровня напряжения в тяговой сети до 1500 В позволяет улучшить энергетические показатели тягового электропривода.

Использование на тяговой сети метрополитенов преобразователей постоянного напряжения с промежуточным звеном однофазного переменного тока повышенной частоты позволяет осуществлять наряду с функцией трансформации постоянного напряжения без генерации реактивной мощности, двусторонний обмен электроэнергией между продольной высоковольтной линией питания и тяговой сетью.

Научно обоснована целесообразность однозонного управления тяговыми асинхронными двигателями вагона, что позволяет уменьшить массо-габаритные показатели электрооборудования тягового электропривода повышенной мощности, и уменьшить расходы электроэнергии на тягу за счет сокращения времени разгона и торможения.

Обоснована структура блока электромагнитной совместимости тягового асинхронного электропривода вагона с тяговой сетью в установившихся переходных режимах. При этом новым элементом силовой схемы блока электромагнитной совместимости в сравнении с традиционной силовой схемой есть активный фильтр последовательного типа, который обеспечивает уменьшение массы фильтрового оборудования в 3,5 раза.

Разработана методика расчета и схемные решения защиты от токов короткого замыкания тяговых асинхронных двигателей вагонов, которые при отказах в инверторе напряжения типа „пробой ключа” или несанкционированное срабатывание тиристорного короткозамыкателя решают задачу ограничения на уровне номинального пускового момента, ударных тормозных моментов на валах тяговых асинхронных двигателей.

Улучшение технико-экономических показателей подсистем электрической тяги метрополитенов возможно за счет перехода на электроснабжение с продольной высоковольтной линией постоянного тока 12 кВ, выпрямителей-стабилизаторов напряжения, питания тяговой сети повышенным напряжением 1500 В, а относительно поездов, перехода к асинхронному электроприводу повышенной мощности, с однозонной характеристикой управления.

Ключевые слова: энергосбережение, метрополитен, электрическая тяга, тяговая подстанция, асинхронный двигатель, выпрямитель, автономный инвертор напряжения.

THE SUMMARY

Hworost M.W. Development of undergrounds electric traction of system scientific bases - Manuscript.

Thesis for getting scientific degree of engineering sciences doctor on the speciality 05.22.09 -electric transport. V. Lazaryan's Dnipropetrovsk national university of railway transport, Dnipropetrovsk, 2011.

The thesis is devoted to the decision scientifically - technical problem – resource saving during maintenance of undergrounds due to development of undergrounds electric traction system.

Conceptions of undergrounds energy supply construction and power electrodrive by the basis of distributive structure with the direct-current longitudinal high-voltage line, deep enter surface main hauling substations, located by the ends of undergrounds lines, underground points of hauling network feed by voltage 1500 V are offered in the thesis.

For the increase of trains motion safety the scheme of vehicles electric machine block with a group power engines onearea management is developed, which limits the size of engines short circuit currents at refuses in a negator and shuts out destructive shock moments on the engines billows.

Comparative estimation of three-phase and diphas asynchronous power engine from their energy-savings point of view is conducted.

The methods of electric traction subsystems devices design, which simplify the decision of analysis tasks and devices parameters synthesis, and also tasks of virtual experiments for improve theoretical job performances are developed.

Keywords: energy-savings, underground, electric traction, asynchronous engine, power substation.

ХВОРОСТ Микола Васильович

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ
МЕТРОПОЛІТЕНІВ

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Підписано до друку 21 квітня 2011 р.
Формат 60x84 1/16. Папір для множильних апаратів. Різограф.
Ум. друк. арк. 2,0. Тираж 150 прим. Зам. № 72

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №1315 від 31.03.2003

Адреса університету і ділянка оперативної поліграфії:
49010, Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2
www.ditrvv.dp.ua