

ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ЦЕНТР
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ УКРАЇНИ

На правах рукопису

Хворост Микола Васильович

УДК 621.33:629.432

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ
МЕТРОПОЛІТЕНІВ**

05.22.09 – електротранспорт

Дисертація на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Науковий консультант
Панасенко Микола Васильович
доктор технічних наук,
професор

Харків – 2010

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ НА МЕТРОПОЛІТЕНАХ І ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕСУРСОСПОЖИВАННЯ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ	
1.1. Стан і ефективність системи електричної тяги метрополітенів.....	14
1.2. Напрямки розробки перспективних підсистем електричної тяги.....	19
1.2.1. Шляхи удосконалення тягового електропостачання.....	19
1.2.2. Шляхи удосконалення тягового електроприводу вагонів	24
1.3. Оцінка експлуатаційних характеристик тягових статичних перетворювачів.....	35
1.4. Основні задачі дослідження.....	56
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ ГОЛОВНИХ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ МЕТРОПОЛІТЕНІВ.....	
2.1. Аналіз схем випрямлячів для перетворювальних агрегатів головних тягових підстанцій метрополітенів: основні недоліки і переваги	60
2.2. Положення теорії дванадцятипульсних напівкерованих випрямлячів з реверсивним вольтододатком-стабілізаторів вихідної напруги.....	69
2.3. Оцінка дванадцятипульсних перетворювачів з реверсивним вольтододатком..	74
2.4. Вхідний демпфований фільтр двоопераційного вольтододатка...	82
2.5. Висновки за розділом 2	99
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ І РЕЖИМІВ РОБОТИ СТАТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ ДЛЯ ПУНКТІВ ЖИВЛЕННЯ ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ МЕТРОПОЛІТЕНІВ З ПОВЗДОВЖНЬОЮ ЛІНІЄЮ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.	
	102

3.1. Аналіз структур статичних перетворювачів постійної напруги з проміжною ланкою змінного струму для пунктів живлення тягової мережі	102
3.2. Алгоритм функціонування перетворювача постійної напруги із з покращеними комутаційними режимами роботи.....	109
3.3. Основи теорії перетворювачів постійної напруги.....	119
3.4. Висновки за розділом 3	150

РОЗДІЛ 4. СТРУКТУРА ТА РЕЖИМИ РОБОТИ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ВАГОНІВ ПІДВИЩЕНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ.....

4.1. Обґрунтування принципів керування тяговими асинхронними двигунами вагонів метрополітену	153
4.2. Оцінка нерівномірності струмозподілення тягових асинхронних двигунів вагона при їх груповому управлінні.....	159
4.3. Підвищення надійності роботи електромеханічного блоку тягового асинхронного електроприводу вагона	164
4.4. Перетворювально-регулювальні блоки тягового асинхронного електроприводу вагонів метрополітену.....	189
4.5. Схемотехнічні засоби підвищення ефективності блока електромагнітної сумісності тягового асинхронного електроприводу вагона	196
4.6. Висновки за розділом 4	208

РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА ТРИФАЗНИХ І ДВОФАЗНИХ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ВАГОНІВ ІЗ „М'ЯКОЮ” КОМУТАЦІЄЮ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ КЛЮЧІВ АВТОНОМНИХ ІНВЕРТОРІВ НАПРУГИ.

5.1. Оцінка установленної потужності вентильних комплектів трифазних і двофазних схем тягових асинхронних електроприводів...	211
--	-----

5.2. Оцінка параметрів струмів двофазного і трифазного асинхронного тягового двигуна.	217
5.3. Аналіз спектральних характеристик трифазного і двофазного автономного інвертора напруги.....	227
5.4. Оцінка втрат потужності в трифазних і двофазних інверторах напруги.....	234
5.5. Висновки за розділом 5	250

РОЗДІЛ 6. УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ПІДСИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ МЕТРОПОЛІТЕНІВ

ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ	253
6.1. Координатний $i\psi$ -базис при аналітичному моделюванні тягових асинхронних електроприводів	253
6.2. Алгоритм керування тяговими асинхронними двигунами.....	268
6.3. Аналіз системи „перетворювач – тяговий асинхронний двигун”	274
6.4. Моделі та технічні вимоги до розробки і модернізації вузлів тягового електропостачання і тягового електроприводу вагонів метрополітена	283
6.5. Висновки за розділом 6	296
ВИСНОВКИ.....	299
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	303
ДОДАТКИ.....	331
Додаток А. Програма для дослідження перехідних процесів у вольтододатковому перетворювачі.....	332
Додаток Б. Модель ОК схеми однорідної комутації.....	335
Додаток В. Програма puet1 для дослідження однорідного перетворювача	338
Додаток Г. Модель auhadaf71 для дослідження характеристик тягового асинхронного електроприводу з автономним інвертором напруги.....	342
Додаток Д. Акти впровадження результатів дослідження дисертаційної роботи	345

ВСТУП

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 високовольтних 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 напівкеруваних 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.