

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

СИЧЕНКО ВІКТОР ГРИГОРОВИЧ



УДК 621.33.024:621.318.3

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ПІДВИЩЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ
СУМІСНОСТІ ПІДСИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

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

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі “Електропостачання залізниць” Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна та в Харківській філії Державного науково-дослідного центру 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, старший науковий співробітник **Денисюк Сергій Петрович**, Національний технічний університет «Київський політехнічний університет», Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, професор кафедри електропостачання.

Захист дисертації відбудеться “___” _____ 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.

Автореферат розіслано “___” _____ 2011 р.

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



М.О. Костін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дисертації. Залізничний транспорт є однією з найважливіших галузей народного господарства України, конкретними перевагами якого є: енергоефективність, низький рівень викидів в атмосферу, безпека, ефективне використання простору, що дозволяє здійснювати перевезення з меншими витратами та більшою надійністю.

Вирішальну роль в здійсненні перевезень мають електрифіковані залізниці, довжина яких станом на 01.01.2011р. складає 9876,49 км, в тому числі 4764,51 км на постійному струмі. Розгорнута довжина контактної мережі складає 27419,5 км, в тому числі на постійному струмі 13647,51 км. На сьогоднішній день питома вага електротяги в експлуатаційній роботі складає 45,5 %, в тому числі на постійному струмі 21,9 %. В 2010 р. для здійснення перевізної роботи електрифікованими залізницями було спожито 4 833,9 млн.кВт.год., що складає 84,2% від загального споживання, в т.ч. на постійному струмі 2399 млн.кВт.год.

Питанням підвищення техніко-економічних показників роботи системи тягового електропостачання постійного струму та її енергоефективності присвячені наукові праці П.Д. Андрієнко, Б.А. Аржаннікова, М.П. Бадьора, А.Т. Буркова, В.Т. Доманського, Г.К. Гетьмана, Ю.П. Гончарова, Ю.І. Жаркова, В.В. Корнієнко, М.О. Костіна, О.В. Котельникова, Р.Р. Мамошина, О.М. Марікіна, Г.Г. Марквардта, К.Г. Марквардта, Р.І. Мірошніченко, О.М. Митрофанова, В.І. Омеляненко, В.М. Пупиніна, С.М. Сердінова, С.Д. Соколова, Є.П. Фігурнова, М.Г. Шалімова, Я.В. Щербака та інших вчених.

Ефективність роботи тягового електропостачання також визначається станом інфраструктури передачі енергії електроприймачам (електрорухомий склад та не тягові споживачі). Сьогодення тягового електропостачання обумовлене “стрімким” моральним та фізичним старінням інфраструктури: контактної мережі та тягових підстанцій. Експлуатаційна довжина електрифікованих колій, які знаходяться в експлуатації понад 40 років за останні 10 років збільшилась в 20 раз і складає майже 50 % від їх загальної довжини. Питома пошкоджуваність контактної мережі на 100 км розгорнутої довжини з кожним роком росте. Такі ж негативні тенденції можна відзначити і стосовно обладнання тягових підстанцій та ліній електропостачання (автоблокування та повздовжнього електропостачання). Головним управлінням електрифікації та електропостачання, службами електропостачання виконуються значні обсяги робіт для модернізації, капітального ремонту та заміни обладнання інфраструктури тягового електропостачання, але обсяг інвестицій в цьому напрямку повинен бути значно більшим. Значно посилити тягове електропостачання може впровадження новітніх технологій та сучасного обладнання.

Вирішення цієї проблеми повинне базуватися на проведенні переоснащення господарства електропостачання та його модернізації, створення програми оновлення та технічного розвитку, розробці концептуальних рішень з підвищення енергоефективності та електромагнітної сумісності.

Успішне вирішення науково-технічних проблем при впровадженні і експлуатації електрифікованих ліній постійного струму, в тому числі і підвищеної

напруги, неможливе без вирішення проблеми електромагнітної сумісності (ЕМС) з суміжними низькоенергетичними системами залізничного транспорту та з системами зовнішнього електропостачання (СЗЕ), а також окремими пристроями між собою. Забезпечення необхідного рівня ЕМС системи тягового електропостачання постійного струму (СТЕ) повинне здійснюватись застосуванням необхідних технічно можливих заходів при розробці та виготовленні обладнання і комплектуючих виробів, проектуванні та побудові СТЕ на базі обґрунтованого вибору її конфігурації і параметрів та раціональних схем підключення до системи зовнішнього електропостачання. Розглядаючи ЕМС, як один із показників якості функціонування СТЕ, необхідно охоплювати весь комплекс технічних засобів, котрі задіяні в процесі передачі та споживання електроенергії. Зважаючи на широке впровадження на залізничному транспорті різноманітних мікропроцесорних пристроїв автоматики і телемеханіки, релейного захисту, кодування і передачі інформації, вирішення проблеми ЕМС набуває вирішального значення для забезпечення безперебійного та надійного функціонування залізничного транспорту.

При вирішенні проблеми ЕМС електрифікованої залізниці постійного струму з суміжними низькоенергетичними системами необхідно враховувати, що СТЕ представляє собою складну електродинамічну розподілену систему, яка характеризується стохастичним характером параметрів функціонування, які змінюються у просторі, площині і часі, змінюючи електромагнітну обстановку у системі СТЕ-суміжні пристрої (лінії зв'язку, інформаційні канали передачі даних, канали телеуправління та телесигналізації, рейкові кола і таке інше). Основою цього впливу є розповсюдження кондуктивних завад через різноманітні гальванічні зв'язки.

Основними пристроями енергетичних каналів СТЕ є тягові перетворювачі. Їх застосування, як відомо, викликає низку негативних факторів: споживання реактивної енергії, спотворення первинних струму та напруги, генерація вищих гармонічних складових. Наявність потужних нелінійних навантажень негативно впливає на якість електричної енергії, як в лініях зовнішнього електропостачання мережі, так і в тяговій мережі, що, в свою чергу, призводить до додаткових втрат електричної енергії та зниження терміну експлуатації електричних апаратів швидкісного руху та розвиток транспортних коридорів, впровадження сучасних технологій та обладнання, в тому числі нових типів електрорухомого складу, призводить до збільшення споживання електричної енергії, а, значить, і до збільшення споживання реактивної енергії, збільшення втрат активної енергії та погіршення гармонічного складу струмів і напруг, як на стороні змінного, так і постійного струму. В умовах масового застосування інформаційних технологій та насичення інфраструктури залізничного транспорту низькоенергетичними засобами керування та моніторингу, необхідності забезпечення високого рівня енергоефективності підвищення електромагнітної сумісності підсистем електричної тяги постійного струму є вельми актуальною науковою проблемою для залізничного транспорту України.

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

- Постанови Кабінету Міністрів України від 23.04.1999 р. № 661 «Про заходи державної підтримки залізничного транспорту»;
- Програми енергозбереження на залізничному транспорті України на період 1996-2010 роки, схваленою рішенням науково-технічної ради Укрзалізниці від 26.06.1996 р.;
- Концепцією будівництва та оновлення тягових підстанцій», затвердженою Головним управлінням електрифікації та електропостачання;
- «Дослідження та визначення заважаючих та небезпечних діючих значень електричних та електромагнітних завад від тягового рухомого складу на роботу рейкових кіл та АЛСН» (№ ДР 0104U010703); «Розробка концепції енергетичної стратегії Укрзалізниці на період до 2010 р. та на перспективу до 2020 року» (№ ДР 0106U005700); «Підвищення надійності пристроїв контактної мережі електрифікованих залізниць» (№ ДР 0107U002523); «Дослідження показників якості електроенергії на вводах і фідерах тягових підстанцій постійного струму та розробка рекомендацій» (№ ДР 0107U010377); «Дослідження стану зовнішньої ізоляції на контактній мережі залізниць та розробка методики по визначенню залишкового робочого ресурсу ізоляторів на контактній мережі залізниць» (№ ДР 0107U010375); «Дослідження захисту контактної мережі із застосуванням ОПН та розробка рекомендацій щодо їх розрахунку та підбору » (№ ДР 0108U006571); «Перегляд нормативної документації «Інструкція по заземленню пристроїв електропостачання на електрифікованих залізницях» (№ ДР 0108U010670); «Дослідження характеристик струмознімання та розробка рекомендацій щодо застосовуваних матеріалів в умовах швидкісного та прискореного руху» (№ ДР 0108U003064), яка виконувалась за держзамовленням; «Удосконалення електромагнітної сумісності систем тягового електропостачання постійного струму з суміжними пристроями» (№ ДР 0109U002983); «Розробка технічних вимог до перетворювальних агрегатів на базі дванадцятипульсних напівкерованих випрямлячів з реверсивним вольтододатком для тягових підстанцій постійного струму зі стабілізованою напругою і безконтактним захистом при коротких замиканнях у тяговій мережі» (№ ДР 0210U006360); «Розроблення технічної документації на дослідний зразок дванадцятипульсового перетворювального агрегату з реверсним вольтододатком і безконтактним захистом від короткого замикання для тягових підстанцій постійного струму» (№ ДР 0210U006359); «Дослідження та визначення уставок мікропроцесорного релейного захисту для тягових мереж постійного струму» (№ ДР 0109U009014); «Проведення досліджень та обґрунтування можливості застосування швидкодіючих вимикачів нового покоління» (№ ДР 0109U009015); «Аналіз показників якості електроенергії на тягових підстанціях постійного струму Донецької залізниці і розробка рекомендацій по їх поліпшенню» (№ ДР 0107U010377).

Мета і задачі дослідження. Метою цієї дисертаційної роботи є підвищення енергоефективності системи електричної тяги на основі розвитку теоретичних основ підвищення електромагнітної сумісності пристроїв і підсистем електрифікованих ділянок магістрального залізничного транспорту. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні першочергові завдання.

1. Здійснити аналіз технічного стану системи тягового електропостачання та визначення основних впливаючих факторів;
2. Розробити методологію проведення експериментальних досліджень електромагнітної суміжності та показників якості електроживлення у різних режимах роботи СТЕ;
3. Провести аналіз та обробку результатів експериментальних досліджень;
4. Розробити математичні моделі електромагнітних завад у підсистемах постійного та змінного струму СТЕ;
5. Розробити математичні моделі складових енергетичних каналів СТЕ;
6. Розробити математичні моделі електромагнітних процесів СТЕ;
7. Удосконалити та систематизувати показники якості електроживлення;
8. Розробити теоретичні основи удосконалення пристроїв інфраструктури СТЕ, в тому числі електрорухомого складу;
9. Визначити напрямки впровадження сучасних засобів силової електроніки у СТЕ для підвищення ЕМС;
10. Виконати техніко-економічне обґрунтування розроблених рекомендацій.

Об'єкт дослідження – електромагнітні процеси передачі, споживання та перетворення електричної енергії у підсистемах тягового електропостачання.

Предмет дослідження – підсистеми електричної тяги постійного струму залізничного транспорту.

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, аналізу літературних та електронних джерел інформації й узагальнення раніше виконаних досліджень в галузі електромагнітної сумісності; методи та положення теорії розрахунку перетворювачів; принципи моделювання електромеханічних систем; методи техніко-економічного аналізу; положення та методи теорії розрахунку електромагнітних процесів у нелінійних колах; положення та методи теорії ймовірностей та математичної статистики.

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

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

- експериментальні дослідження коректно поставлено та кваліфіковано виконано, а розбіжність теоретичних розрахунків і дослідних даних не перевищує загальноприйнятих значень;

- теоретичні розрахунки виконано на ПЕОМ з похибкою $\sim 10^{-6}$, а дослідні результати одержано на основі великого обсягу реального фактичного матеріалу з подальшою обробкою методами математичної статистики.

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

1. Запропоновано нові теоретичні засади в напрямку розробки ідеологій і засобів підвищення ефективності системи тягового електропостачання постійного струму шляхом переходу на підвищений рівень напруги в тяговій мережі, розподілену

систему тягового живлення з повздовжньою високовольтною лінією з використанням на тягових підстанціях нових перетворювальних агрегатів вольтододадового типу, а також комбінованої активної фільтрації гармонік у підсистемах тягового електропостачання. Це дозволило суттєво підвищити «внутрішню» електромагнітну сумісність, тобто між підсистемами електричної тяги.

2. Вперше комплексом докладних досліджень встановлено показники якості електроживлення, числові імовірісно-статистичні характеристики та гармонійний склад напруг і струмів в первинних електричних мережах 110, 35 і 10 кВ, а також на шинах 3,3 кВ різних тягових підстанцій з 6-ти і 12-пульсовими схемами випрямлення, що дозволило більш точно проаналізувати якість енергопроцесів в підсистемах живлення електричної тяги з урахуванням їх взаємодії між собою та з лініями СЦБ.

3. Розроблено математичні моделі та методологічні підходи опису електромагнітних завад в підсистемах змінного та постійного струму, формування яких відрізняється від існуючих використанням нової шкали зміни напруги на шинах тягових підстанцій та показника співвідношення гармонік з урахуванням характеру його зміни в залежності від схеми випрямлення та якості протікання енергообмінних процесів, що дозволило більш точно оцінити рівень електромагнітних завад, зокрема встановити, що найбільший їх рівень спостерігається при відносно низьких навантаженнях, джерелом цих завад є електромагнітні процеси у підсистемах електричної тяги.

4. Отримало подальший розвиток описання закономірностей виникнення та обґрунтовано природу електромагнітних завад в зовнішній системі живлення та в тяговій підсистемі постійного струму, що дало змогу розробити ефективні заходи поліпшення електромагнітної сумісності існуючих та перспективних систем живлення.

5. Вперше отримано закономірності впливу параметрів, стохастичного характеру режимів роботи, а, отже, напруг і струмів, системи зовнішнього електропостачання на взаємний зв'язок електромагнітних процесів передачі, перетворення та споживання електричної енергії в існуючих тягових мережах постійного струму, що дало змогу більш точно оцінити енергобаланс і рівень електромагнітних завад в системі живлення.

6. Науково обґрунтовано принципи і встановлено вимоги побудови перспективної, що задовольняє необхідні рівні електромагнітної сумісності, системи тягового електропостачання, застосовуваної для живлення електрифікованих ділянок залізниць з швидкісним рухом поїздів.

Отримані результати по підвищенню електромагнітної сумісності системи електричної тяги постійного струму у сукупності мають суттєве значення в області електричного транспорту та його електропостачання.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

1. Запропоновані і застосовані при використанні імовірісно-статистичного та гармонічного аналізів стохастичних напруг і струмів методи і методики дозволяють реально оцінювати показники якості електроенергії, які є і рівнями електромагнітної сумісності, в лініях зовнішнього і тягового електропостачання.

2. Створені математичні моделі опису електромагнітних завад та розроблені алгоритми і програми придатні для аналізу процесів виникнення завад і оцінки рівня електромагнітної сумісності різних підсистем системи електричної тяги як постійного, так і змінного струмів.
3. Запропоновані концептуальні засади побудови підсистем з високим рівнем електромагнітної сумісності дають змогу створювати перспективні енергоефективні системи живлення електричної тяги, у тому числі і для ділянок з швидкісним рухом поїздів.
4. Розроблені структурні схеми перетворювального агрегату вольтододаточного типу, електромагнітних випрямлячів комбінованої ідеології, а також активних гібридних фільтрів можуть бути базовими при модернізації тягових підстанцій усіх електрифікованих ділянок залізниць постійного струму, що дозволить підвищити енергоефективність електрифікованих залізниць, зменшити експлуатаційні витрати та втрати електричної енергії у системі тягового електропостачання і забезпечити електромагнітну сумісність підсистем електричної тяги постійного струму, тобто підвищити безпеку руху поїздів та надійність роботи електрифікованого залізничного транспорту.
5. Результати досліджень впроваджено у Головному управлінні електрифікації та електропостачання, службах електропостачання Донецької, Львівської та Південної залізниць, НДІ Перетворювач.
6. Основні теоретичні положення використовуються у навчальному процесі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна для студентів четвертого курсу спеціальності 7.05070204 «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» та для студентів п'ятого курсу спеціальності 7.090603 «Електротехнічні системи електроспоживання».

Особистий внесок здобувача. Автор разом з науковим консультантом сформулював мету, задачі досліджень. Основні наукові положення, результати теоретичних та експериментальних досліджень дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У публікаціях в яких відображено основні результати дисертації та які написані у співавторстві, здобувачу належать: [1, 2] – запропоновано схемну реалізацію пристроїв для зниження пульсацій живлячої напруги, [3] – ідея роботи, проведення розрахунків та визначення напрямків досліджень, [4] – ідея роботи, розробка методу діагностування згладжуючого фільтру, [5] – ідея роботи, розробка методу діагностування згладжуючого фільтру та способу його реалізації, [7] – порівняльний аналіз методів випробувань, [8] – проведення досліджень, визначення основних показників, [9...10] – ідея робіт, [11] – схема виконання закінцьовувача, [12] – ідея та розробка напрямків роботи, [13] – ідея роботи, розробка структури активного фільтру, [14] – обґрунтування форми вставки, [15] – проведення розрахунків, ідея роботи, [16] – ідея роботи, [17] – постановка мети і задач дослідження, обґрунтування заходів підвищення корозійної стійкості залізобетонних опор, аналіз та обговорення результатів, [18] – обґрунтування функціональної можливості фільтрації гармонік, [19] – постановка задачі, проведення та аналіз результатів дослідження, [20] – розробка методики, [21] – керівництво експериментальними дослідженнями, постановка мети і задач

дослідження, аналіз та обговорення результатів, [22] – керівництво експериментальними дослідженнями, постановка мети і задач дослідження, аналіз та обговорення результатів, [23...24] – ідея роботи, схемні рішення, [25] – ідея роботи, схемні рішення, [26] – проведення розрахунків, [27] – аналіз та обговорення результатів, [28] – ідея роботи, проведення розрахунків, [29] – ідея роботи, постановка мети і задач дослідження, аналіз та обговорення результатів, [30] – постановка мети і задач дослідження, [31] – ідея роботи, [32] – пропозиції по удосконаленню захисту опор, [34] – загальне редагування, розділи 6-8 написані самостійно, [35] – ідея роботи, структурна схема перетворювача, [37] – ідея роботи, обґрунтування можливості дискретної фільтрації, [38] – ідея роботи, постановка мети і задач дослідження, [39] – ідея роботи, схемна реалізація принципів активної фільтрації, [40] – ідея роботи, теоретичні положення та їх реалізація, [42] – розробка методології та проведення розрахунків, [43] – ідея роботи, теоретичні положення та їх реалізація. Роботи [7, 33, 36, 41, 44] написані автором самостійно.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на: 2-й Науково-практичній конференції “Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем: техніка, технологія, економіка і управління”, м. Київ, 2004 р.; 5-й Науково-практичній конференції “Безпека руху поїздів”, м. Москва, 2004 р.; 4-й Міжнародній науково-практичній конференції “Якість, стандартизація, контроль: Теорія і практика”, м. Ялта, 2004 р.; 1, 2-й Міжнародній науково-практичній конференції “Підтвердження відповідності на залізничному транспорті: передовий досвід і напрямки розвитку”, м. Алушта, 2005 р.; м. Ялта, 2006 р.; 5, 7-ому Міжнародному симпозиумі по електромагнітній сумісності і електромагнітній екології, м. Санкт-Петербург, 2005, 2007 р.р.; 12-й Міжнародній конференції “Ресурсоенергозбереження у ринкових відносинах”, м. Київ, 2005 р.; 3-ому Міжнародному симпозиумі ELTRANS-2005 “Електрифікація і розвиток енергозберігаючої інфраструктури і електрорухомого складу на залізничному транспорті”. м. Санкт-Петербург – 2005; 66, 67, 70-й Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту”, м. Дніпропетровськ, 2006, 2007, 2010 р.р.; 2-й Науково-практичній міжнародній конференції “Впровадження наукоємних технологій на магістральному і промисловому залізничному транспорті”, м. Алушта, 2006 р.; Науково-технічній конференції “Наука, інновації, освіта: Актуальні проблеми розвитку транспортного комплексу Росії”, Єкатеринбург, 2006 р.; 1-й Міжнародній науково-практичній конференції “Технічне регулювання на залізничному транспорті”, м. Ялта, 2007 р.; 1, 2, 3, 4-й Міжнародній науково-практичній конференції “Електрифікація залізничного транспорту ТРАНСЕЛЕКТРО”, м. Ялта, 2007, 2008, 2009, 2010 р.р.; 2, 3, 4-й Міжнародній науково-практичній конференції “Електромагнітна сумісність і безпека на залізничному транспорті”, м. Дніпропетровськ, 2009, 2010, 2011 р.р.; 16, 17-й Міжнародній науково-технічній конференції “Силова електроніка та енергоефективність”, м. Алушта, 2009, 2010 р.р.; Міжнародній науково-практичній конференції “Проблеми і перспективи розвитку транспортного комплексу: освіта, наука, виробництво”, м. Ростов-на-Дону, 2009 р.; 2-й Міжнародній науково-технічній конференції “Інтелектуальні енергетичні системи – ІЕС (ESS’11)”, м. Свалява, 2011 р.;

У повному обсязі дисертація доповідалась на:

- семінарі наукової ради “Наукові основи електроенергетики” НАН України секції “Фізико-технічні проблеми енергетики електричного та дизель-електричного” підсекції “Тягово-енергетичні аспекти підвищення ефективності систем електричної тяги постійного і змінного струму” у Харківській філії Державного науково-дослідного центру Укрзалізниці, лютий, 2010 р.;
- міжкафедральному семінарі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, червень, 2011 р.;
- науково-технічній раді Харківської філії Державного підприємства “Державний науково-дослідний центр залізничного транспорту України”, вересень, 2011 р.

Публікації. Результати дисертаційного дослідження опубліковані у 36 наукових статтях (з 34 – у фахових виданнях), одній монографії та 7 авторських свідоцтвах СРСР та патентах України на корисну модель.

Структура роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаної літератури та трьох додатків. Основний текст дисертації викладено на 347 сторінках. Дисертація містить 275 рисунків і 45 таблиць; таблиці та рисунки, розташовані на окремих сторінках, займають 29 сторінок. Список використаної літератури з 284 найменувань наведено на 27 сторінках.

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 особистий внесок здобувача та апробацію результатів дисертації.

У першому розділі розкрито проблему електромагнітної сумісності системи електричної тяги постійного струму (СТЕ) та її складових: тягових підстанцій, тягової та рейкової мережі, електрорухомого складу, наведено аналіз аспектів її забезпечення у цих підсистемах електричної тяги, розглянуто існуючі показники електромагнітної сумісності у підсистемах СТЕ та приведено основні напрямки вирішення проблеми.

Показано, що електромагнітну сумісність підсистем електричної тяги необхідно розглядати у широкому аспекті, а саме, як з боку виключення негативного впливу підсистем електричної тяги (тягового електропостачання та електрорухомого складу) на пристрої залізничної автоматики, зв'язку та інші суміжні пристрої, так і з боку виключення негативного впливу на якість електроенергії, що споживається та негативного впливу однієї підсистеми електричної тяги на іншу, а також на систему зовнішнього електропостачання. При аналізі ЕМС пари СТЕ-суміжні пристрої необхідно розглядати два напрямки її забезпечення: зовнішня та внутрішня ЕМС СТЕ (рис. 1). В свою чергу, наприклад, при розгляді взаємодії інтервального керування рухом поїздів зі СТЕ тягова підстанція (ТП) буде виступати по відношенню до неї зовнішньою системою. Звідси, можна вести мову про багаторівневий та ієрархічний принципи побудови забезпечення ЕМС СТЕ, де

необхідно виділяти також і горизонтальні рівні (паралельні, послідовно-паралельні та послідовні структури взаємодії).



Рис. 1 – Рівні забезпечення електромагнітної сумісності тягового електропостачання.

ЕМС І рівня обумовлена ступенем електромагнітної взаємодії СЗЕ та СТЕ і характеризується, в першу чергу, якістю електричної енергії на вхідних шинах тягової підстанції (ТП). Несиметрична та несинусоїдальна напруга, підведена до затисків тягового перетворювача, призводить до генерації в живлячу мережу вищих гармонік струму, на рівень яких також впливають спорадичні зміни тягового навантаження та флуктуації параметрів управління випрямлячем. Звідси, і СЗЕ, і ТП виступають одночасно як генераторами, так і рецепторами електромагнітних завад (ЕМЗ).

Розглядаючи внутрішню ЕМС СТЕ (2...n рівні), прийнемо до уваги, що система ІІ рівня складається з декількох підсистем різних енергетичних рівнів, розподілених у просторі та по довжині фідерної зони, а їх взаємодія змінюється у часі. Звідси, можна стверджувати про наявність поперечної та поздовжньої складових ЕМС у СТЕ. Кожна з підсистем 1...m може складатися зі статичних та динамічних елементів, мати різні механізми зв'язку, виступати як генераторами, так і рецепторами ЕМЗ різних типів у різному частотному діапазоні. У кожній з підсистем можуть застосовуватись різні засоби забезпечення ЕМС.

Узагальнена структура проблеми ЕМС у СТЕ представлена на рис. 2. Його аналіз дає уяву про складність взаємодії складових ЕМС СТЕ. В умовах експлуатації СТЕ чинники ЕМС підсистем переплітаються та частково дублюють один одного, відрізняючись джерелами, механізмами зв'язку та типами електромагнітних завад.

Таким чином, можна відзначити наступне:

- проблема ЕМС СТЕ має складний, багаторівневий характер як поперечному перерізі, так і в поздовжньому плані;
- аналіз ЕМС СТЕ необхідно здійснювати з урахуванням типових ЕМЗ для кожної з підсистем, застосовуючи до них різні методи розрахунку;
- необхідний рівень ЕМС СТЕ повинен забезпечуватись у кожній з підсистем різного енергетичного рівня.

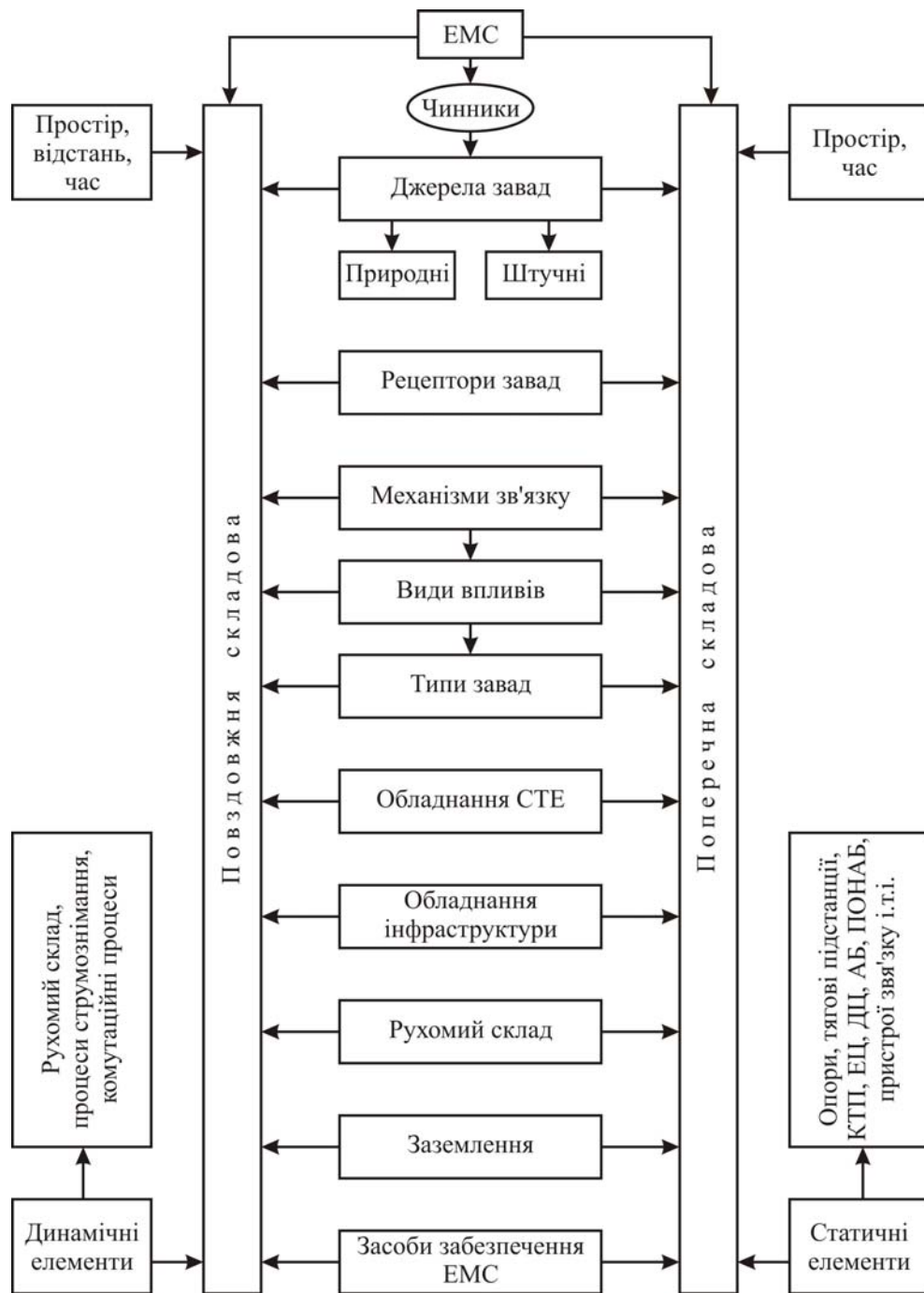


Рис. 2 – Узагальнена структура проблеми ЕМС у тяговому електропостачанні.

У другому розділі наведено результати експериментальних досліджень існуючого стану якості електричної енергії та рівнів електромагнітної сумісності на приєднаннях тягових підстанцій електрифікованих залізниць постійного струму.

Встановлено, що в первинній мережі 110 кВ, від якої отримують живлення тягові підстанції, рівень напруги вищий за номінальну напругу, і у, більшості випадків, виходить за межі гранично допустимого значення. Рівень напруги в районній мережі 35 кВ тягових підстанцій не відповідає встановленим нормам, які регламентуються ГОСТ 13109-97, оскільки для жодної підстанції усталене відхилення напруги не набуває значення менше 5 %. Рівень напруги на шинах 10 кВ, від яких живляться тягові трансформатори, також перевищує номінальне значення,

але на рівні, в основному, нормально допустимого значення відхилення. Несиметрія напруги, як на шинах 110 кВ, так і на шинах 35-10 кВ, знаходиться в припустимих межах. Числові характеристики несиметрії напруги показують практичну однаковість характеристик положення розподілу, оскільки математичне очікування, мода та медіана практично дорівнюють одне одному. Якість електроенергії за показником спотворення синусоїдальності кривої напруги на шинах 10 кВ тягових підстанцій з 6-пульсовими випрямлячами не відповідає вимогам стандарту. Числові характеристики положення розподілу мало відрізняються між собою для кожної дослідної підстанції, тобто емпіричний розподіл K_U має симетричні властивості, що також характерно і для раніше розглянутих показників.

Від шин 10 кВ тягових підстанцій постійного струму, окрім перетворювачів, отримують живлення також пристрої залізничної автоматики (АБ). В процесі дослідження проводився аналіз діаграм розкиду K_U та K_{2U} в залежності від зміни тягового навантаження та напруги на шинах 3,3 кВ. Було встановлено, що коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності на шинах 10 кВ (ПЕ і АБ) фактично не залежить від зміни напруги та струму сторони постійного струму, як на підстанції з 6-пульсовою схемою випрямлення, так і на підстанції з 12-пульсовою схемою випрямлення. Коефіцієнт спотворення синусоїдності напруги для підстанції з 12-пульсовою схемою випрямлення має близьку до одиниці від'ємну нелінійну кореляцію зі зміною напруги та позитивну нелінійну кореляцію зі зміною струму тягового навантаження. В той же час для підстанції з 6-пульсовою схемою випрямлення залежність досить низька: від зміни напруги – для ПЕ $R_{x,y}=0,109$, для АБ $R_{x,y}=0,176$; від зміни струму – для ПЕ $R_{x,y}=-0,071$, для АБ $R_{x,y}=-0,04$.

Описані вище результати досліджень відносяться до нормальних умов експлуатації тягової мережі. При комутаційних процесах в тяговій мережі на шинах 10 кВ виникають короточасні перехідні процеси, які викликають появу широкого спектру ВГ.

Таким чином, в результаті проведених комплексних досліджень якості електричної енергії на шинах 10 кВ (приєднань ПЕ і АБ) тягових підстанцій постійного струму встановлено наступне:

- рівень напруги на шинах 10 кВ (ПЕ і АБ) знаходиться в припустимих межах згідно до вимог ГОСТ 13109-97. При цьому в лінії АБ зафіксовані значні короточасні викиди напруги, тому необхідно розробляти заходи захисту від перенапруг. Розподіли напруг мають двомодальний характер, що можна пояснити зміною режимів роботи системи зовнішнього електропостачання (день – збільшення навантаження енергосистеми, ніч – його зниження).
- коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності в лініях АБ значно вищий (більше ніж в 3 рази) у порівнянні з лініями ПЕ, що спонукає ставити питання необхідності симетрування напруг у лініях АБ.
- коефіцієнт спотворення синусоїдності напруги в лінії АБ на тяговій підстанції з 12-пульсовою схемою випрямлення значно перевищує гранично допустиме значення та майже вдвічі більший за K_U в лінії ПЕ. При цьому K_U і на тяговій підстанції з 6-пульсовою схемою випрямлення більший в порівнянні з лінією ПЕ. Таким чином, існуюча ідеологія живлення лінії АБ з застосуванням подвійної трансформації, виконуючи завдання обмеження струмів короткого замикання та гальванічної

розв'язки, по суті різко погіршує якість електричної енергії, що формує умови погіршення електромагнітної сумісності.

Режим напруги на шинах 3,3 кВ тягової підстанції впливає на експлуатаційні характеристики функціонування електрифікованих залізниць. При цьому різкозмінний характер напруги призводить до умовності застосування нормованих рівнів напруги. Вибіркові результати експериментальних досліджень зміни коливань напруги на шинах тягових підстанцій приведені на рис. 3., а статистичні характеристики у табл. 1.

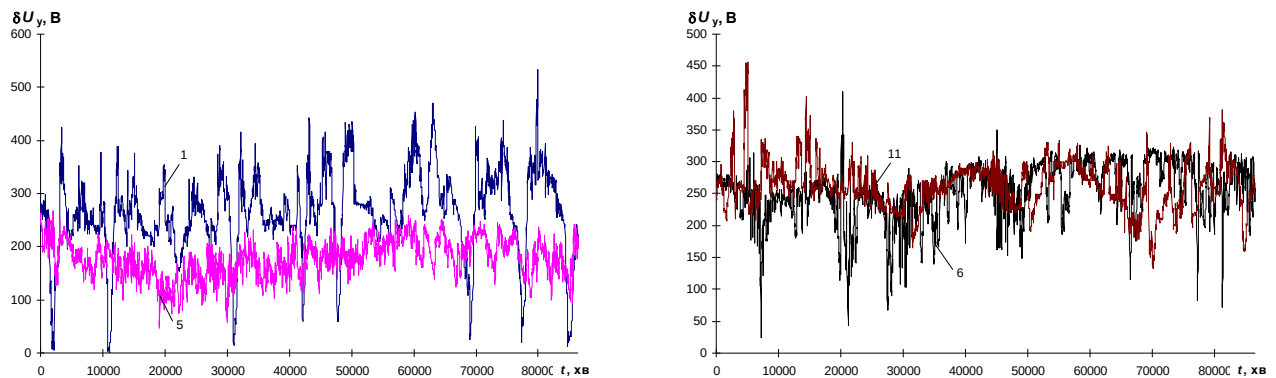


Рис. 3 – Коливання напруги на шинах 3,3 кВ тягових підстанцій

Таблиця 1.

Числові характеристики коливань напруги на шинах 3,3 кВ

№ пор.	Параметр	Номер підстанції			
		1	5	6	11
1	Математичне очікування $M(\delta U_y), \% / В$	$\frac{7,98}{263,38}$	$\frac{5,41}{178,52}$	$\frac{7,71}{254,28}$	$\frac{7,93}{261,82}$
2	Мода $Mo(\delta U_y), \% / В$	$\frac{8,48}{280,00}$	$\frac{5,47}{192,36}$	$\frac{9,23}{304,48}$	$\frac{7,88}{260,00}$
3	Медіана $Me(\delta U_y), \% / В$	$\frac{8,06}{266,00}$	$\frac{5,47}{180,41}$	$\frac{7,83}{258,25}$	$\frac{7,91}{261,00}$
4	Дисперсія $D(\delta U_y), \%^2 / В^2$	$\frac{5,68}{6180,27}$	$\frac{1,09}{1185,08}$	$\frac{1,70}{1850,87}$	$\frac{1,25}{1361,69}$
5	Середньоквадратичне відхилення $\sigma(\delta U_y), \% / В$	$\frac{2,38}{78,61}$	$\frac{1,04}{34,42}$	$\frac{1,30}{43,02}$	$\frac{1,12}{36,90}$
6	Асиметрія $As(\delta U_y)$	-0,74	-0,33	-1,09	0,21
7	Ексцес $Ex(\delta U_y)$	1,40	-0,17	1,92	1,82

Різкі зміни напруги на шинах відповідають або моментам зміни режимів роботи підстанції: інверторний режим – стрибок вгору, випрямний режим – стрибок вниз, або зміні тягового навантаження.

Числові характеристики положення розподілу ΔU та U мало відрізняються між собою для кожної дослідної підстанції, тобто їх емпіричні розподіли мають симетричні властивості (рис. 4.). Пряма спроба отримати аналітичний вираз закону

розподілу напруги для всього інтервалу як для випадкової величини виходить неуспішною.

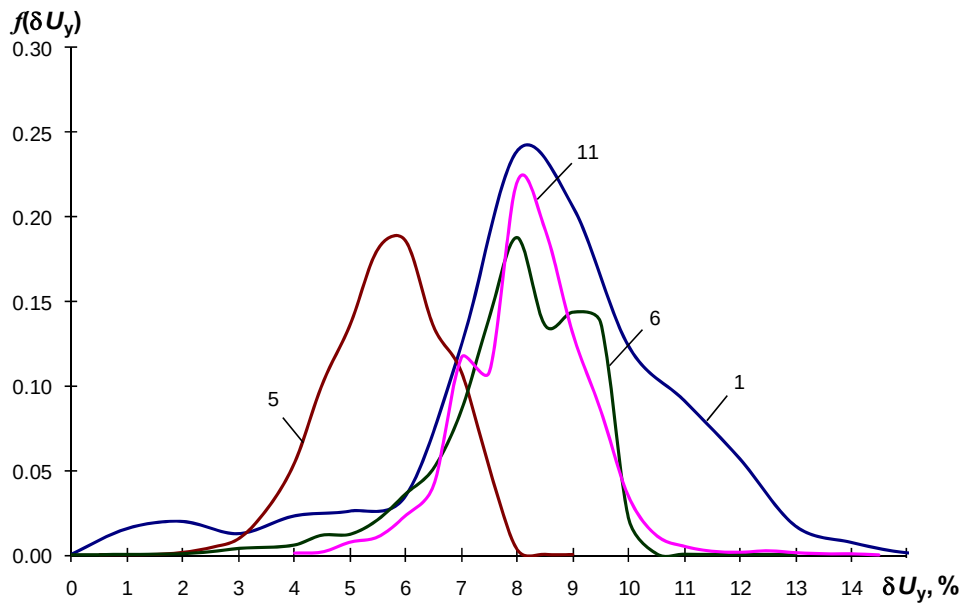


Рис. 4 – Емпіричні розподіли відхилень напруги на шинах 3,3 кВ підстанцій.

Якщо проаналізувати корелограму напруги на шинах 3,3 кВ підстанції, то бачимо що вона містить явно виражені періодичні складові, а значить і у вихідному сигналі містяться не випадкові періодичні складові. За допомогою аналізу Фур'є встановлено, що максимальними в діапазоні до 1 Гц, в першу чергу, є складові з періодами 24, 12, 8 та 4 години.

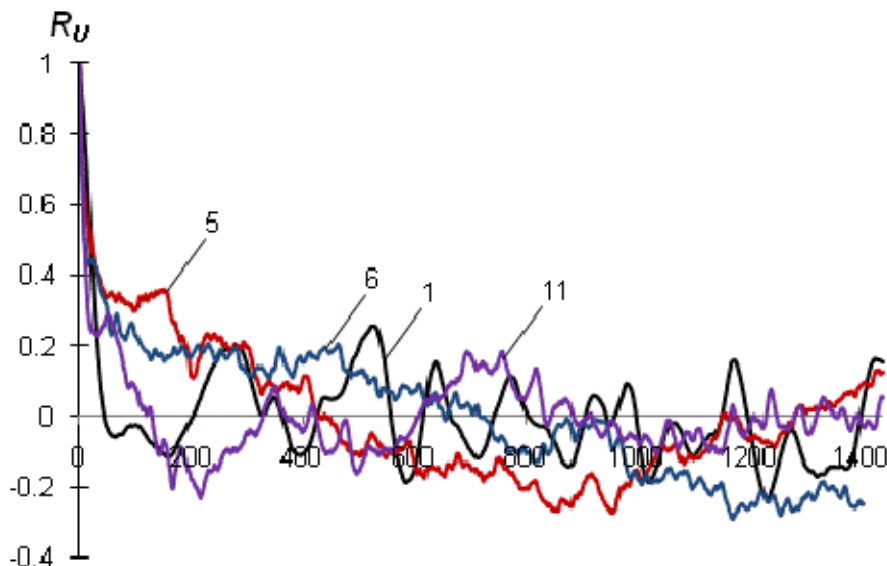


Рис. 5 – Криві автокореляційних функцій напруги на шинах 3,3 кВ різних підстанцій.

Аналіз експериментальних даних показує, що спектральний склад випрямленої напруги на шинах 3,3 кВ тягових підстанцій містить широкий спектр гармонійних складових, в тому числі канонічних і неканонічних гармонік. При цьому фактично неможливо встановити зв'язок між зміною режимів роботи обладнання тягової підстанції та спектрами.

Також встановлено, що при малому рівні навантаження рівні вищих гармонік (ВГ) напруги на струмоприймачеві мають більші значення, чим при роботі електровоза в режимі, близькому до номінального. Розподіл ВГ по амплітуді має різний характер по довжині експериментальної ділянки.

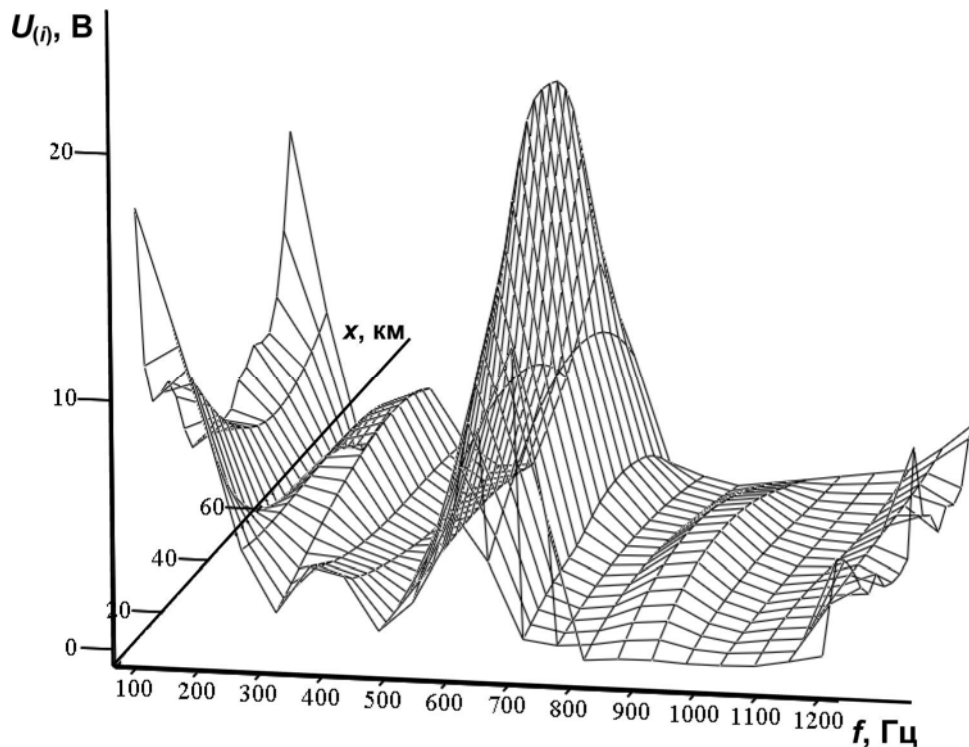


Рис. 6 – Залежність зміни гармонійних складових напруги тяговій мережі.

Для дослідження електромагнітних процесів, які відбуваються в рейкових колах, проводили вимірювання на перевальній ділянці Львівської залізниці. Вибір цієї ділянки був обумовлений значним споживанням тягового струму при русі поїзда на підйом, що відповідає умовам швидкісного руху. Отримано, що при проході поїзда (в режимі тяги на під'йом) досліджуваної блок-ділянки струм завади на несучій частоті підвищується до 2 А і більше, що згідно з нормативними документами перевищує допустимий рівень. При цьому також і коефіцієнт асиметрії струмів рейкової мережі значно перевищує нормоване ($5 \div 6$ %) значення.

В процесі проведення експериментальних досліджень оцінювалась якість роботи існуючих пасивних згладжуючих фільтрів (ЗФ). На сьогоднішній день на ТП постійного струму контроль якості функціонування ЗФ фактично відсутній. Для оцінки енергетичної ефективності функціонування ЗФ в різних режимах було виконано розрахунок потужності спектру $S_{3\Phi}$. Результати розрахунку приведені в таблиці 2.

Таблиця 2.

Результати розрахунку потужності спектру

№ досліду	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$S_{3\Phi}, \text{кВт} \cdot 10^{-3}$	785	1088	2187	3318	651	214	226	223	446	531	335	463	2	2	17	16

Аналізуючи отримані результати можна вказати на наступне.

1. Гармонійний спектр струму ВФ залежить не тільки від схеми випрямлення, схеми і режиму роботи ЗФ (що відомо), а й від режиму напруги (і, певно, роботи і виду навантаження) живлячої енергосистеми, в тому числі залежно від регіону.
2. Неможливо встановити кореляційний зв'язок між впливом режиму роботи ТП (випрямлення або інвертування) на коефіцієнт несиметрії живлячої напруги, в тому числі при увімкненому або відімкненому ЗФ (західний регіон). При цьому при погашенні ТП (вимушений режим) K_U зменшується більш ніж в 2 рази.
3. При відімкненому ЗФ (східний регіон) K_U зростає в середньому більш ніж в 1,5 рази при шестипульсовій схемі випрямлення і в 1,5 – 2,5 рази (а по окремим фазам і більше 3) при 12 – пульсовій схемі.
4. Потужність спектру при інверторному режимі роботи ТП більша, ніж при випрямному режимі, як при ввімкненому так і вимкненому ЗФ (західний регіон).
5. Потужність спектру при ввімкненому ЗФ більша (!), ніж при вимкненому при 6 – пульсовій схемі і менша на порядок при ввімкненому ЗФ у порівнянні з вимкненим ЗФ при 12 – пульсовій схемі.
6. Потужність спектру при 12 – пульсовій схемі більш ніж в 200 разів менша чим при 6 – пульсовій (східний регіон) і більш ніж в 400 разів менша при 6 – пульсовій схемі (західний регіон).

Таким чином, результати експериментальних досліджень вказують на неоднозначність взаємозв'язку режимів роботи СЗЕ та СТЕ, тому це питання розглядалось більш детально. Оцінку взаємозв'язку режимів роботи підсистем різних рівнів напруги виконували на прикладі ТП Красноармійськ (напруга первинних шин 35 кВ). Встановлено, що зміни рівнів напруг на шинах тягового навантаження 3,3 кВ від напруги живлення 35 кВ мають низький кореляційний зв'язок ($\beta=0,122$). Аналогічні результати отримано і для приєднань 10 кВ ($\beta=0,189$) та 6 кВ ($\beta=0,192$). Із дослідження взаємозв'язку струму на шинах 3,3 кВ та напругою на приєднаннях ТП слідує, що зі зменшенням рівня напруги ступінь залежності зростає: 35 кВ – $\beta=-0,288$; 10 кВ – $\beta=-0,509$; 6 кВ – $\beta=-0,521$.

Аналіз показує, що зміни режимів напруги та тягового навантаження практично не впливають на коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю K_{2U} . Аналогічні результати отримані і для інших приєднань. Встановлено, що зміна режимів напруги на шинах тягового навантаження практично не впливає на коефіцієнт спотворення синусоїдності K_U . При цьому необхідно відзначити різний характер впливу на K_U тягового струму підстанції: - незначний для приєднання 35 кВ, та дуже значний для шин 10 кВ, від яких отримують живлення тягові перетворювачі (рис. 7).

Таким чином, зміна навантаження тягової підстанції практично не здійснює впливу на показники якості електричної енергії системи зовнішнього електропостачання. Режими напруги як в СТЕ, так і в СЗЕ визначаються випадковими факторами та мають слабкий статистичний зв'язок між собою. Для оцінки енергообмінних процесів у підсистемі змінного струму СТЕ найважливішими є наступні ПЯЕЕ: відхилення напруги та коефіцієнт спотворення синусоїдності напруги.

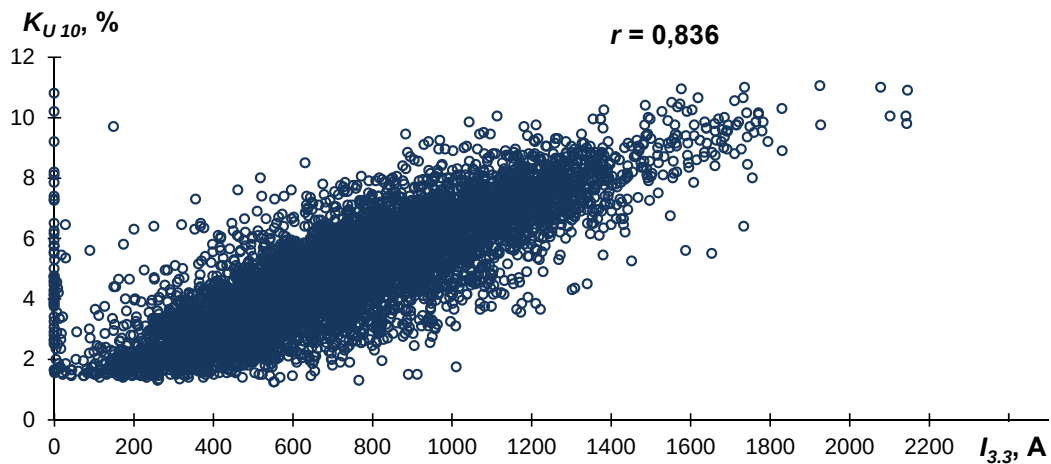


Рис. 7 – Оцінка взаємозв'язку K_U шин 10 кВ зі струмом 3,3 кВ.

У *третьому розділі* сформовано підходи по створенню системи показників якості електроживлення (ПЯЕ) у тягових мережах постійного струму електрифікованих залізниць постійного струму. Встановлено, що середній рівень напруг на шинах тягового навантаження на різних підстанціях різних регіонів близький (табл. 3) до рівня довготривалої робочої напруги 3600 В.

Таблиця 3.

Числові характеристики рівня напруги на шинах 3,3 кВ

№ пор.	Параметр	Номер підстанції			
		1	5	6	11
1	Математичне очікування $M(U_y)$, В	3563,16	3478,52	3554,28	3561,82
2	Мода $Mo(U_y)$, В	3580	3492,36	3604,48	3560
3	Медіана $Me(U_y)$, В	3566	3480,41	3558,25	3561

Проведений аналіз наукових публікацій та результатів експериментальних досліджень дозволяє стверджувати, що для забезпечення нормальної енергоефективної роботи електрорухомого складу нормально допустимі відхилення напруги тягової підстанції від номінальної напруги 3,3 кВ повинні мати наступні значення: $\pm 9\%$, тобто шкала напруг матиме вигляд: 3600-3300-3000 В. Гранично ж допустимі значення відхилення напруги визначаються з розглянутих вище обмежень і складають відповідно: $+16$ і -13% для рівнів напруг: 3800-3300-2900 В.

На електромагнітні енергобмінні процеси впливає не тільки рівень напруги, а й її гармонічний склад. Для оцінки якості випрямлення та кількісної і якісної оцінки величини і впливу гармонічних складових використовуються різноманітні показники але вони не в повній мірі відображають фізичні явища протікання енергообмінних процесів в тяговій мережі (та й реально вимірювання їх фактично не здійснюється). Для їх врахування запропоновано коефіцієнт співвідношення вищих гармонійних складових $K_{СВГ}$

$$K_{\text{свг}} = \frac{K_{\text{нкг}}}{K_{\text{кг}}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1,3,5,\dots} [U_{(3i-1)}^2 + U_{(3i+1)}^2]}}{\sqrt{\sum_{i=1,2,3,\dots} U_{(6i)}^2}}, \quad (1)$$

де $K_{\text{кг}}$ – коефіцієнт канонічних гармонік;

$K_{\text{нкг}}$ – коефіцієнт неканонічних гармонік.

Аналогічні вирази можна отримати і для 12- та 24-пульсної схеми випрямлення. Чисельно значення $K_{\text{свг}}$ показує ступінь впливу якості живлячої напруги на якість напруги на стороні постійного струму, тобто характеризує якість енергообмінних процесів. Результати розрахунку $K_{\text{свг}}$ від впливу несиметрії живлячої напруги представлені на рис. 8.

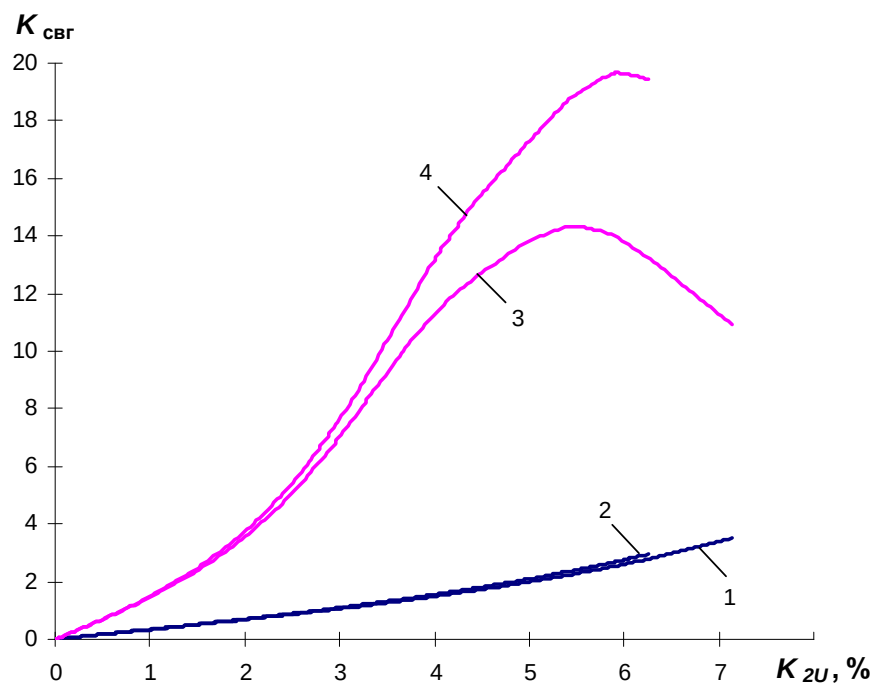


Рис. 8 – Коефіцієнт співвідношення вищих гармонік $K_{\text{свг}}$ в залежності від коефіцієнта несиметрії напруги K_{2U} для 6-пульсової (1, 2) та 12-пульсової (3, 4) схем випрямлення

Кожна точка залежності рис. 8 відповідає кривій випрямленої напруги, для якої застосовується розкладання в ряд Фур'є, виділення канонічних та неканонічних складових при різних величинах несиметрії напруги, яка визначається коефіцієнтом K_{2U} . Коефіцієнт співвідношення $K_{\text{свг}}$, як видно з рис. 8, буде залежати не тільки від чисельного значення величини несиметрії, але й від співвідношення між величинами напруги в кожній фазі. Так, нижні «гілки» залежності (рис. 8., поз. 1, 3) для 6- та 12-пульсової схем отримуються, якщо в одній з фаз напруга занижена відносно двох інших. Верхні «гілки» залежностей, навпаки, при завищеній напрузі в одній фазі відносно двох інших.

Аналізуючи, таким чином, отриманий фазовий портрет, можна визначити нормально та гранично допустимі значення коефіцієнта співвідношення $K_{\text{свг}}$ відповідно до нормованих значень K_{2U} згідно з ГОСТ 13109-97. Були розраховані нормально та гранично допустимі значення коефіцієнта співвідношення $K_{\text{свг}}$ вищих гармонік для схем випрямлення: 6-пульсової – 0,65 та 1,46 / 1,55 і 12-пульсової – 3,6 та 11,3 / 13,2 відповідно. В чисельнику приведено значення для випадків, коли несиметрія напруги викликається зниженням напруги в одній фазі, у знаменнику – якщо в одній фазі напруга завищена відносно двох інших.

Іншим питанням, яке розглядалось, є розробка теоретичних основ побудови моделей електромагнітних завад у СТЕ. Закон розподілу випадкової величини повністю характеризує її зміну у часі, тобто може бути однозначно застосований в якості моделі після визначення відповідних числових характеристик. На сьогодні не існує єдиної методології, згідно якої можливо аналізувати властивості нестационарного процесу будь-якого типу, використовуючи його індивідуальну реалізацію. Найбільше поширення для опису нестационарних процесів у техніці отримала адитивна модель виду:

$$x(t) = M(t) + \varepsilon(t), \quad (2)$$

де $M(t)$ - математичне очікування, яке залежить від часу;

$\varepsilon(t)$ - стаціонарний нормальний процес з відомими параметрами.

Необхідно зазначити, що не існує єдиної методології, яку можна було б застосовувати для аналізу часових рядів зміни завад для всіх можливих ситуацій.

Для підсистеми змінного струму, згідно результатів проведених досліджень, нами виокремлено і розглядаються наступні типи завад: відхилення напруги та коефіцієнт спотворення синусоїдності напруги. Для моделювання відхилення напруги використана модель виразу (2), у якій $M(t)$ представляє тренд, а $\varepsilon(t)$ стаціонарний нормальний процес з параметрами, визначеними в результаті застосування стандартних процедур авторегресії та проінтегрованого ковзного середнього (АРПСС).

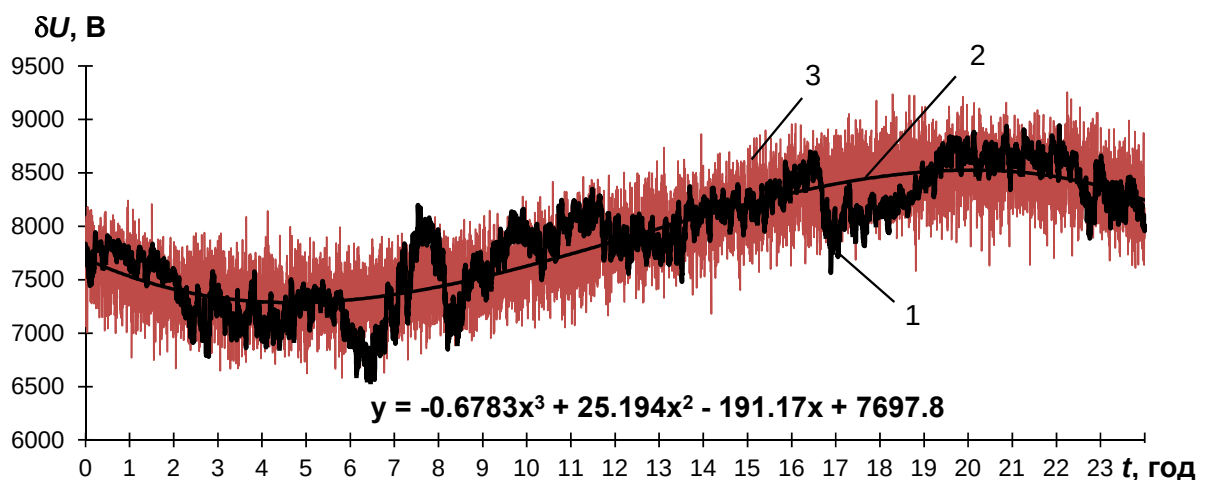


Рис. 9 – Моделювання відхилення напруги в мережі 110 кВ:

1 – вихідний ряд; 2 – тренд; 3 – модель

Коефіцієнт спотворення синусоїдності напруги моделювався поліномом третього ступеня.

У підсистемі постійного струму моделювання, згідно отриманих вище результатів, проводили для таких завад: відхилення напруги та $K_{\text{свг}}$. Методологія моделювання завад була аналогічна наведеній вище. Була виконана також перевірка адекватності отриманих математичних моделей, статистична похибка не перевищувала значення міри 0,66.

Отримані моделі можна застосовувати для оцінки режимів енергообмінних процесів та при моделюванні розроблюваних пристроїв силової електроніки.

У четвертому розділі розглянуто питання підвищення електромагнітної сумісності підсистем тягового електропостачання постійного струму. Зазначається, що енергетичні канали тягового електропостачання повинні забезпечувати надійність та безперебійність живлення, стійкість до непередбачуваних впливів та високу енергоефективність. На сучасному етапі, окрім вказаного, вони повинні бути електромагнітносумісними з оточуючим середовищем на всіх рівнях передачі, перетворення та споживання електричної енергії. Вказані процеси забезпечуються низкою різноманітних пристроїв, утворюючих, власне, енергетичні канали (ЕК): лінії електропередачі, трансформатори, перетворювачі, інфраструктура тягової мережі та споживачі електричної енергії. Взаємодія підсистем ЕК представляє складний стохастичний процес, характеристики якого змінюються у просторі, площині та часі. В дисертації окреслено основні вимоги до обладнання ЕК.

Комплексна реалізація зазначених вимог дозволить створити високоефективні конкурентноздатні електромагнітносумісні енергетичні канали тягового електропостачання постійного струму, які відповідають сучасним вимогам. Розглядаються напрямки удосконалення ЕК та можливі варіанти їх схемної реалізації. Перспективними є структури децентралізованого живлення з використанням принципів активної фільтрації та розробка систем живлення з проміжною ланкою підвищеної частоти.

На сьогодні доцільно в подальшому розглядати засоби підвищення ефективності тягового електропостачання постійного струму напруги 3,3 кВ в рамках існуючої централізованої структури за рахунок впровадження на тягових підстанціях і міжпідстанційних зонах елементів розподіленої структури живлення тягової мережі. До таких засобів відносяться впровадження на тягових підстанціях випрямлячів-стабілізаторів напруги, допускаючих безконтактне регулювання випрямленої напруги від номінального значення U_{dN} до максимально допустимого $U_{d\text{max}}$ та підсилюючих перетворювальних пунктів живлення тягової мережі у міжпідстанційних зонах, живлення яких забезпечується спеціальним високовольтним фідером тягових підстанцій. Як зазначалось вище, випрямляч, виступаючи з'єднувальною ланкою між системами змінного та постійного струмів, повинен забезпечувати вирішення проблем ЕМС та підвищення енергетичних показників роботи СТЕ: зниження втрат електроенергії, зниження генерації реактивної енергії та вищих гармонік. Таким чином, можна стверджувати, що

сучасний випрямляч є складним, багатофункціональним пристроєм та виконується на принципах комбінованої ідеології: реалізація багатопульсності, зменшення обладнання та розширення функцій.

Як показують розрахунки, за допомогою дванадцятипульсного напівкерованого випрямляча з реверсивним запираємим вольтододатком, виконаного на сучасній елементній базі силової електроніки, забезпечується необхідний рівень електромагнітної сумісності при приблизно на 30% меншій масі Г-подібного вихідного LC-фільтру та без установки додаткових фільтрів-пробок. Подальше зниження маси Г-подібного LC-фільтру при збереженні рівня електромагнітної сумісності обмежується необхідністю придушення гармонік з частотою ШІМ вольтододатка, яка може реально реалізуватися в межах 1200-1800 Гц, а також комбінаційних гармонік більш низької частоти, генерованих вольтододатком при його роботі в якості активного фільтру. Всі ці гармоніки приходяться на пік псофометричної кривої і, отже, повинні придушуватися. Ця перешкода на шляху подальшого зниження маси Г-подібного вихідного LC-фільтру усувається при використанні в якості вихідного фільтру гібридного фільтру на основі малопотужного активного фільтру паралельного типу (АФ). Один з варіантів такого АФ на базі автономного інвертора струму для використання на тягових підстанціях постійного струму з дванадцятипульсними випрямлячами вольтододаткового типу показаний на рис. 10.

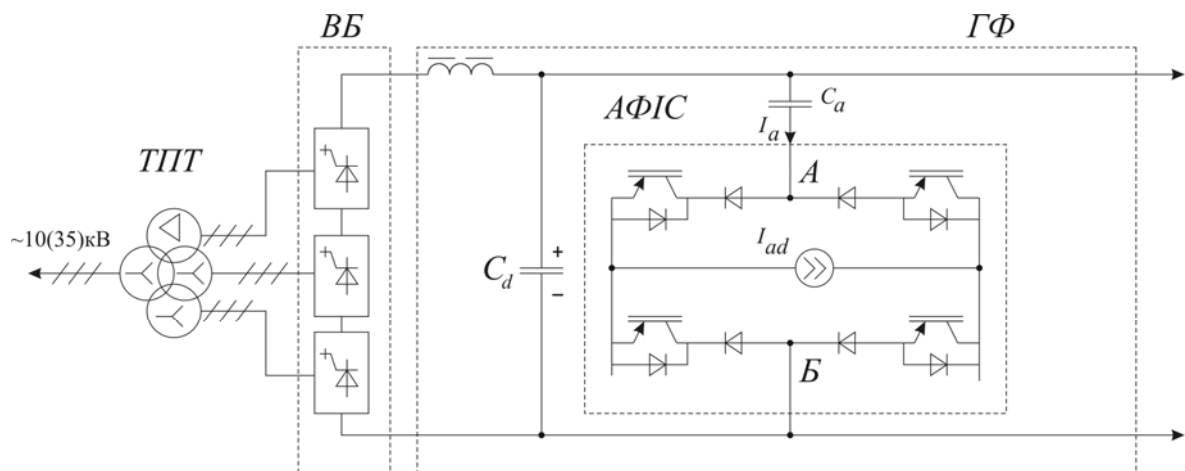


Рис. 10 – Структура гібридного фільтру з активним фільтром паралельного типу на базі автономного інвертора струму (АФІС).

Ефективність роботи АФ залежить в основному від розрахункових характеристик струмового контролера, використовуючого реалізований метод для створення шаблону стеження і модуляції. Внаслідок імпульсного характеру компенсуючих сигналів з їх допомогою можна відтворити лише гармонійні складові, які лежать в смузі відтворюваності

$$\omega_n \leq \frac{1}{2} \omega_{Ш} \quad , \quad (3)$$

де $\omega_{Ш}$ - частота ШІМ.

Вищі частоти не відтворюються достатньо точно і, мало того, створюють перешкоди всередині смуги відтворюваності. Для запобігання цій аномалії

необхідне обмеження спектру сигналів зворотних зв'язків по верхній межі частоти. Проте відомо, що ідеальний фільтр, що має обмежену частотну характеристику, в загальному випадку не може бути реалізований. Дійсно, для його імпульсної характеристики, яка є перетворенням Фур'є від частотної характеристики, маємо

$$N(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_A}^{\omega_A} e^{j\omega t} d\omega = \frac{e^{j\omega_A t} - e^{-j\omega_A t}}{2\pi j t} = \frac{\sin \omega_A t}{\pi t}. \quad (4)$$

Виділяючи сукупність вибірок (дискрет) вхідного сигналу, віддалених на період T і тому однакових по величині, отримаємо елементарний сигнал на виході в точці τ

$$dy = x(\tau - t)s(t)dt, s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} N(t + kT), \quad (5)$$

де $s(t)$ - імпульсна характеристика ідеального фільтру з прямокутною частотною характеристикою при періодичних сигналах.

Результуючий вихідний сигнал визначається підсумовуванням елементарних

$$y(\tau) = \int_0^T x(\tau - t)s(t)dt \quad (6)$$

На основі рівняння періодичної згортки ідеальний фільтр може бути реалізований декількома способами, наприклад, використанням ряду Фур'є (рис. 11).

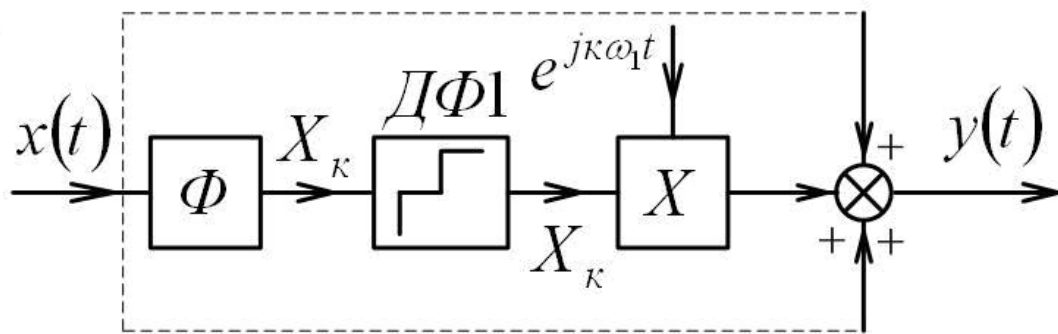


Рис. 11 – Реалізація ідеального фільтру при періодичних сигналах рядом Фур'є.

Метод ряду Фур'є реалізує рівняння

$$X_k = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-jk\omega_1 t} dt, \quad y(\tau) = \sum_{k=-q}^q X_k e^{jk\omega_1 \tau}, \quad (7)$$

де X_k - комплексна амплітуда k -ої гармоніки вхідного сигналу;

q - найбільший номер гармоніки, що входить в смугу пропускання ідеального фільтру. Дискретний фіксатор ДФ діє з періодом T .

На основі структури рис. 11 може бути створений цифровий фільтр дискретних частот (ФДЧ), який не вимагає розрахунку окремих гармонійних складових, а використовує безпосередньо рівняння періодичної згортки (6). У

дисертації отримані аналітичні вирази для імпульсної характеристики $s(t)$ такого фільтру.

Механізм дії фільтру пояснюють машинограми рис. 12, отримані на Matlab-моделі фільтру при $m=96$ при виділенні з ідеального меандра, що містить, як відомо, всі непарні гармоніки до 11-ої включно, для чого задавалося $q=12$. Фільтр, як видно, діє із затримкою $t_c = T$, необхідною для первинного створення масиву значень вхідного сигналу на періоді.

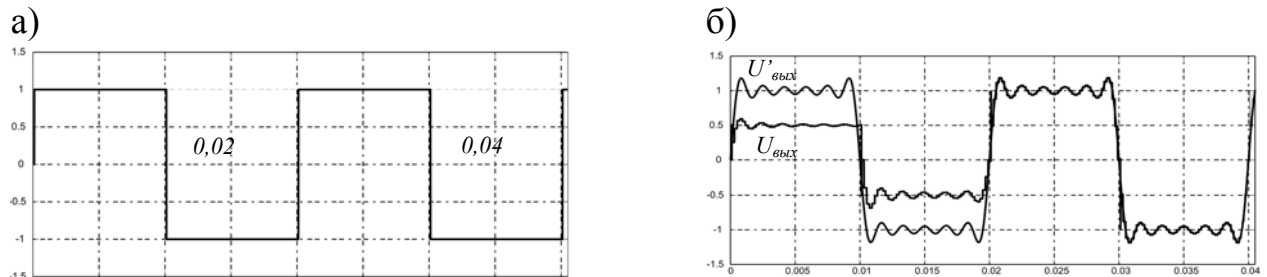


Рис. 12 – Дія фільтру на ідеальний меандр з періодом $T=0,02$ сек: а) вхідний сигнал; б) U_{vih} – реальний вихідний сигнал, U'_{vih} – розрахунковий вихідний сигнал.

З розглянутого ясно, що даний фільтр володіє прямокутною частотною характеристикою виду лише на дискретній сукупності робочих частот, відповідних періодичному сигналу. Тому можна сказати, що він належить до класу фільтрів дискретних частот (ФДЧ). Значення цих частот

$$\omega_k = k\omega_1 = 2\pi k/T, \quad -\infty < k < \infty \quad \text{при} \quad m \rightarrow \infty \quad (8)$$

де величина періоду T є параметром імпульсної характеристики $s(t)$.

Запропонований ФДЧ може мати різні застосування. Наприклад, розглянутий вище перетворювач вольтододадового типу, який, разом зі стабілізацією напруги в контактній мережі і формуванням близького до одиниці коефіцієнта потужності живлячої мережі, забезпечує активну фільтрацію вихідних гармонік основного випрямляча, що дозволяє скоротити розміри силового вихідного фільтру L_d, C_d , і, в перспективі, зовсім виключити дросель L_d .

Можна констатувати, що електроустаткування тягових підстанцій, застосовуване на сьогодні, не задовольняє вимогам нових світових стандартів на якість споживаної електроенергії, перш за все, за двома основними показниками:

- гармонійному складу споживаного з мережі струму;
- співвідношенню між активною і реактивною компонентами споживаної потужності.

Традиційним засобом забезпечення ЕМС за вказаними показниками є використання фільтро-компенсуючих пристроїв (ФКП) на стороні змінного струму. Проте ці технічні засоби володіють великою встановленою потужністю і вирішують тільки одну сторону проблеми ЕМС. Ефективнішими є рішення, які одночасного вирішують також проблеми електромагнітної сумісності перетворювального агрегату з контактною мережею (КМ). Тому необхідно розробити структуру

системи комбінованої активної фільтрації, яка використовує поєднання наступних вузлів (рис. 20):

- основного перетворювача (ОП) багатопульсової структури, що працює по традиційних схемах і з традиційними напівпровідниковими приладами при значеннях кута управління в сталому режимі, близьких до 0° або 180° ; цей перетворювач забезпечує основну частку (близько 80%) від передаваної активної потужності;

- вольтодобавочного перетворювача (ВДП) з широтно-імпульсним способом управління, який на виході стабілізує напругу і є послідовним активним фільтром, а на вході – компенсує надлишкову реактивну потужність і переймає на себе додаткову частку (близько 20%) від передаваної активної потужності;

- паралельного активного фільтру (АФ) на вході, що доводить до необхідної кондиції гармонійний склад споживаного струму.

Остання ланка відрізняє систему від тієї структури, яка пропонувалася раніше, і дозволяє додати системі активної фільтрації істотно більш комплексний характер. Вона є трифазним автономним інвертором з високочастотною широко-імпульсною модуляцією (ШІМ), який приєднується до живлячої мережі через послідовний баласт на основі паралельного з'єднання дроселя і конденсатора. Баласт не пропускає до АФ основну гармоніку струму мережі, що дозволяє при 12-пульсному ОП отримати встановлену потужність власне АФ близько 3% від передаваної активної потужності. Відносна встановлена потужність реактивних елементів баласту біля 10%. Крім того, АФ містить діодний обмежувач напруги, навантажений на ємнісний накопичувач енергії або варистор. Обмежувач діє в перехідних і аварійних режимах роботи.

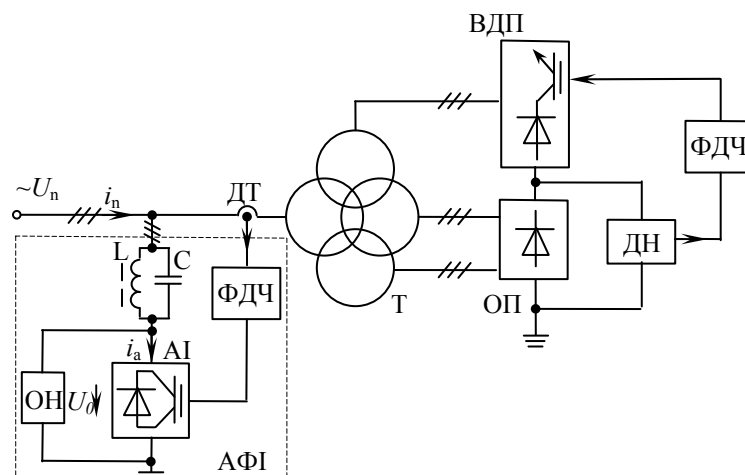


Рис. 13 – Структурна схема системи комбінованої активної фільтрації: U_n – живляча мережа; LC – індуктивно-ємнісний баласт; АІ – автономний інвертор; ОН – обмежувач напруги; Т – силовий трансформатор; ОП – основний перетворювач; ВДП – вольтодобавочний перетворювач; ДН – датчик напруги; ДТ – датчик струму; ФДЧ – фільтри дискретних частот.

Визначимо наскільки зросте встановлена потужність ВДП при додаванні функції компенсації фазового зсуву. Допустимо спочатку, що, окрім функції компенсації фазового зсуву, ВДП спотворює тільки функцію регулювання вихідної напруги у відносних межах:

$$\Delta U^* = U_{db}/U_d. \quad (9)$$

Тоді, згідно прийнятому алгоритму управління ВДП найбільша досяжна амплітуда фазного струму i на вході ВДП дорівнює вихідному струму i_d

$$I_m = \sqrt{2} \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = i_d = \sqrt{2} I, \quad (10)$$

де I_a і I_p - значення діючих активного і реактивного струму на вході ВДП;
 I - повний діючий струм на вході ВДП

$$I_m = i_d = \sqrt{2} \sqrt{I_a^2 + I_p^2}. \quad (11)$$

Найбільша активна потужність, створювана ВДП:

$$P_g = u_{db} i_d = \Delta u P_0 = 3u I_a, \quad (12)$$

де P_0 - активна потужність основного випрямляча; u - значення фазної діючої напруги на вході ВДП.

Встановлена потужність ВДП визначається повним діючим струмом:

$$S_g = 3uI = \sqrt{(3uI_a)^2 + (3uI_p)^2} = \sqrt{P_g^2 + Q^2} = \sqrt{(\Delta u^* P_0)^2 + P_0^2 (tg\varphi_1 - tg\varphi_2)^2}, \quad (13)$$

де $tg\varphi_1$ і $tg\varphi_2$ - кути зсуву між напругою і струмом живлячої мережі за відсутності і наявності ВДП.

Зважаючи на малість кута φ може бути прийняте наближена рівність:

$$tg\varphi \cong \sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}. \quad (14)$$

З урахуванням чого отримаємо відносно встановлену потужність ВДП:

$$S_g^* = \frac{S_g}{P_0} = \sqrt{\Delta u^{*2} + (\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_1} - \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2})^2}. \quad (15)$$

При використанні багатопульсних схем ОВ в межі зникають канонічні вищі гармоніки із споживаного струму і тоді $\cos\varphi_2$ може бути прийнятий рівним рекомендованому значенню 0,98 коефіцієнта потужності. За відсутності ВДП величина $\cos\varphi_1$ складає близько 0,95. Звідси: $\sin\varphi_1=0,31$, $\sin\varphi_2=0,2$; $(\sin\varphi_1 - \sin\varphi_2)^2 = (0,31-0,2)^2 = 0,012$

Δu^*	0,1	0,2	0,3	0
S_g^*	0,148	0,228	0,319	0,11

При цих даних на рис. 14 приводиться залежність встановленої потужності ВДП від прийнятого в ньому діапазоні регулювання напруги. Окрім неї, приведена залежність $S_g^{/*} = \Delta u^*$, яка отримується у ВДП без додаткової функції компенсації фазового зсуву.

Як видно, при введенні додаткової функції пов'язане з нею збільшення встановленої потужності ВДП тим менше, чим більше прийнятий у ВДП діапазон регулювання напруги Δu^* . Це ж співвідношення зберігається і в тому випадку, якщо у ВДП реалізуються інші додаткові функції, зокрема функції активної фільтрації вихідних гармонік. Відомо, що при цьому потрібно мати Δu^* в межах 0,2-0,27.

Як впливає із зіставлення залежностей для S_g^* і $S_g^{/*}$ приєднання функції компенсації фазового зсуву струму веде до збільшення встановленої потужності ВДП приблизно на 10 %. Цей сприятливий чинник пояснюється квадратичним підсумовуванням

реактивного струму з активним, що веде лише до незначного збільшення довжини результуючого вектора струму I порівняно з активною складовою I_a .

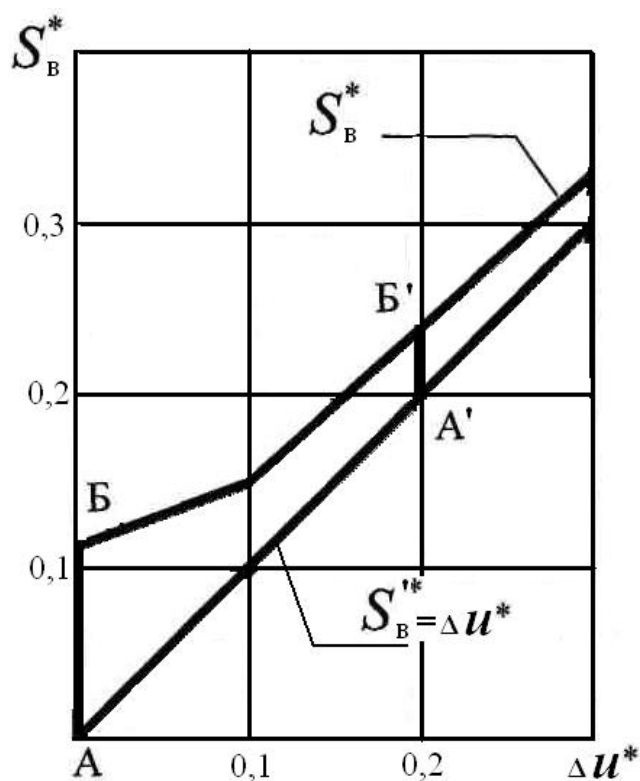


Рис. 14 – Порівняння споживаної потужності при варіантах використання ВДП

Можливою альтернативою перетворювача ВДП є окремий перетворювач на вході, що діє як генератор реактивної потужності, або конденсаторна батарея там же з регулюванням числа конденсаторів при зміні навантаження підстанції.

Проте відносна встановлена потужність такого окремого компенсуючого пристрою дорівнює довжині відрізка АБ на рис. 14, в, як і додаткова встановлена потужність ВДП вирішуюча ті ж самі завдання і дорівнює відрізку А'Б', приблизно в 5 разів менше.

Результати моделювання запропонованої системи рис. 13 показують перетворення вхідного струму в практично синусоїдальний. Для цього потрібно приблизно 3 періоди, тобто структура управління забезпечує достатньо високу швидкодію каналів придушення вищих гармонік. При цьому у ФДЧ вихідний сигнал встановлюється за один період, а решта часу йде на встановлення режиму в реактивному баласті.

В роботі також розглянуті питання побудови електромагнітносумісної перспективної системи розподіленого живлення. Застосування системи розподіленого живлення контактної мережі від кабельної поздовжньої лінії з підвищеною частотою змінної напруги дозволяє приблизно на порядок зменшити масу силових електромагнітних елементів у випрямних агрегатах, скоротити в кілька разів число зв'язків з живильною енергосистемою й розширити можливості керування системою електропостачання. Режим напівхвильового налаштування системи усуває індуктивне падіння напруги в поздовжній лінії, що дозволяє використовувати некеровані випрямлячі, і знижує чутливість до резонансних явищ, що дозволяє використовувати в поздовжній лінії квазіпрямокутну форму напруг і

струмів, що забезпечує більше високі енергетичні показники в порівнянні із синусоїдальною. Зміною співвідношення між хвильовим опором кабелю й опором номінального навантаження можна до 2-3 разів знизити втрати холостого ходу в поздовжній лінії.

Робота перетворювача на поздовжню лінію, що володіє вираженими резонансними властивостями, висуває підвищені вимоги як до алгоритму керування силовим комутатором, так і до динамічних властивостей силового вихідного фільтра. Цим вимогам задовольняє виконання силового комутатора за структурою, що допускає багатозонну імпульсну модуляцію, а силового фільтра - з резистивним демпфером і резонансними шунтами на його затисках. Застосовуючи два трирівневі інвертори з магнітним підсумовуванням вихідних напруг за допомогою вихідного трансформатора спеціальної конструкції, можна реалізувати чотиризонну модуляцію, що досить для потужних перетворювачів. Отримано кількісні співвідношення для вибору параметрів вихідного демпфованого фільтра та доведено, що при формуванні квазіпрямокутної напруги в поздовжній лінії реактивна потужність резонансних шунтів не перевищує 25 % від потужності базового LC-фільтра, а втрати в резистивному демпфері мають порядок 0,1 % від потужності номінального навантаження.

П'ятий розділ роботи присвячено результатам розробки технічних рішень для зменшення електромагнітного впливу системи тягового електропостачання на суміжні пристрої: дослідного зразка перетворювача, силового активного фільтра, складових інфраструктури передачі електричної енергії: опор контактної мережі, ізоляторів, обмежувачів перенапруг та заземлення.

В основу розробки дослідного зразка перетворювального агрегату ПА-5200 покладено науково-дослідні роботи по розробці технічних вимог до перетворювальних агрегатів на базі дванадцятипульсних напівкерованих випрямлячів з реверсивним вольтододатком для тягових підстанцій постійного струму, у яких автор приймав безпосередню участь.

Окремо розглядаються питання технічної реалізації силового активного фільтра (САФ) для тягових підстанцій, на яких використовуються застарілі випрямлячі.

Для підвищення експлуатаційних характеристик залізобетонних опор розглянуті питання застосування захисту бетону стояків опор контактної мережі кремнійорганічними гідрофобізуючими олігосилоксановими сполуками марки "Сілол".

Доведено, що в сучасних умовах експлуатації ізоляторів в мережах постійного струму, струми витоку уздовж полімерної ізоляції у порівнянні із струмами уздовж фарфорової ізоляції будуть менші, принаймні, в стільки раз, в скільки відрізняються коефіцієнти форми використовуваних ізоляторів: $k_{\phi 2} / k_{\phi 1} = 2,8$. Отримані результати розрахунків струмів стікання співпадають з експериментальними даними, що підтверджує адекватність прийнятої моделі.

Отримані результати дозволяють зробити важливий висновок – застосування полімерних ізоляторів підвищує рівень суміжності СТЕ з точки зору зменшення кондуктивного впливу на суміжні пристрої. Іншим аспектом їх застосування є

підвищення енергетичних показників тягової мережі, а саме, зменшення втрат електричної енергії від струмів стікання, величина яких має суттєве значення.

Одним з негативних факторів, впливаючих на працездатність електрифікованої ділянки являються перенапруги, виникаючі в результаті атмосферних явищ та комутаційних процесів. Тому в роботі на основі існуючих нормативних матеріалів розроблені робочий алгоритм розрахунку параметрів ОПН і рекомендацій по вибору відповідних розрядників, що забезпечують оптимальний захист електроенергетичних об'єктів електрифікованих залізниць постійного струму від грозових і комутаційних перенапруг.

Якісна передача електричної енергії заданої потужності на ЕРС через систему контактна підвіска – струмоприймач можлива при стабільному електричному і механічному контакті, який визначається геометрією вставки. В результаті аналізу інформативних джерел, результатів теоретичного аналізу і експериментальних випробувань вставок з різною геометрією поперечного перерізу запропонована вставка з опуклим профілем. Її застосування не тільки знижує знос контактного проводу, але й зменшує рівень електромагнітних завад.

Насамкінець, в розділі розглянуті вимоги до побудови заземлення у системі тягового електропостачання. Методологія виконання заземлення конструкцій, пристроїв і споруд на електрифікованих залізницях детально описана в оновленій Інструкції по заземленню пристроїв електропостачання на електрифікованих залізницях ЦЕ-0029, виконаній під керівництвом автора.

У шостому розділі наведено результати комп'ютерного моделювання складових підсистем електричної тяги постійного струму. Загальна методологія побудови математичної моделі для дослідження електромагнітних процесів у тягових мережах постійного струму побудована на принципі інтегрованої декомпозиції.

Побудова моделі тягової підстанції в програмному середовищі Simulink (MatLab) не вимагає створювати повну схему заміщення об'єкту поелементно, що складається лише з джерел живлення та лінійних чи нелінійних пасивних елементів, а можливо застосовувати уже існуючі блоки елементів, такі як трансформатор чи випрямляч, в які необхідно тільки ввести відповідні дані обладнання.

На рисунку 15 представлена модель тягової підстанції постійного струму з 6-ти пульсовою схемою випрямлення. Аналогічно наведеній моделі також були створені (тут не представлені) моделі підстанцій з 12-пульсовими перетворювачами та різними первинними напругами живлення (10 кВ і 35 кВ) та моделі елементів ТП.

На моделях проведені варіантні дослідження різних реалізацій побудови тягових підстанцій. Їх аналіз показує, що запропоновані вище технічні рішення значно поліпшують ЕМС СТЕ.

Для моделювання електромагнітних процесів у тяговій мережі постійного струму пропонується розглядати її, як лінію з розподіленими параметрами. На Simulink-моделях ТМ отримано наступне. Аналіз АЧХ (рис. 16) показує, що опір електрорухомого складу (змін режимів тяга – вибіг) не змінює характеристику, крім того вона досить мало залежить від розташування електрорухомого складу на ділянці (0..20 км). АЧХ пояснює превалююче значення гармонік з частотами 100 та 200 Гц над іншими, оскільки в частотній області 100 – 200 Гц коефіцієнт передачі

більше 1,0 та може досягати десятків. Подібне підсилення можливе і на частоті близькій до 400 Гц.

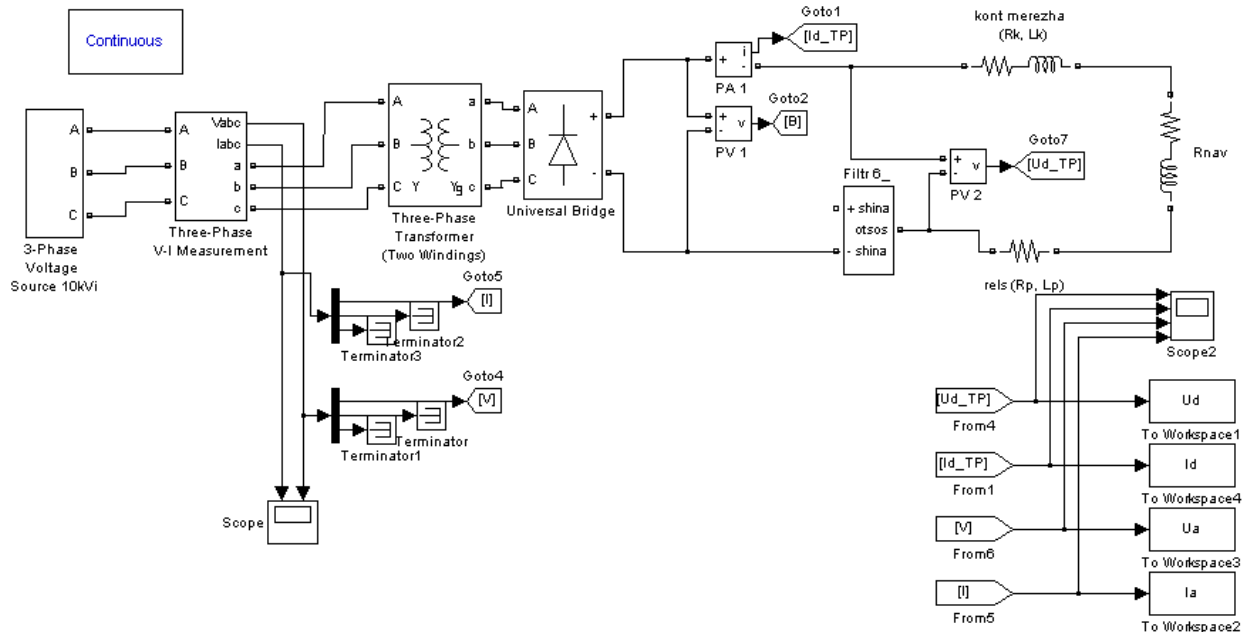


Рис. 15 – Модель тягової підстанції постійного струму з 6 пульсовим випрямлячем та тяговою мережею

Іншим аспектом було вивчення можливості виникнення резонансних явищ в тяговій мережі при передачі та споживанні електричної енергії. Моделювання підтвердило, що в тяговій мережі в процесі струмоспоживання за рахунок зміни параметрів системи виникають резонансні явища, в результаті яких погіршується електромагнітна обстановка. Доведено також, що модель з розподіленими параметрами більш точно описує характер протікання електромагнітних процесів в тяговій мережі.

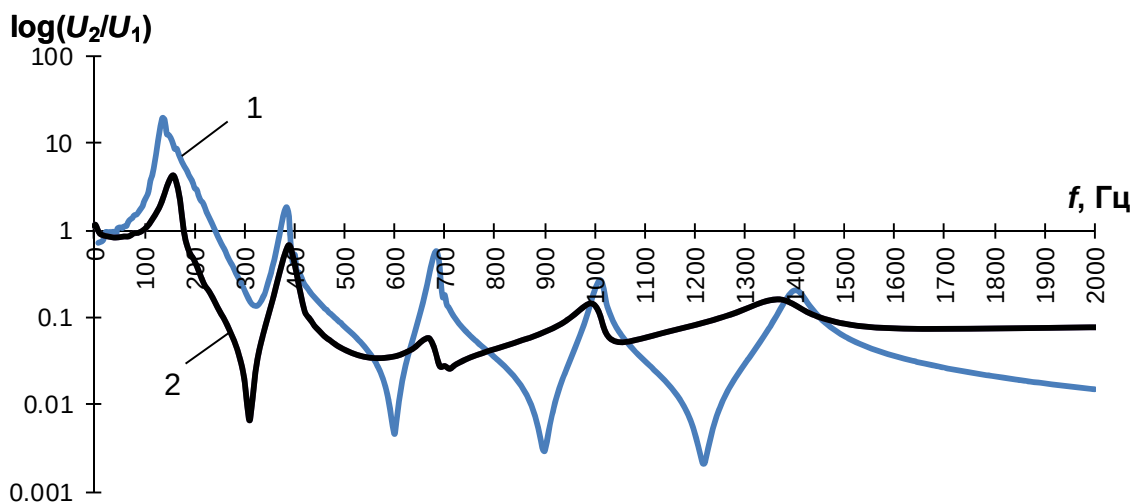


Рис. 16 – Амплітудно-частотні характеристики тягової мережі: 1 - для моделі з зосередженими параметрами, 2 - для моделі з розподіленими параметрами.

В роботі також проводилось моделювання роботи електрорухомого складу. В якості прикладу нижче наведені результати математичного моделювання роботи електровозу з колекторними двигунами ВЛ-8. При моделюванні приймалися наступні умови: контактори розмикають та замикають ланцюг миттєво; дуга на контактах не виникає; зміна позицій проводилась із проміжком 1с. Деякі результати моделювання представлені на рис. 17-18.

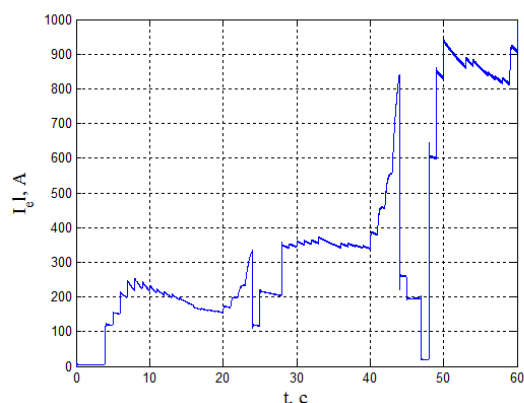
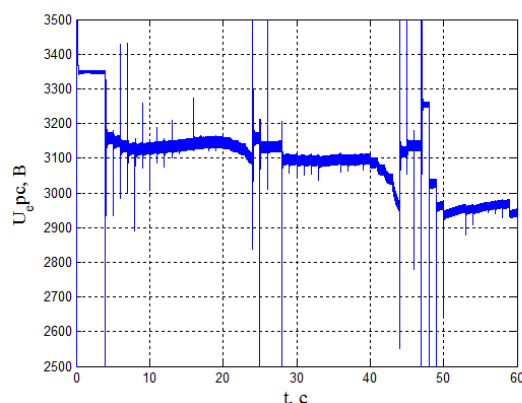


Рис. 17 – Загальний вигляд кривої напруги на ЕРС. Рис. 18 – Крива струму електровоза.

Як видно із графіків, під час зміни тягових позицій електровоз створює значні місцеві перенапруження в тяговій мережі, що в свою чергу призводить до перехідних коливальних процесів. Беручи також до уваги нелінійність намагнічування сталі у тягових двигунах можна зробити припущення, що зміна режимів роботи ЕРС є причиною виникнення частини спектру гармонік у СТЕ. Гармонічний склад перехідного процесу буде в цьому випадку залежати від резонансної частоти контуру тягового електропостачання і постійно змінюватись в під час руху електровоза.

Розроблені імітаційні моделі складових ЕК дозволяють комплексно оцінювати характер протікання електромагнітних процесів у тягових мережах постійного струму з визначенням їх енергетичних характеристик та рівнів електромагнітної сумісності на всіх етапах споживання електричної енергії. Достовірність роботи моделі підтверджена порівнянням результатів її роботи з результатами аналітичних розрахунків і експериментальних даних, проведених, в тому числі, і у ряді інших дослідницьких робіт.

У сьомому розділі виконано техніко-економічне обґрунтування впровадження пропонованого електромагнітносумісного випрямляча та силового активного фільтру.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі теоретичних і експериментальних досліджень вирішено актуальну науково-технічну проблему – підвищення енергоефективності системи електричної тяги на основі розвитку теоретичних основ поліпшення електромагнітної сумісності пристроїв і підсистем електрифікованих ділянок магістрального залізничного транспорту.

1. В останні два-три десятиріччя в експлуатації системи електричної тяги постійного струму відчутно намітилися негативні тенденції відносно якості електроенергії, її втрат, а також підтримки необхідного рівня електромагнітної сумісності підсистем системи електротяги. Це обумовлено, з одного боку, моральним і фізичним старінням існуючої інфраструктури: контактної мережі, тягових підстанцій, електрорухомого складу (ЕРС). З іншого боку, і це істотно, виконуються значні об'єми робіт по модернізації і заміні обладнання і підсистем: тягові підстанції обладнуються тиристорними випрямлячами та новими видами фідерного захисту, в експлуатацію вводяться нові типи ЕРС (електровоз ДЕ 1 та ін.), все частіше стає задача підвищення напруги в контактній мережі до 6, 12 чи 24 кВ. Зазначене вимагає ефективного розв'язання енергетичних задач, а також проблеми електромагнітної сумісності (ЕМС) підсистем, що змінюються. А для цього необхідна розробка наукових основ підвищення ЕМС, тільки на базі яких можливо впровадження новітніх технологій та сучасного обладнання, які забезпечать необхідний рівень ЕМС.

2. В первинній мережі 110 кВ, що живить ТП, а також на шинах 10 кВ, що живлять тягові трансформатори, рівень напруги перевищує номінальне значення, а в мережі 110 кВ ще й виходить за межі гранично допустимого значення. Несиметрія напруги в цих мережах знаходиться в допустимих межах, а показник спотворення синусоїдності напруги на шинах 10 кВ (з 6 - ти пульсовими випрямлячами) не відповідає вимогам.

3. В лініях СЦБ, у порівнянні з лініями ПЕ, коефіцієнт несиметрії напруги k_{2U} по зворотній послідовності у 3 рази більший, а коефіцієнт спотворення синусоїдності напруги (на ТП з 12 - пульсовими випрямлячами) більший майже удвічі.

4. Режим роботи згладжуючого фільтру (ЗФ) впливає на коефіцієнт спотворення синусоїдності напруги: при вимкненому ЗФ коефіцієнт k_U зростає у 1,5 рази і більше при 6-пульсовій схемі і в 1,5...2,5 рази – при 12-пульсовій схемі випрямлення.

5. Для забезпечення нормальної енергоефективної роботи ЕРС нормально допустимі відхилення напруги тягових підстанцій від номінального 3,3 кВ повинні складати $\pm 9\%$ і розташовуватись в інтервалі 3,6 - 3,3 - 3,0 кВ, а гранично допустимі – 3,8 - 3,3 - 2,9 кВ.

Запропонований показник якості електроживлення – коефіцієнт співвідношення вищих гармонік $k_{СВГ}$ – більш ніж існуючі показники враховує енергообмінні процеси в тяговій мережі. Встановлено, що допустиме значення $k_{СВГ}$ складає 1,55 для схеми з 6 - пульсовими випрямлячами і 13,2 – з 12 - ти пульсовими.

6. Розроблені загальні методологічні підходи до опису електромагнітних завад в підсистемах як змінного, так і постійного струму дозволяють при їх моделюванні використовувати теорію випадкових величин та теорію нестационарних стохастичних процесів.

7. Розглянуто вимоги до побудови ефективних електромагнітносумісних енергетичних каналів тягового електропостачання постійного струму та окреслено перспективні напрямки їх розвитку. Встановлено, що при комбінації послідовного активного фільтру (АФ), функції якого виконує вольтододатковий перетворювач, і паралельного активного фільтру, можливе зниження приблизно на порядок необхідної індуктивності основної пасивної ланки – фільтрового дроселя. У паралельному АФ доцільне використання інвертора струму, що дозволяє зменшити інерційність і підвищити стійкість системи проти низькочастотних автоколивань.

8. Для застосування в колах зворотних зв'язків силових активних фільтрів корисний фільтр дискретних частот (ФДЧ), який на дискретній сукупності частот періодичного збурення володіє прямокутною частотною характеристикою, відділяючи відтворні складові сигналів зворотних зв'язків від невідтворних. Використання ФДЧ для чорнового придушення гармонік в розімкненій керівній структурі дозволяє скоротити число резонансних ланок в основному замкнутому каналі і знизити величини їх коефіцієнтів посилення.

9. Запропонований комбінований підхід до побудови системи активної фільтрації, що скорочує приблизно в 5 разів витрати по встановленій потужності ланки, компенсуючої споживану з живлячої мережі реактивну потужність. При цьому система комбінованої активної фільтрації тягового перетворювача заснована на приєднанні до основного перетворювача вольтододадаткового ШІМ-перетворювача, що працює послідовним активним фільтром на виході і компенсатором реактивної потужності на вході, а також паралельного активного фільтру для придушення вищих гармонік струму на вході. Високі коефіцієнти придушення гармонік і висока швидкодія обох активних фільтрів забезпечується використанням структур управління з фільтрами дискретних частот.

10. Застосування системи розподіленого живлення контактної мережі від кабельної поздовжньої лінії з підвищеною частотою змінної напруги дозволяє приблизно на порядок зменшити масу силових електромагнітних елементів у випрямних агрегатах, скоротити в кілька разів число зв'язків з живильною енергосистемою й розширити можливості керування системою електропостачання. Режим напівхвильового налаштування системи усуває індуктивне падіння напруги в поздовжній лінії, що дозволяє використовувати некеровані випрямлячі, і знижує чутливість до резонансних явищ, що дозволяє використовувати в поздовжній лінії квазіпрямокутну форму напруг і струмів, що забезпечує більше високі енергетичні показники в порівнянні із синусоїдальною. Зміною співвідношення між хвильовим опором кабелю й опором номінального навантаження можна до 2-3 разів знизити втрати холостого ходу в поздовжній лінії.

11. Робота перетворювача на поздовжню лінію, що володіє вираженими резонансними властивостями, висуває підвищені вимоги як до алгоритму керування силовим комутатором, так і до динамічних властивостей силового вихідного фільтра. Цим вимогам задовольняє виконання силового комутатора за структурою, що допускає багатозонну імпульсну модуляцію, а силового фільтра - з резистивним демпфером і резонансними шунтами на його затисках. Застосовуючи два трирівневі інвертори з магнітним підсумовуванням вихідних напруг за допомогою вихідного трансформатора спеціальної конструкції, можна реалізувати чотиризонну модуляцію, що є достатнім для потужних перетворювачів.

12. Отримано кількісні співвідношення для вибору параметрів вихідного демпфованого фільтра та доведено, що при формуванні квазіпрямокутної напруги в поздовжній лінії реактивна потужність резонансних шунтів не перевищує 25 % від потужності базового LC-фільтра, а втрати в резистивному демпфері мають порядок 0,1 % від потужності номінального навантаження.

13. Отримані в дисертації результати досліджень знайшли втілення для реалізації технічних рішень, поліпшуючих електромагнітну сумісність підсистем тягового

електропостачання постійного струму. Розроблено технічну документацію на запропонований випрямляча комбінованої ідеології з функціями активної фільтрації, а також варіанти реалізації силового активного фільтру для тягових підстанцій з застарілими випрямлячами, обґрунтована його структура та потужність. Для підвищення атмосферної та корозійної стійкості залізобетонних опор контактної мережі обґрунтовано застосування сучасних гідрофобізуючих сполук, що дозволить збільшити їх електричний опір та підвищить термін служби. Обґрунтовано доцільність застосування полімерної ізоляції. Доведено, що струми витоку у порівнянні з фарфоровою ізоляцією зменшуються майже в три рази. Удосконалено також методологію вибору і установки обмежувачів перенапруг. Для поліпшення якості струмознімання, і, як наслідок, зменшення рівня завад, виникаючих при відриві струмоприймача запропоновано застосовувати опуклий профіль вугільної вставки для струмоприймачів, не тільки знижує знос контактного проводу, але й зменшує рівень електромагнітних завад.

Розглянуті вимоги до побудови системи каналізації зворотного струму в тяговій мережі постійного струму для забезпечення необхідного рівня електромагнітної сумісності. Методологія виконання заземлення конструкцій, пристроїв і споруд на електрифікованих залізницях детально описана в оновленій Інструкції по заземленню пристроїв електропостачання на електрифікованих залізницях ЦЕ-0029, виконаній під керівництвом автора.

14. Очікувана економічна ефективність впровадження на тяговій підстанції випрямляча комбінованої ідеології замість замість 6-пульсового випрямляча складає близько 4, 0 млн. грн.

15. Проведені комплексні теоретичні та експериментальні дослідження стали основою для розробки та впровадження структурних елементів енергетичних каналів постійного струму. Результати дисертаційної роботи впроваджено у Головному управлінні електрифікації та електропостачання, службах електропостачання Донецької, Львівської та Південної залізниць, НДІ Перетворювач та в навчальному процесі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Основні положення і результати дисертації опубліковані в таких роботах:

1. А/с СССР 1654052. Устройство для снижения пульсаций питающего напряжения импульсного преобразователя транспортного средства / Сыченко В.Г., Семенчук В.П., Бадер М.П., Просецкий А.П., Чаусов О.Г., Яцишин В.В.; 1991. Бюл. № 21.
2. А/с СССР 1654053. Устройство для снижения пульсаций питающего напряжения импульсного преобразователя транспортного средства / Сыченко В.Г., Семенчук В.П., Бадер М.П., Просецкий А.П., Чаусов О.Г., Яцишин В.В.; 1991. Бюл. № 21.
3. Сиченко В.Г. Про електромагнітну сумісність електрифікованих ліній постійного струму / В.Г. Сиченко, І.В. Анохов, М.П. Бадьор, В.І. Гаврилюк // Залізничний транспорт України. – 2000. – № 2. – С. 10-12.
4. Сиченко В.Г. Діагностування згладжуючих фільтрів тягових підстанцій постійного струму / В.Г. Сиченко, М.П. Бадьор, В.А.Зубенко // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2000. – № 2. – С. 80-84.

5. Пат. 38161 А. Пристрій для діагностування згладжуючого фільтру тягової підстанції постійного струму / Сиченко В.Г., Бадьор М.П., Зубенко В.А.; 15.05. 2001. Бюл. 4.
6. Сиченко В.Г. Підтвердження відповідності контактної мережі: проблеми та досвід / В.Г. Сиченко // Залізничний транспорт України. – 2004. – № 4. – С. 36 - 38.
7. Сыченко В.Г. К вопросу об испытаниях полимерных изоляторов. / В.Г. Сыченко, Ю.Н. Шумилов // Залізничний транспорт України. – 2005. – № 1. – С. 38 – 41.
8. Сиченко В.Г. Підвищення атмосферостійкості цементобетонних матеріалів поверхневою обробкою силосановими композиціями / В.Г. Сиченко, П.М. Коваль, А.П. Баглай, Д.Ю. Колесник // Нові технології в будівництві. – 2005. – №1(9). – С. 65-68.
9. Сыченко В.Г. Испытание подвижного состава на электромагнитную совместимость с рельсовыми цепями / В.Г. Сыченко, В.И. Гаврилюк // Залізничний транспорт України. – 2005. – № 3/2. – С. 192 – 194.
10. Сыченко В.Г. Методические аспекты определения уровней опасного и мешающего влияния подвижного состава на работу рельсовых цепей / В.Г. Сыченко, В.И. Гаврилюк, А.В. Завгородний // Вісник Дніпропетровського національного технічного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна. – 2005. – Вип. 9. – С. 11 – 14.
11. Пат. 17445 Полімерний стрижневий ізолятор / Сиченко В.Г., Злаказов О.Б., Оводов А.В., Шупік М.С.; дата публікації 15.09. 2006. Бюл. № 9.
12. Сыченко В.Г. Основные направления создания новых композиционных материалов для вставок токоприемников электротранспорта / В.Г. Сыченко, Ю.Л. Большаков, С.М. Жуковин, И.С. Гершман // Вісник Дніпропетровського національного технічного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна. – 2006. – Вип. 13. – С. 14 – 20.
13. Сиченко В.Г. До питання розробки активного фільтру тягової підстанції постійного струму / В.Г. Сиченко, В.А. Зубенко, М.П. Бадьор // Залізничний транспорт України. – 2006. – № 5. – С. 39 – 41.
14. Сыченко В.Г. К вопросу выбора рациональной формы профиля контактных вставок токоприемников электроподвижного состава / В.Г. Сыченко, Ю.Л. Большаков, И.С. Гершман, С.М. Жуковин // Залізничний транспорт України. – 2007. – № 3. – С. 53 – 55.
15. Сыченко В.Г. Исследование электрического поля полимерных изоляторов с внутренним электрическим дефектом / В.Г. Сыченко, Є.Д. Ким, В.Л. Колмиков // Залізничний транспорт України. – 2007. – № 5. – С. 61 – 63.
16. Сыченко В.Г. К вопросу о токосяеме и износе контактного провода / В.Г. Сыченко, Ю.Л. Большаков, И.С. Гершман // Залізничний транспорт України. – 2008. – № 1. – С. 55 – 56.
17. Сиченко В.Г. Підвищення довговічності та надійності стійок залізобетонних опор контактної мережі / В.Г. Сиченко, О.М. Полях, О.С. Кучмій // Підйомно-транспортна техніка. – 2008. – № 2. – С. 70 – 80.
18. Сыченко В.Г. Энергоэффективный преобразовательный агрегат с функциями фильтрации гармоник выходного напряжения тяговой подстанции системы электроснабжения постоянного тока напряжением 3 кВ / В.Г. Сыченко, В.М.

Самсонкин, Н.В. Панасеко, В.В. Божко, Ю.П. Гончаров, А.В. Ересько, В.В. Замаруев, Р.И. Любич // Вісник Дніпропетровського національного технічного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 20. – С. 66 – 72.

19. Сыченко В.Г. Комплексные экологические угрозы при токобъеме на транспортных средствах / В.Г. Сыченко, О.А. Сидоров, К.С. Дударева // Мир транспорта. – 2008. – № 4. – С. 112-119.

20. Сыченко В.Г. Методика оценки остаточного ресурса тарельчатых фарфоровых изоляторов / В.Г. Сыченко, Е.Д. Ким, В.Н. Таран // Вісник Дніпропетровського національного технічного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 24. – С. 61 – 67.

21. Сыченко В.Г. Оцінка ефективності функціонування пасивних згладжуючих фільтрів тягових підстанцій постійного струму / В.Г. Сыченко, В.А. Зубенко // Вісник Дніпропетровського національного технічного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 25. – С. 63 – 68.

22. Сыченко В.Г. Дослідження показників якості електричної енергії на тягових підстанціях постійного струму / В.Г. Сыченко, В.А. Зубенко, Д.О. Босий, М.О. Фесик, В.М. Козачок, В.М. Коротун // Гірничая електромеханіка та автоматика. Науково-технічний збірник НГУ. – 2008. – Вип. 81. – С. 53 – 60.

23. Пат. 44517 H02M 1/14 Силовой активный фильтр постоянного струму / Сыченко В.Г., Зубенко В.А.; заявник та власник Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. - № заявки 4451; дата публікації 12.10.2009. Бюл. № 19

24. Пат. 44580 H02M 1/14, H02H 7/12 Пристрій захисту статичного інвертора активного фільтра постійного струму / Сыченко В.Г., Зубенко В.А.; заявник та власник Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. - № заявки 44580; дата публікації 12.10.2009. Бюл. № 19

25. Сыченко В.Г. Проблеми електромагнітної сумісності підсистеми електричної тяги постійного струму і використання засобів силової електроніки для їх вирішення / В.Г. Сыченко, М.В. Панасенко, Ю.П. Гончаров // Електротехніка та електроенергетика. – 2009. – Вип. 2. – С. 22 – 29.

26. Сыченко В.Г. Исследование влияния устройств регулирования напряжения тяговой подстанции постоянного тока / В.Г. Сыченко, М.П. Бадер, В.П. Семенчук // Вісник Дніпропетровського національного технічного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 26. – С. 39 – 42.

27. Сыченко В.Г. Опыт исследования старения линейных полимерных изоляторов / В.Г. Сыченко, Е.Д. Ким, В.Л. Калмыков, В.И. Кизим // Вісник Харківського національного технічного університету. – 2009. – Вип. 27. – С. 62 – 70.

28. Сыченко В.Г. Тяговый частотно-регулируемый преобразователь с активным фильтром и комбинированной схемой защиты в аварийных режимах / В.Г. Сыченко, Н.И. Сергиенко, Ю.П. Гончаров, Н.В. Панасенко // Залізничний транспорт України. – 2009. – № 2. – С. 9 – 16.

29. Сыченко В.Г. Электростатические характеристики линейных изоляторов для контактных сетей железных дорог / В.Г. Сыченко, Е.Д. Ким, В.Л. Калмыков // Вісник Дніпропетровського національного технічного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 27. – С. 72 – 76.

30. Сыченко В.Г. Защита инвертора силового активного фильтра тяговых подстанций постоянного тока при аварийных режимах в тяговой сети / В.Г. Сыченко, В.А. Зубенко // Технічна електродинаміка, Темат. вип. Силова електроніка та енергоефективність. – 2009. – Ч. 1. – С. 43 – 46.
31. Сыченко В.Г. Концепция обновления и перспективы технического развития систем тягового электроснабжения / В.Г. Сыченко, М.П. Бадер // Технічна електродинаміка, Темат. вип. Силова електроніка та енергоефективність. – 2009. – Ч. 2. – С. 88 – 93.
32. Сыченко В.Г. Противокоррозионная защита опор контактной сети в зоне станций стыкования / В.Г. Сыченко, В.А. Дьяков, О.И. Гилевич, В.Г. Дзюман, А.В. Дьяков // Залізничний транспорт України. – 2009. – № 5. – С. 26-27.
33. Сыченко В.Г. Дослідження якості електричної енергії в лініях автоблокування та повздовжнього електропостачання на електрифікованих ділянках постійного струму / В.Г. Сыченко // Гірничя електромеханіка та автоматика. Науково-технічний збірник Н. – 2009. – Вип. 83. – С. 57-65.
34. Сыченко В.Г. Электроживлення систем залізничної автоматики / В.Г. Сыченко, В.І. Гаврилюк – Дніпропетровськ.: Вид-о Маковецький, 2009. – 372 с.
35. Пат. 51917 Н02М 7/00 Перетворювальний агрегат для тягової підстанції постійного струму / Сыченко В.Г., Панасенко Н.В., Гончаров Ю.П., Божко В.В.; № заявки 51917; дата публікації 10.08.2010. Бюл. № 15
36. Сыченко В.Г. Методологічні засади забезпечення електромагнітної сумісності електрифікованих ліній постійного струму / В.Г. Сыченко // Вісник Дніпропетровського національного технічного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 31. – С. 85-88.
37. Сыченко В.Г. Ограничение спектра периодических сигналов обратных связей в силовых активных фильтрах для систем электроснабжения контактных сетей / В.Г. Сыченко, Ю.П. Гончаров, В.В. Замаруев, А.Е. Иванов, Ю.В. Чурсина, Н.В. Панасенко // Гірничя електромеханіка та автоматика. Науково-технічний збірник НГУ. – 2010. – Вип. 84. – С. 28-38.
38. Сыченко В.Г. Моделирование электротягового навантаження у задачах електромагнітної сумісності електрифікованих залізниць постійного струму / В.Г. Сыченко, Є.М. Гайсьонюк // Технічна електродинаміка, Темат. вип. Силова електроніка та енергоефективність. – 2010. – Ч. 2. – С. 185-188.
39. Сыченко В.Г. Принципы активной фильтрации при побудові сучасних систем електроживлення електричної тяги / В.Г. Сыченко, Ю.П. Гончаров, М.В. Панасенко, В.І. Гаврилюк // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2011. – Вип. 1. – С. 18-27.
40. Сыченко В.Г. Дослідження електромагнітних процесів у системі тягового електропостачання постійного струму: проблеми, технічні засоби та реалізація / В.Г. Сыченко, В.А. Зубенко, Д.О. Босий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011. – № 2. – С. 58-63.
41. Сыченко В.Г. Показники якості електроживлення у тягових мережах постійного струму / В.Г. Сыченко // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. Спец. випуск – К.: ІЕД НАНУ, 2011. – Ч. 2. – С 5-13.

42. Сиченко В.Г. Захист від перенапруг електротягових мереж постійного струму: методологія вибору ОПН. / В.Г. Сиченко, Є.Д. Кім // Вісник Дніпропетровського національного технічного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна. – 2011. – Вип. 37. – С. 82-93.
43. Сыченко В.Г. Выпрямители с комбинированной фильтрацией для присоединения к системам переменного тока с выраженными резонансными свойствами / В.Г. Сыченко, Е.И. Сокол, Ю.П. Гончаров, В.В. Замаруев, В.В. Ивахно, С.Ю. Кривошеев, Н.В. Данилов, К.Г. Смирнов // Гірнича електромеханіка та автоматика. Науково-технічний збірник НГУ. – 2011. – Вип. 86. – С. 54-62.
44. Сиченко В.Г. Моделювання електромагнітних процесів у тяговій мережі постійного струму./ В.Г. Сиченко // Вісник Дніпропетровського національного технічного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна. – 2011. – Вип. 38. – С. 73-76.

АНОТАЦІЯ

Сиченко В.Г. Розвиток наукових основ підвищення електромагнітної сумісності підсистем електричної тяги постійного струму залізничного транспорту. – 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 – підвищенню електромагнітної сумісності підсистем електричної тяги постійного струму в умовах впровадження швидкісного руху, що покращить техніко-економічні показники перевізного процесу, його енергоефективність та безпеку.

В результаті еспериментальних досліджень розроблено математичні моделі завад, що дозволить точніше проектувати та моделювати пристрої енергетичних каналів тягового електропостачання постійного струму.

Отримала подальший розвиток методологія активної фільтрації, що призводить до підвищення електромагнітної сумісності підсистем електричної тяги постійного струму як з суміжними пристроями залізничної інфраструктури, так і з лініями зовнішнього електропостачання при зменшенні габаритних розмірів та встановленої потужності застосовуваного обладнання. Очікуваний економічний ефект від впровадження запропонованих рішень перевищує 4 млн. грн.

Отримані наукові результати дозволяють надати рекомендації щодо проектування нових енергоефективних електромагнітнотсумісних перетворювачів комбінованої ідеології для модернізації тягових підстанцій та силових активних фільтрів на підстанціях з застарілим обладнанням.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, тягове електропостачання, випрямляч, активна фільтрація, показники якості електроживлення, моделі електромагнітних завад.

АННОТАЦИЯ

Сыченко В.Г. Развитие научных основ повышения электромагнитной совместимости подсистем электрической тяги постоянного тока железнодорожного транспорта. - 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 - повышению электромагнитной совместимости подсистем электрической тяги постоянного тока в условиях внедрения скоростного движения, которое улучшит технико-экономические показатели перевозочного процесса, его энергоэффективность и безопасность.

Рассматривая ЭМС, как один из показателей качества функционирования системы тягового электроснабжения, необходимо охватывать весь комплекс технических средств, которые задействованы в процессе передачи и потребления электроэнергии и учитывать, что система тягового электроснабжения представляет собой сложную электродинамическую распределенную систему, которая характеризуется стохастическим характером изменения параметров функционирования. Эти параметры изменяются в пространстве, плоскости и времени, изменяя электромагнитную обстановку в комплексе система тягового электроснабжения-смежные устройства (линии внешнего энергоснабжения, автоблокировки и продольного электроснабжения, линии связи, информационные каналы передачи данных, каналы телеуправления и телесигнализации, рельсовые цепи). Основой этого влияния является распространение кондуктивных помех через разнообразные гальванические связи.

В результате экспериментальных исследований установлено, что питающие напряжения 110 кВ и 35 кВ превышают предельно допустимые значения. Уровень напряжения на шинах 10 кВ, от которых питаются тяговые трансформаторы, также превышает номинальное значение, но на уровне, в основном, нормально допустимого значения отклонения. Несимметрия напряжения, как на шинах 110 кВ, так и на шинах 35-10 кВ, находится в допустимых пределах. Качество электроэнергии за показателем искажения синусоидальности напряжения на шинах 10 кВ тяговых подстанций с 6-пульсовыми выпрямителями не отвечает требованиям стандарта. Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности в линиях автоблокировки (АБ) значительно более высокий (более чем в 3 раза) в сравнении с линиями продольного электроснабжения (ПЭ), что побуждает ставить вопрос необходимости симметрирования напряжений в линиях АБ. Коэффициент искажения синусоидальности напряжения в линии АБ на тяговой подстанции с 12-пульсовой схемой выпрямления значительно превышает предельно допустимое значение и почти вдвое выше за K_U в линии ПЭ. При этом K_U и на тяговой подстанции с 6-пульсовой схемой выпрямления выше по сравнению с линией ПЭ. То есть, существующая идеология питания линии АБ с применением двойной трансформации, выполняя задание ограничения токов короткого замыкания и

гальванической развязки, в сущности резко ухудшает качество электрической энергии, которая формирует условия ухудшения электромагнитной совместимости.

Исследованиями также установлено, что изменение нагрузки тяговой подстанции практически не осуществляет влияния на показатели качества электрической энергии системы внешнего электроснабжения. Режимы напряжения как в системе тягового электроснабжения, так и в системе внешнего электроснабжения определяются случайными факторами и имеют слабую статистическую связь между собой.

Разработанные математические модели помех, позволят точнее проектировать и моделировать устройства энергетических каналов тягового электроснабжения постоянного тока.

Отмечается, что энергетические каналы (ЭК) тягового электроснабжения должны обеспечивать надежность и бесперебойность питания, стойкость к непредсказуемым влияниям и высокую энергоэффективность. На современном этапе, кроме указанного, они должны быть электромагнитносовместимыми с окружающей средой на всех уровнях передачи, превращения и потребления электрической энергии. Указанные процессы обеспечиваются рядом разнообразных устройств, образующих, собственно, ЭК: линии электропередачи, трансформаторы, преобразователи, инфраструктура тяговой сети и потребители электрической энергии. Рассматриваются направления усовершенствования ЭК и возможные варианты их схемной реализации. Перспективными являются структуры децентрализованного питания и разработка систем питания с промежуточным звеном повышенной частоты.

Основными устройствами энергетических каналов системы тягового электроснабжения являются тяговые преобразователи. Современный выпрямитель является сложным, многофункциональным устройством и выполняется на принципах комбинированной идеологии с расширенными функциями, в том числе осуществление функции активной фильтрации.

В работе получила дальнейшее развитие методология активной фильтрации, которая приводит к повышению электромагнитной совместимости подсистем электрической тяги постоянного тока как со смежными устройствами железнодорожной инфраструктуры, так и с линиями внешнего электроснабжения при уменьшении габаритных размеров и установленной мощности применяемого оборудования. Ожидаемый экономический эффект от внедрения предложенных решений превышает 4 млн. грн.

Полученные научные результаты позволяют предоставить рекомендации для проектирования новых энергоэффективных электромагнитносовместимых преобразователей комбинированной идеологии для модернизации тяговых подстанций и силовых активных фильтров на подстанциях с устаревшим оборудованием.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, тяговое электроснабжение, выпрямитель, активная фильтрация, показатели качества электропитания, модели электромагнитных помех.

THE SUMMARY

Sitchenko V.G. Development of scientific fundamentals of improving the electromagnetic subsystems compatibility of DC electric traction railways. - 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.

Thesis is dedicated to solve scientific and technical problems - improve electromagnetic compatibility of alternative current electric traction subsystems in a high-speed lines that will make possible to improve technical and economic characteristics of transportation process, its efficiency and security.

On the basis of experimental studies the author developed mathematical models of disturbances, that will make possible to design and simulate devices of power traction DC supply systems in a more accurate way.

The author developed the methodology of active filter, that leads to improve the electromagnetic compatibility of electric DC traction subsystems with adjoining devices of railway infrastructure and with external power supply systems reducing the overall dimensions and installed capacity of the applicable equipment. Expected economic effect of proposed approach exceeded 4 million grn.

Proposed results can provide propositions about designing of new energy converters on the basis of combined ideology for modernization of traction substations and power active filters of substations with aging equipment.

Keywords: electromagnetic compatibility, traction power supply, rectifier, active filter, power quality indexes, models of electromagnetic disturbances.

Сиченко Віктор Григорович

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ПІДВИЩЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ
СУМІСНОСТІ ПІДСИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Формат 60x84 1/16. Папір для множильних апаратів. Різограф.
Ум. друк. арк. 2,0. Обл.-вид. л. 1,0. Тираж 100 прим.

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.diitrvv.dp.ua