

МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

БОСИЙ ДМИТРО ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 621.331.3.025.1

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ ЗМІННОГО СТРУМУ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту та зв'язку України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук
Сиченко Віктор Григорович,
Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
Міністерства транспорту та зв'язку України,
завідувач кафедри електропостачання залізниць.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Шкрабець Федір Павлович,
Національний гірничий університет
Міністерства освіти і науки України,
м. Дніпропетровськ,
завідувач кафедри електричних машин;

кандидат технічних наук, доцент
Довгалюк Оксана Миколаївна,
Харківська національна академія міського господарства
Міністерства освіти і науки України, м. Харків,
доцент кафедри електропостачання міст.

Захист відбудеться «___»_____2010 р. о ___годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2, ауд. 314.

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

Автореферат розісланий «___»_____2010 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 08.820.01,
доктор технічних наук, професор

Костін М.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Залізничний транспорт є базовою галуззю економіки України, що забезпечує потреби у внутрішніх та міжнародних перевезеннях. Найбільш енергоефективними є перевезення саме електрифікованими залізницями за системами змінного та постійного струму, співвідношення яких практично рівні. Проте залізниці змінного струму є споживачами з нелінійними та несиметричними навантаженнями і вони відповідно до ГОСТ 13109-97 безпосередньо виступають джерелами порушення показників якості електроенергії за несинусоїдністю та несиметрією напруги. На початку електрифікації ділянок несиметрія напруги на приєднаннях тягових підстанцій змінного струму не перевищувала гранично допустимого значення: у 1970 році найбільше значення несиметрії складало 1,7 %; у 1982 році – спостерігалось зростання до 2,3 %. Протягом останніх десятиріч коефіцієнт несиметрії напруги вже перевищує гранично допустиме значення, його максимум за даними 2008 року складає 4,7 %.

Окрім порушення показників якості електроенергії, електрифіковані залізниці є потужними джерелами виникнення перетікань реактивної потужності. Середньорічні коефіцієнти реактивної потужності для електрифікованих залізниць змінного струму змінюються в межах 0,63...0,74. Таке високе значення $\text{tg}\phi$ свідчить про зниження ефективності споживання електричної енергії в системах тягового електропостачання змінного струму внаслідок основних втрат від перетікань реактивної електроенергії та додаткових втрат внаслідок несиметрії первинних струмів тягової підстанції.

Крім низької ефективності споживання електроенергії та відповідних втрат активної потужності, постійно зростає плата за перетікання реактивної електроенергії. Наприклад, за 2008 рік вона досягла найбільшого за останні роки значення – майже 1,4 % від плати за активну електроенергію.

У зв'язку з вищенаведеним, зниження перетікань реактивної електроенергії та несиметрії напруги тягових підстанцій змінного струму є актуальною задачею, вирішення якої дозволить підвищити ефективність електропостачання систем електричної тяги змінного струму.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Робота виконана у відповідності з Постановою Кабінету Міністрів України від 23.04.1999 р. № 661 «Про заходи державної підтримки залізничного транспорту», «Програмою енергозбереження на залізничному транспорті України на період 1996 – 2010 роки», схваленої рішенням техніко-економічної ради Укрзалізниці від 26.06.1996 року.

Обрані дослідження безпосередньо пов'язані з виконанням науково-дослідних робіт у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за наступними темами: «Розробка концепції енергетичної стратегії Укрзалізниці на період до 2010 та на перспективу до 2020 р.» (№ ДР 0106U005700); «Дослідження впливу рекуперації при русі поїздів змінного струму на якість електроенергії в первинній мережі та

розробка рекомендацій» (№ ДР 0107U010376); «Розробка нормативної документації Пам'ятки ОСЗ «Рекомендації по компенсаційним пристроям тягових підстанцій 25 кВ, 50 Гц» (№ ДР 0108U008043); «Дослідження забезпечення пропускної спроможності пристроями електропостачання при електрифікації ділянок К–Б, З–Д» (№ ДР 0108U010671); «Дослідження підвищення ефективності використання автоматичної компенсації реактивної потужності на тяговій підстанції Ч», (№ ДР 0109U002984).

Основні результати дисертаційної роботи отримано в результаті виконання вказаних досліджень, у яких дисертант виступав виконавцем і є співавтором звітів із зазначених науково-дослідних робіт.

Мета роботи. Метою роботи є підвищення ефективності електропостачання системи електричної тяги змінного струму за рахунок зниження втрат електроенергії від перетікань реактивної електроенергії та несиметрії первинних струмів тягової підстанції, здійсненого шляхом удосконалення керування пристроями регульованої компенсації реактивної потужності.

Задачі досліджень.

1. Проаналізувати ефективність застосування існуючих пристроїв симетрування на тягових підстанціях змінного струму.

2. Удосконалити математичну модель системи тягового електропостачання для визначення перетікань реактивної електроенергії та несиметрії первинних струмів тягової підстанції змінного струму з врахуванням різних кутів навантаження в плечах живлення тягової підстанції.

3. Визначити характеристики режимів роботи тягових підстанцій змінного струму на основі експериментальних досліджень, оцінити адекватність удосконаленої математичної моделі.

4. Розробити методику визначення струмів компенсації реактивної потужності для зменшення перетікань реактивної електроенергії та одночасного зниження несиметрії первинних струмів тягової підстанції.

5. Уточнити критерії керування пристроями регульованої компенсації реактивної потужності для тягових підстанцій змінного струму.

6. Удосконалити систему автоматичного керування регульованими пристроями компенсації використанням розробленої методики визначення струмів компенсації.

7. Дослідити вплив розробленої методики визначення струмів компенсації на ефективність електропостачання системи електричної тяги змінного струму.

8. Розробити та запропонувати структуру системи оптимального керування компенсуючими пристроями тягових підстанцій змінного струму.

Об'єкт досліджень – процес компенсації реактивної потужності в умовах різних струмів та кутів навантаження в плечах живлення тягової підстанції змінного струму.

Предмет досліджень – втрати електроенергії тягової підстанції змінного струму, які викликані перетіканнями реактивної електроенергії та зумовлені зниженням показників якості електроенергії.

Методи досліджень – методи статистичного, спектрального, кореляційного аналізів, імітаційне моделювання. Обробка результатів експериментальних досліджень виконана на ЕОМ з використанням програмних засобів Excel, MathCad, SigView. Імітаційне моделювання виконувалось у власно створеній програмі ІМЕМС, у спеціалізованому пакеті Multisim та у середовищі MatLab.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше отримано аналітичний вираз раціональних струмів компенсації в залежності від значень струмів плечей живлення тягової підстанції та коефіцієнтів, які визначаються кутами навантажень, що дозволило побудувати ефективну систему керування пристроями регульованої компенсації, застосування якої на тягових підстанціях змінного струму знижує втрати активної електроенергії від перетікань реактивної електроенергії та від несиметрії струмів в обмотках трансформатора і первинній мережі.

2. Запропоновано критерії ефективного керування процесом компенсації реактивної потужності, які відрізняються від існуючих врахуванням випадкового характеру їх зміни, а також різниці кутів навантаження в плечах живлення тягової підстанції, що дозволило визначити сумарні збитки від перетікань реактивної електроенергії та несиметрії струмів і напруги й у подальшому оцінити оптимальні параметри та закон керування компенсуючими пристроями.

3. Встановлено закономірність і вперше отримано аналітичне співвідношення впливу струмів зворотної послідовності тягової обмотки на несиметрію напруги в районній обмотці тягового трансформатора, що дозволило правильно визначити граничне значення (12 %) коефіцієнту несиметрії струмів за зворотною послідовністю й тим самим точно оцінити ступінь несиметрії напруги та втрати електроенергії від неї на районній обмотці.

4. Одержав подальший розвиток метод визначення ступеню несиметрії струмів тягової підстанції, який відрізняється від існуючих врахуванням різних величин і стохастичного характеру зміни струмів і кутів навантаження в плечах живлення тягової підстанції, що практично реалізовано в розроблених пристроях компенсації і при розрахунках втрат електроенергії з врахуванням несиметрії струмів.

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

Практичне значення одержаних результатів.

1. Отриману залежність струмів компенсації від величини струмів та кутів навантаження в плечах живлення рекомендується застосовувати в системах керування регульованими пристроями компенсації реактивної потужності при їх впровадженні на тягових підстанціях змінного струму.

2. Рекомендації по застосуванню регульованих пристроїв компенсації реактивної потужності використано при розробці нормативного документу Р-610 Пам'ятки Організації Співдружності Залізниць «Рекомендації по компенсаційним пристроям тягових підстанцій 25 кВ, 50 Гц».

3. Розроблені рекомендації по удосконаленню автоматично регульованих пристроїв компенсації реактивної потужності прийнято до використання Знам'янською та Котовською дистанціями електропостачання Одеської залізниці та можуть бути розповсюджені на інші тягові підстанції змінного струму.

4. Основні теоретичні положення, методи імітаційного моделювання, а також прикладні результати дисертації можуть бути використані у навчальному процесі при підготовці аспірантів, магістрів і спеціалістів на кафедрі «Електропостачання залізниць» у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Особистий внесок здобувача. Постановку мети та задачі дослідження виконано спільно з науковим керівником. У публікаціях, в яких відображено основні результати дисертації і які написані в співавторстві, автору належить: в [1] – розробка статистичних моделей різних типів електротягового навантаження змінного струму; [3] – розрахунки та аналіз втрат електроенергії в тяговій мережі при різних схемах живлення та різних варіантах виконання графіку руху поїздів; [4] – статистична обробка та аналіз експериментальних досліджень напруги на струмоприймачі електровозу; [5] – обробка даних експерименту для апроксимації залежності коефіцієнта реактивної потужності від значення повного струму електровозу; [6] – визначення статистичних характеристик, розрахунок автокореляційних функцій та їх аналіз; [7] – визначення оптимальних струмів компенсації через простори станів; [9] – аналіз існуючих способів симетрування тягового навантаження, умова для досягнення мінімуму струмів зворотної послідовності. Роботи [2], [8] написано самостійно без співавторів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались і одержали схвалення на наступних восьми міжнародних науково-технічних конференціях:

- 66-й «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпропетровськ, 2006 р.;
- 1-й «Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті», Дніпропетровськ, 2007 р.;
- 1-й, 2-й та 3-й «Електрифікація залізничного транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО», Місхор, 2007, 2008, 2009 р.р.;
- 6-й «Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств «EPQ-2008», Маріуполь, 2008 р.;
- «Транспортні зв'язки. Проблеми та перспективи», Дніпропетровськ, 2008 р.
- «Трансбалтика 2009», Дніпропетровськ, 2009 р.;
- «Силова електроніка та енергоефективність «СЕЕ-2009», Алушта, 2009 р.;
- «Проблемы и перспективы развития транспортного комплекса: образование, наука, производство», Рост. гос. ун-т путей сообщения, Ростов н/Д, 2009.

У повному обсязі дисертація доповідалась на засіданні кафедри «Електропостачання промислових підприємств» Приазовського державного технічного університету (м. Маріуполь) та семінарі Наукової Ради НАН України «Розробка та удосконалення пристроїв та систем електричного транспорту».

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано у 22 наукових публікаціях, з них: 8 – у фахових виданнях, 1 – патент на корисну модель; 13 – у тезах доповідей та матеріалах міжнародних науково-практичних конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації становить 165 сторінок, серед них 86 рисунків за текстом, з них 6 рисунків розташовано на 3 окремих сторінках, 12 таблиць за текстом, список використаних джерел зі 118 найменувань – на 14 сторінках, додатки – на 7 сторінках. Основний текст роботи викладено на 141 сторінці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У *першому розділі* проаналізовано існуючі та нові схемні рішення для зниження несиметрії струмів в обмотках трансформаторів тягових підстанцій змінного струму та компенсації реактивної потужності. У хронологічній послідовності критично розглянуто основні публікації по досліджуваній задачі та встановлено, що схемні рішення по симетруванню навантаження тягових підстанцій змінного струму містять ряд недоліків, а саме, складність виготовлення електрообладнання через застосування нетипових симетруючих трансформаторів або приставок і значні капітальні витрати при модернізації тягових підстанцій. Крім того, жодне з рішень не враховує різних кутів навантаження в плечах живлення.

Значний вклад у вивчення задачі підвищення ефективності систем тягового електропостачання змінного струму внесли такі вчені та дослідники: Марквардт К. Г., Мамошин Р. Р., Тамазов А. І., Бородулін Б. М., Герман Л. А., Черемісін В. Т., Зажирко В. М., Влас'євський С. В., Коробков Г. В., Кондратьєв Ю. В., Пашкова Н. В., Сероносов В. В., Машкін А. Г. та інші.

У *другому розділі* викладено методологію удосконалення математичної моделі системи електропостачання електричної тяги змінного струму для визначення ефективності застосування існуючих пристроїв симетрування та компенсації реактивної потужності з врахуванням різних кутів навантаження в плечах живлення тягової підстанції. Удосконалена математична модель базується на модифікованому матричному методі розрахунку миттєвих схем, який дозволяє більш швидко отримати результат за рахунок поєднання з методом функцій струморозподілу. В моделі більш точно враховано вольт-амперні характеристики некерованих випрямлячів та намагнічувальні характеристики тягових трансформаторів електрорухомого складу, а також активні і обмінні характеристики електровозів змінного струму з керованими перетворювачами, які розраховані на основі статистичних моделей, отриманих дослідним шляхом.

Розрахунки первинних струмів електровозів різних типів на імітаційній моделі, які узгоджуються з експериментальними дослідженнями (рис. 1), показали їх помітну несинусоїдність, обумовлену роботою перетворювачів змінного струму в постійний. Несинусоїдність первинних струмів нових типів електровозів з керованими перетворювачами (ДСЗ, 2ЕС5К(Л)) значно більша, ніж у електровозів типу ВЛ80Т, що масово експлуатуються на залізницях України.

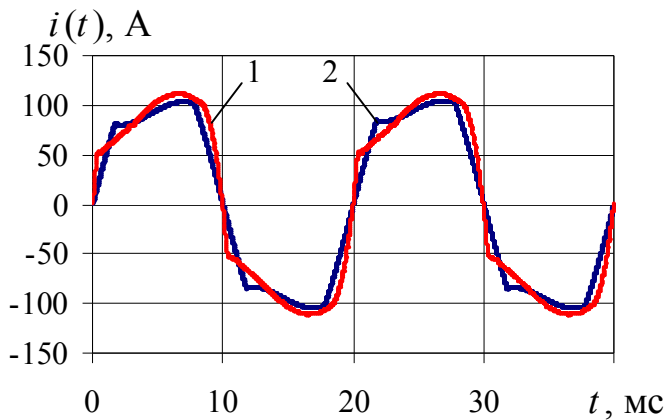


Рис. 1 – Осцилограми струмів електровозу ВЛ80Т: 1 – моделювання; 2 – експеримент

З огляду на складність моделювання режимів роботи електровозів з керованими перетворювачами, при моделюванні застосовуються їх статистичні моделі, визначені за осцилограмами первинного струму і напруги на струмоприймачі електровозу (рис. 2) в різних режимах роботи, які визначаються діючим значенням струму.

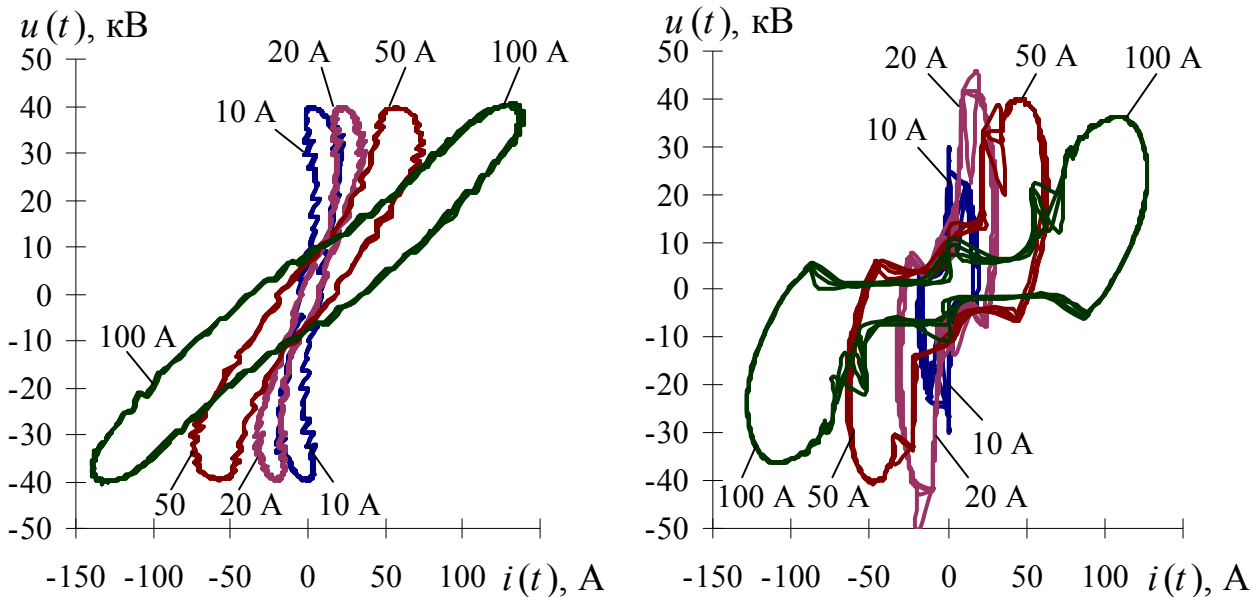


Рис. 2 – Статистичні моделі вольт-амперних характеристик електровозів ДСЗ та 2ЕС5К

Статистичні моделі вольт-амперних характеристик електровозів нових типів являють собою гістерезисні залежності, які зміщуються в бік менших значень струму від 100 до 10 А. Отримані в результаті експериментальних досліджень активні та обмінні характеристики електровозів мають спадаючий характер, максимальні відмінності у порівнянні з опублікованими характеристиками в літературі складають: для активної – 3,9 %; для обмінної – 53 %.

У *третьому розділі* приведено результати аналізу режимів роботи тягових підстанцій змінного струму на основі експериментальних досліджень показників якості електроенергії. В якості об'єкта дослідження обрана ділянка Одеської залізниці.

Аналіз відповідності вимірних показників якості електроенергії діючому стандарту показує, що найбільше вимоги порушуються за коефіцієнтом несиметрії напруги K_{2U} , який викликаний струмами зворотної послідовності. Якість електроенергії за цим показником (рис. 3) дотримується лише в первинній мережі (154 кВ) однієї підстанції, на інших приєднаннях – сумарна тривалість часу перевищення нормального допустимого значення K_{2U} (2 %) більше 5 % розглянутого періоду часу, що вказує на невідповідність стандарту ГОСТ 13109-97. Максимальне значення несиметрії напруги за зворотною послідовністю (4,7 %) зафіксовано на районній обмотці 35 кВ.

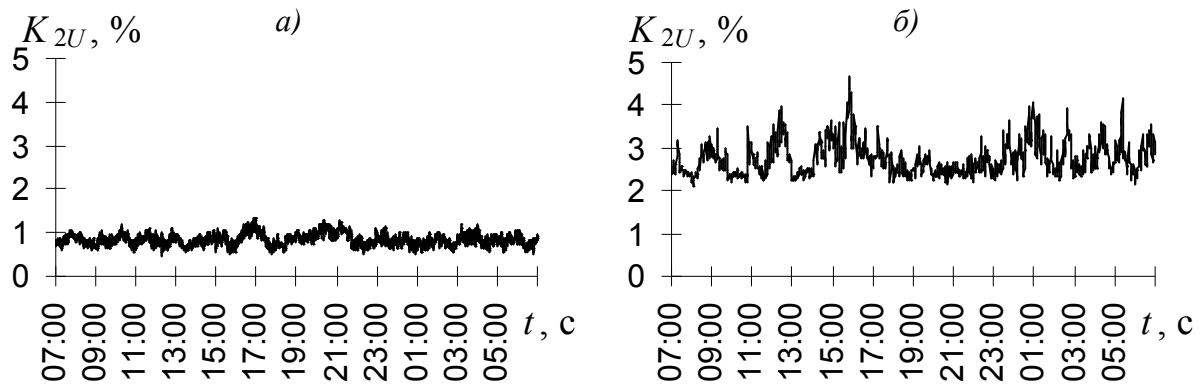


Рис. 3 – Коефіцієнти несиметрії напруги за зворотною послідовністю в первинній (а) та районній (б) мережі тягової підстанції

Напруга 27,5 кВ на шинах різних тягових підстанцій у квазістаціонарному режимі як з пристроями компенсації, так і без них являє собою випадковий стаціонарний процес з одномірним у перерізі розподілом імовірностей напруги за нормальним законом з математичним очікуванням $M(U) = 27,43$ кВ і дисперсією $D(U) = 0,234$ кВ² (рис. 4). В аварійних режимах роботи системи електропостачання напруга $U(t)$ являє собою нестаціонарний випадковий негаусовський процес з коливаннями математичного очікування $M(U)$ від 25,93 кВ до 27,87 кВ і дисперсією $D(U)$ від 0,079 кВ² до 0,203 кВ².

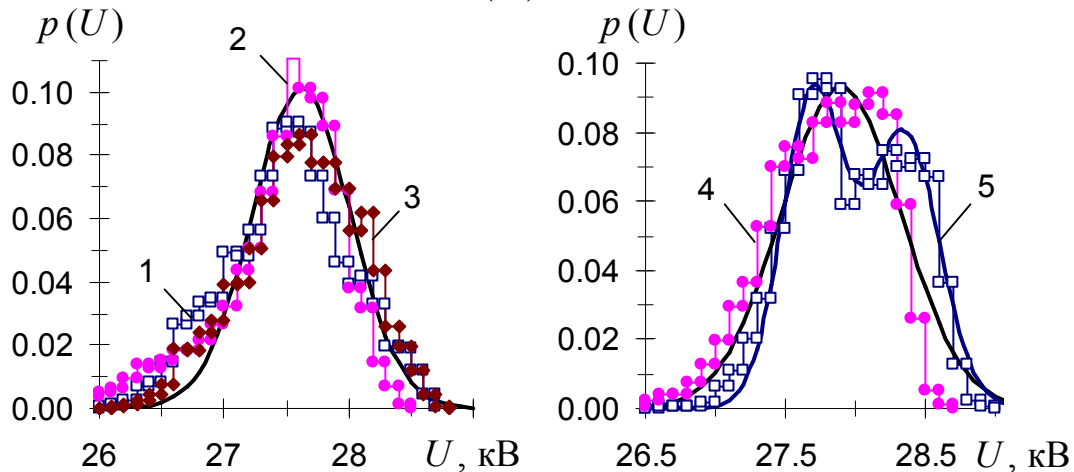


Рис. 4 – Емпіричні функції густини розподілів імовірностей напруги 27,5 кВ: 1, 2, 3 – квазістаціонарний режим; 4, 5 – нестаціонарний режим

Струми плечей живлення постійно змінюються в часі, для них характерні практично миттєві стрибки до значень 500 – 700 А. Кути навантажень в плечах живлення змінюються в досить широких межах від 20° до 85°, які відповідають значенням коефіцієнта реактивної потужності $\text{tg}\varphi = 0,364 \dots 11,430$ відповідно. Самі по собі струми в плечах живлення, та як наслідок, кути навантаження, є незалежними величинами, оскільки відсутній кореляційний зв'язок між величинами струмів лівого та правого плечей і кутів навантаження лівого та правого плеча (рис. 5). Коефіцієнти кореляції Пірсона становлять 0,02 (кореляція відсутня) та -0,28 (незначна від'ємна кореляція) відповідно.

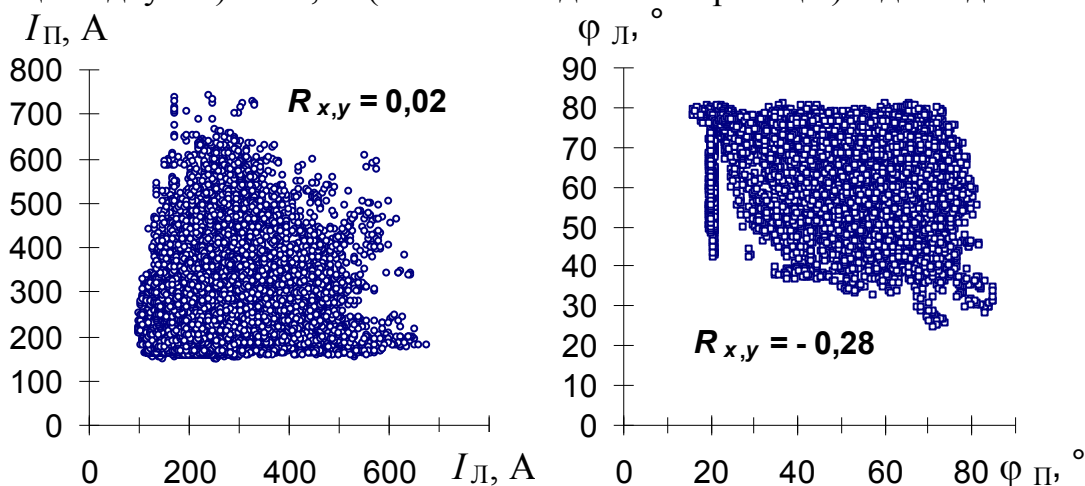


Рис. 5 – Діаграми розкиду величин струмів плечей та кутів навантажень

Для тягової підстанції зі звичайною схемою живлення характерний діапазон зміни струмів зворотної послідовності складає від 50 до 100 % струму прямої послідовності. З урахуванням кутів навантажень в плечах живлення коефіцієнт несиметрії струмів виходить з цього діапазону і, в окремих випадках, перевищує 100 %. Визначаючи регресію коефіцієнта несиметрії напруги відносно коефіцієнта несиметрії струму (рис. 6), можна отримати граничне значення коефіцієнту несиметрії струмів за зворотною послідовністю.

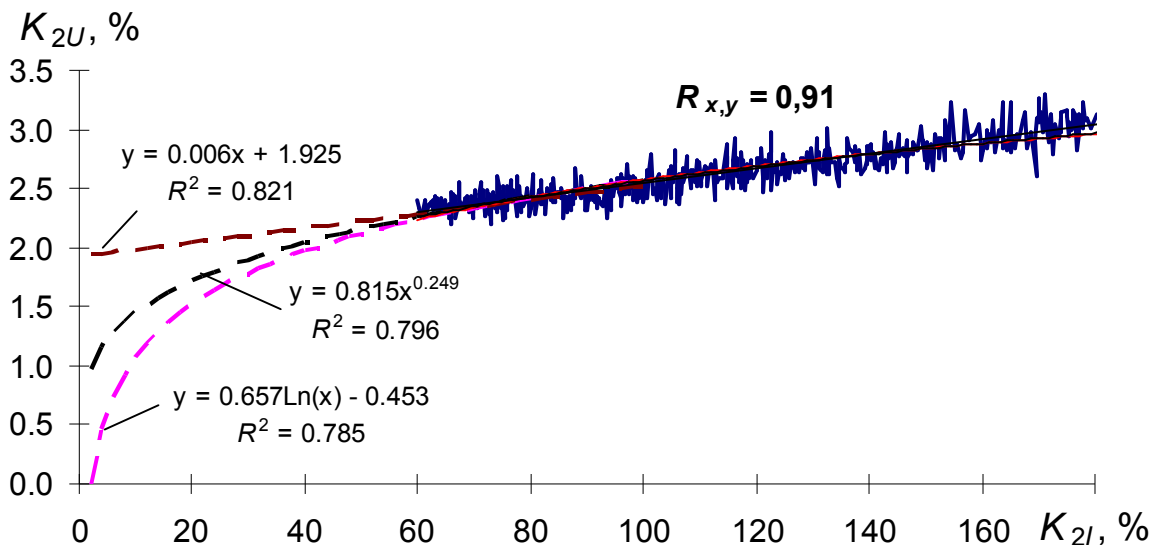


Рис. 6 – Залежність коефіцієнту несиметрії напруги від коефіцієнту несиметрії струмів тягової підстанції

Відповідно до виконаних в роботі розрахунків, величина несиметрії напруги на районній обмотці буде в нормально допустимих межах ($< 2\%$), якщо величина несиметрії струмів буде нижче 12% .

На підставі експериментальних досліджень виконано перевірку адекватності математичної моделі шляхом порівняння числових характеристик та інтегральних кривих розподілів імовірностей реалізації коефіцієнтів реактивної потужності та несиметрії напруги за зворотною послідовністю. Відносна похибка окремих числових характеристик виходить на рівні 10% . Крім того, максимальна різниця кривих інтегральних імовірностей розподілів за критерієм Смірнова не перевищила $0,25$, складаючи для $\text{tg}\varphi$: $D_{\max} = 0,031$ та K_{2U} : $D_{\max} = 0,145$, що дозволяє вважати удосконалену модель адекватною.

Ефективність впровадження симетруючих пристроїв прийнято визначати на основі залежностей коефіцієнта несиметрії струмів зворотної послідовності в первинній обмотці трансформатора від співвідношення струмів в плечах живлення тягової підстанції з припущенням рівності кутів навантаження. Результати моделювання (рис. 7) показують некоректність такого припущення та необхідність в подальшому враховувати, що кути навантаження різні.

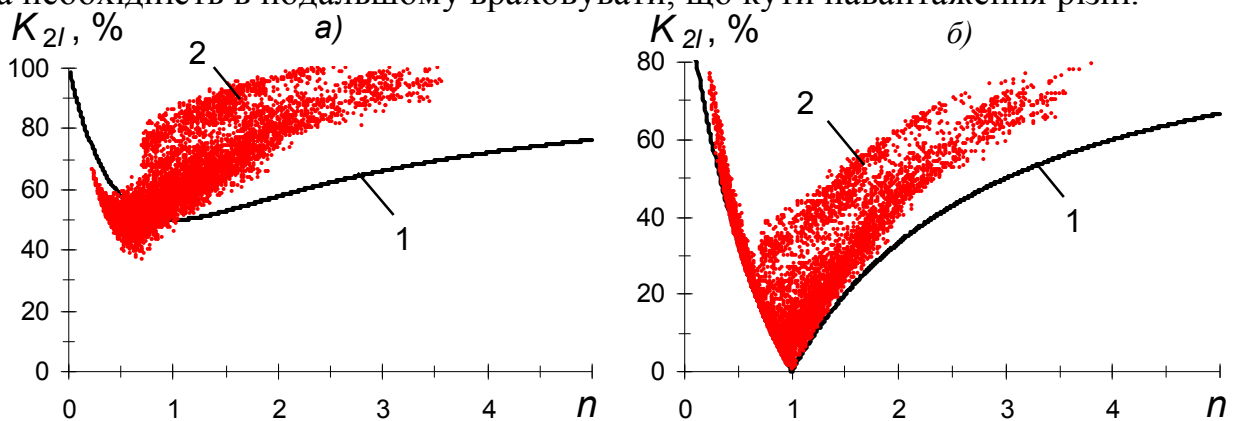


Рис. 7 – Коефіцієнт несиметрії струмів в залежності від співвідношення струмів плечей живлення для традиційної схеми (а) та схеми з ефектом Скотта (б):

1 – без врахування кутів навантажень; 2 – з врахуванням кутів навантаження

За допомогою побудованої в дисертації математичної моделі системи тягового електропостачання визначено як зміняться коефіцієнти реактивної потужності та несиметрії напруги за зворотною послідовністю на районній обмотці 35 кВ тягового трансформатора при застосуванні компенсації реактивної потужності у двох режимах та застосуванні схеми з ефектом Скотта (рис. 8).

Результати моделювання показали, що в режимі нерегульованої компенсації зменшується середнє значення $\text{tg}\varphi$ з $1,94$ до $0,3$. При цьому виникає режим перекомпенсації ($\text{tg}\varphi < 0$), в якому реактивна потужність генерується в первинну систему електропостачання; розширюється також діапазон зміни значень K_{2U} , складаючи при цьому $0..3,05\%$; значення K_{2U} з інтегральною імовірністю 95% , збільшується з $2,73$ до $2,83\%$, тобто застосування нерегульованої компенсації може додатково збільшити несиметрію напруги.

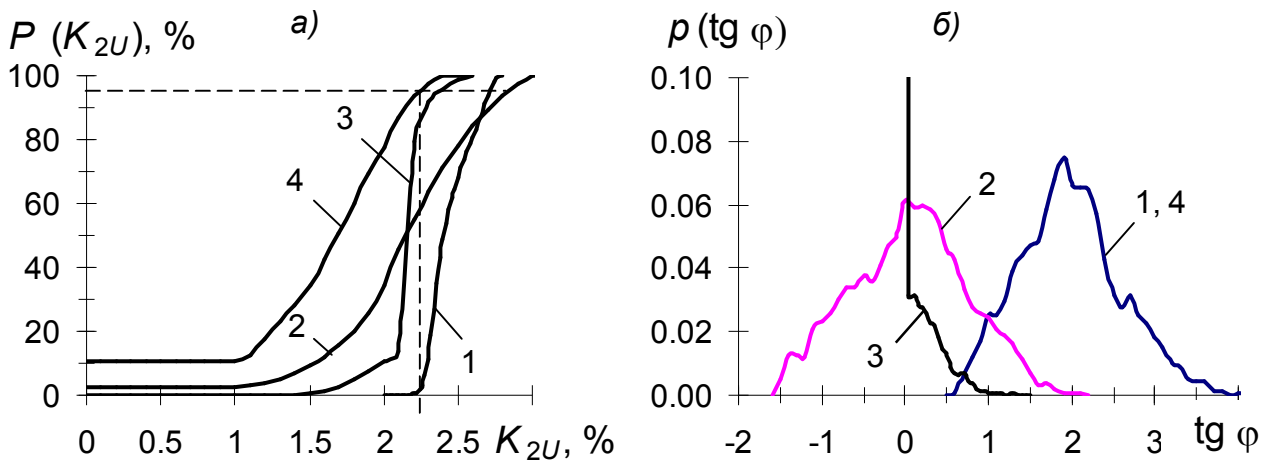


Рис. 8 – Інтегральні функції K_{2U} (а) та емпіричні розподіли $\text{tg } \varphi$ (б): 1 – без компенсації; 2 – нерегульована компенсація; 3 – автоматично регульована компенсація; 4 – схема з ефектом Скотта

В режимі автоматичного регулювання струмів компенсуючих пристроїв за умовою максимально можливої компенсації реактивної потужності в кожному плечі живлення значно знижується $\text{tg } \varphi$, в середньому до 0,08-0,1. Коефіцієнт несиметрії напруги K_{2U} у порівнянні з базовим варіантом (без компенсації) дещо знижується, проте так і не відповідає вимогам стандарту, оскільки значення K_{2U} з інтегральною імовірністю 95 % складає 2,38 %, що більше нормально допустимого 2,0 %.

Застосування симетруючих пристроїв, побудованих на ефекті Скотта, дозволяє найбільше знизити несиметрію напруги тягової підстанції у порівнянні з різними режимами компенсації реактивної потужності. Проте навіть при такій схемі живлення тягової мережі норми стандарту за коефіцієнтом K_{2U} не дотримуються. За результатами моделювання значення K_{2U} з імовірністю 95 % для симетруючих пристроїв складає 2,24 %. Крім цього, застосування симетруючих пристроїв не вирішує проблеми перетікань реактивної електроенергії, оскільки розподіл значень $\text{tg } \varphi$ по відношенню до базового варіанту не змінюється.

Четвертий розділ присвячено дослідженню можливості застосування регульованих пристроїв компенсації реактивної потужності для одночасного зниження перетікань реактивної електроенергії та зменшення несиметрії напруги.

В результаті теоретичних досліджень, виходячи з формул визначення симетричних складових та струмів у обмотках трансформатора, для визначення струмів компенсації реактивної потужності, які забезпечують повне симетрування струмів у обмотках трансформатора тягової підстанції, отримано таку аналітичну залежність:

$$\begin{pmatrix} |I_{C1}|^T \\ |I_{C2}|^T \end{pmatrix} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \begin{pmatrix} |I_L|^T \\ |I_{\Pi}|^T \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sin\left(\varphi_L - \frac{\pi}{6}\right) & -\cos \varphi_L \\ \cos \varphi_{\Pi} & \sin\left(\varphi_{\Pi} + \frac{\pi}{6}\right) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де I_{C1}, I_{C2} – шукані значення струмів компенсації в плечах живлення;
 I_L, I_{Π} – вихідні значення струмів плечей живлення;
 φ_L, φ_{Π} – кути навантажень в плечах живлення тягової підстанції.

Отримане рівняння (1) дозволяє визначити такі струми пристроїв компенсації реактивної потужності, за яких система первинних струмів тягової підстанції буде симетричною як за рівних, так і різних навантажень в плечах живлення. З векторної діаграми (рис. 9) також видно, що первинні струми зсунуті відносно

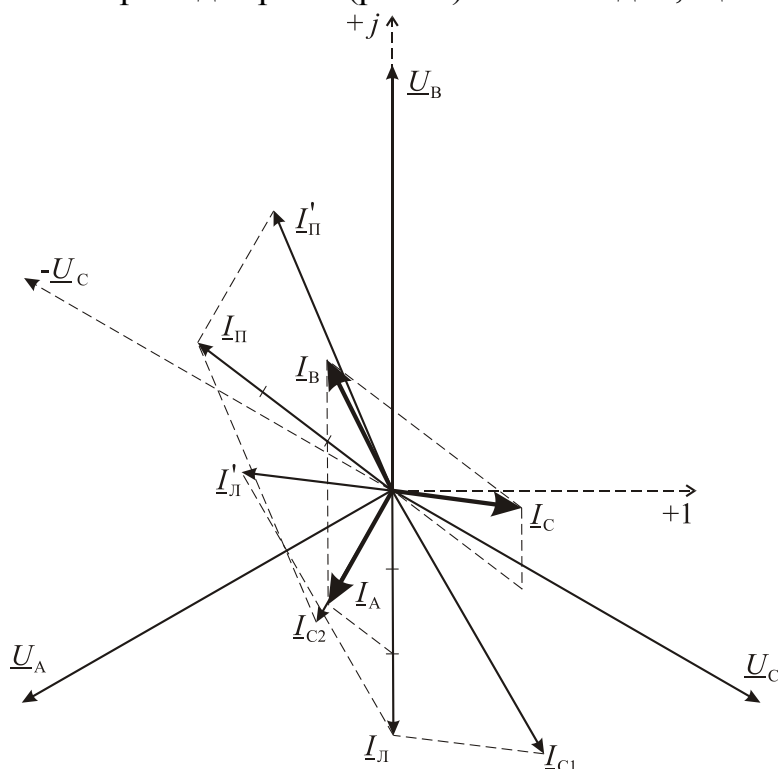


Рис. 9 – Векторна діаграма первинних струмів за умови компенсації реактивної потужності та різних струмів в плечах живлення

первинних напруг, що вказує на перетікання реактивної потужності між системою зовнішнього та тягового електропостачання. У наведеному випадку має місце «перекомпенсація» реактивної потужності. За інших співвідношень величин струмів плечей живлення виникне режим «недокомпенсації».

Уникнути перетікань реактивної електроенергії пропонується за рахунок не повного, а часткового зниження струмів зворотної послідовності до деякого критичного рівня (12 %), який відповідає нормованому значенню коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю в

районній мережі. В загальному випадку критерій оптимальності сформульовано у вигляді цільової функції, яка визначає сумарні збитки від перетікань реактивної електроенергії та втрат електроенергії внаслідок зниження показників якості

$$\Theta(I_{C1}, I_{C2}) = \Pi + \Phi + \Xi + \Upsilon + \mathbf{K} + \Lambda \rightarrow \min, \quad (2)$$

з обмеженнями, які встановлюються згідно з ГОСТ 13109-97.

В результаті виконаних експериментальних та теоретичних досліджень ефективності функціонування компенсуючих пристроїв на ділянках змінного струму встановлено, що оптимальне керування регульованою компенсацією реактивної потужності повинне базуватись на таких складових (2):

1. $\Pi = f(Q_{сп}, Q_{комп}, \text{tg}\varphi)$ – плата за перетікання реактивної електроенергії;
2. $\Phi = f[\text{tg}\varphi, Ex(\text{tg}\varphi), As(\text{tg}\varphi)]$ – збитки від втрат активної електроенергії внаслідок перетікань реактивної в системі електропостачання;

3. $\Xi = f(I_L, I_{\Pi}, \varphi_L, \varphi_{\Pi})$ – збитки внаслідок додаткових втрат активної електроенергії від несиметричних струмів тягової підстанції;

4. $\Upsilon = \{v_{1p}, v_{2p}, \dots, v_{kp}\}$ – збитки через додаткові втрати активної електроенергії від несинусоїдності струмів;

5. $K = f(\Xi, \Upsilon)$ – збитки сторонніх споживачів, пов'язані з несинусоїдністю та несиметричністю живлячої напруги від тягових підстанцій змінного струму;

6. $\Lambda = f(U_{I(1)}, \lambda, Q_{\text{КОМП}})$ – збитки в системі електропостачання, пов'язані з режимами напруги на суміжних підстанціях та вирівнювальними струмами.

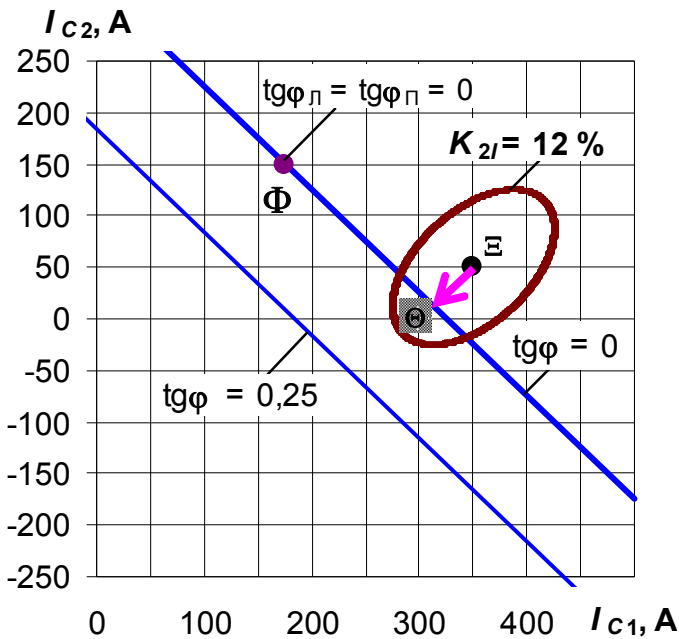


Рис. 10 – Визначення оптимальних струмів компенсації

На рис. 10 використано позначення: Ξ – точка з координатами, визначеними за формулою (1), що відповідає струмам компенсації, за яких система первинних струмів тягової підстанції є повністю симетричною; Φ – точка, координати якої відповідають струмам компенсації, за яких перетікання реактивної електроенергії в кожному плечі живлення відсутнє; Θ – точка оптимального режиму, за якого сумарне перетікання реактивної потужності дорівнює нулю та коефіцієнт несиметрії струмів за зворотною послідовністю не перевищує 12 %.

Детальне визначення та аналітичне розкриття складових цільової функції (2) в загальному випадку визначає оптимальний закон керування регульованими пристроями компенсації реактивної потужності. З огляду на її складність та багатовимірність область пошуку оптимальних значень струмів компенсації обмежується простором станів, який отримано зведенням функції (2) до системи рівнянь, що визначають коефіцієнт реактивної потужності та несиметрії струмів відносно струмів компенсації при фіксованих значеннях струмів та кутів навантаження плечей живлення.

Розглядаючи отримані залежності складових (2) на фазовій площині невідомих струмів компенсації, за фіксованих значень струмів та кутів навантажень плечей живлення встановлено, що залежності можуть перетинатись у двох точках, мати одну спільну точку та не перетинатись взагалі. Якщо залежності мають одну спільну точку, то її координати відповідають оптимальним значенням струмів компенсації, за яких сумарне значення коефіцієнта реактивної потужності дорівнює нулю та досягається

заданий рівень несиметрії струмів. Якщо залежності на фазовій площині не перетинаються, оптимального значення струмів компенсації не існує, і для досягнення критичного рівня несиметрії струмів необхідно передбачити наявність перетікань реактивної потужності деякої величини, причому як її споживання, так і генерацію в мережу.

У найбільш загальному випадку залежності перетинаються у двох точках (рис. 10) і оптимальне значення отримується в результаті розв'язку систему двох рівнянь. Перше рівняння системи графічно являє собою лінійну залежність струмів компенсації, для кожної точки якої сумарне перетікання реактивної потужності дорівнює нулю. Друге рівняння системи описує перпендикуляр до цієї лінії, який проходить через точку Ξ . Вирішуючи систему рівнянь відносно невідомих I_{C1} та I_{C2} , отримуємо координати точки оптимального режиму Θ

$$|I_C|^T = \frac{1}{2\sqrt{3}} \left| \begin{array}{c} I_{Л} \\ I_{П} \end{array} \right|^T \cdot \left| \begin{array}{cc} 2\sqrt{3} \sin \varphi_{Л} + \cos \varphi_{Л} & -\cos \varphi_{Л} \\ \cos \varphi_{П} & 2\sqrt{3} \sin \varphi_{П} - \cos \varphi_{П} \end{array} \right|. \quad (3)$$

Отримана залежність (3) використовується для удосконалення системи автоматичного керування регульованими пристроями компенсації реактивної потужності, а точніше підсистеми визначення струмів компенсації.

В якості вхідних величин в системі керування (рис. 11, а) виступають миттєві значення струмів та напруги плечей живлення. Вихідними величинами є імпульси керування γ_{11}, γ_{12} та γ_{21}, γ_{22} бітристорними регуляторами в колах декомпенсуючих реакторів. Завдання на вхід PID-регулятора (рис. 12) подається у вигляді різниці між струмом в контурі компенсуючого пристрою I_C^* та струмом I_C , який визначається підсистемою Θ . На виході отримується кут керування γ , який відповідає необхідному струму компенсації. Вихідні імпульси формуються системою імпульсно-фазового керування синхронно з напругою відповідного плеча живлення $u(t)$ на основі чисельного значення кута керування. Струми компенсації в лівому та правому плечах живлення обчислюються спеціальною підсистемою Θ (рис. 11, б) з використанням залежності (3). На вхід підсистеми подаються миттєві значення струмів і напруг плечей живлення. Блоки формування (БФ), виділяють основні гармоніки струму і напруги, визначають відповідні кути зсуву фаз. Основні гармоніки струмів плечей живлення формують транспонований вектор струмів. Кути плечей живлення відповідним чином формують квадратну матрицю. Після виконання матричної операції множення та масштабування добутку коефіцієнтом на виході підсистеми отримуємо раціональні значення струмів компенсації.

В результаті запропонованого удосконалення досягається зниження коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю, яке відповідає інтегральній імовірності 95 %, до значення 1,78 % у порівнянні з базовим варіантом, для якого $K_{2U} = 2,73\%$ та схемою з ефектом Скотта, для якої $K_{2U} = 2,24\%$ (рис. 13).

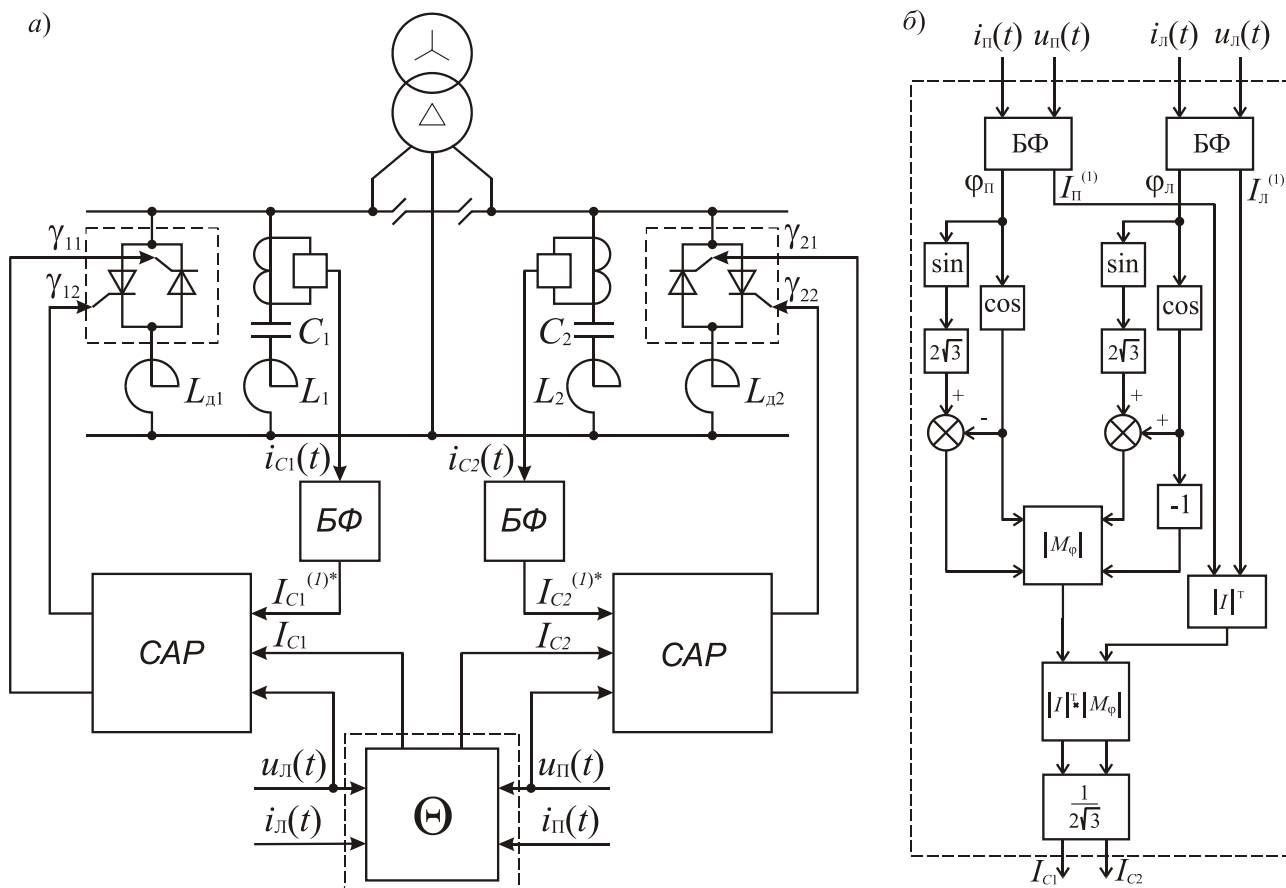


Рис. 11 – Структурна схема системи оптимального керування регульованою компенсацією реактивної потужності (а) та функціональна схема підсистеми визначення струмів компенсації (б)

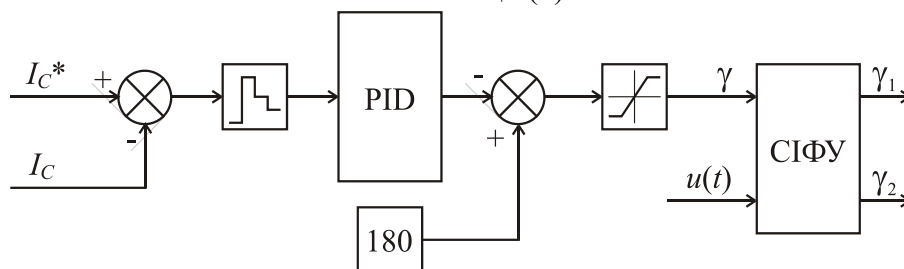


Рис. 12 – Функціональна схема підсистеми автоматичного регулювання струмів компенсації

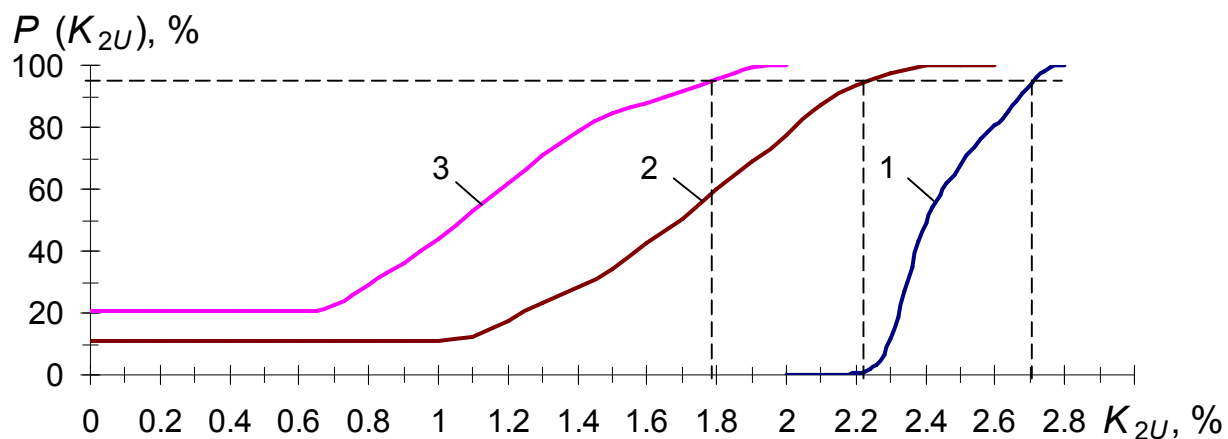


Рис. 13 – Криві інтегральні функцій розподілів імовірностей K_{2U} : 1 – базовий варіант; 2 – схема з ефектом Скотта; 3 – регульована компенсація з оптимальним керуванням

У *п'ятому розділі* виконано розрахунки вартості основних втрат активної потужності від перетікань реактивної та додаткових – від несиметричних струмів в обмотках тягового трансформатора. Основні втрати для однієї підстанції склали близько 147,5 кВт, додаткові – 65,2 кВт. Разом втрати склали 2,5 % відносно споживання активної потужності тяговою обмоткою. Застосування удосконаленої автоматично регульованої компенсації дозволяє знизити основні втрати до 117,5 кВт та додаткові до 42,3 кВт. Загальна економія електричної енергії складає 0,7 %. Річний економічний ефект від зниження втрат потужності та плати за перетікання реактивної електроенергії на одній тяговій підстанції – 856 032 грн.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі на основі результатів виконаних теоретичних і експериментальних досліджень вирішена важлива науково-технічна задача підвищення ефективності електропостачання і якості електричної енергії на електрифікованих ділянках залізниць системи електричної тяги змінного струму. Отримані результати у сукупності мають суттєве значення в області електричного транспорту та його електропостачання. Основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації полягають у наступному.

1. На електрифікованих ділянках залізниць змінного струму найчастіше порушуються, і з кожним роком погіршуються, такі показники якості електроенергії як симетрія та синусоїдність напруг і струмів: коефіцієнт несиметрії напруги в точках приєднання тягових підстанцій складав 1,7 % у 1970 році, а у 2008 році – 4,7 %, що перевищує гранично допустиме значення. Одночасно, внаслідок збільшення перетікань реактивної електроенергії, середньорічне значення коефіцієнта реактивної потужності ($\text{tg}\varphi$) складає 0,63...0,74.

Зазначене обумовлено, по-перше, тим, що існуючі схемні рішення по симетруванню навантаження містять ряд недоліків, а саме, електрообладнання (насамперед симетруючі трансформатори чи приставки) складне і потребує значних капітальних витрат при модернізації тягових підстанцій. По-друге, сучасні способи симетрування недосконалі, зокрема вони не враховують різних кутів навантаження в плечах живлення. Нарешті, існуючі на сьогодні на тягових підстанціях компенсуючі пристрої мають алгоритми свого керування, що базуються на старих підходах й тим самим не дають ефекту при розв'язанні задач поліпшення якості електричної енергії.

2. Найбільш ефективним і достовірним методом аналізу електроенергетичних процесів в системі електричної тяги змінного струму є матричний метод розрахунку миттєвих схем, що базується на математичній моделі системи, в якій враховано вольт-амперні характеристики випрямлячів та намагнічувальні характеристики тягових трансформаторів, а також активні і обмінні характеристики електровозів.

3. Розрахунки на імітаційній моделі, що підтверджені експериментальними дослідженнями, первинних струмів електровозів різних типів показали їх помітну несинусоїдність, обумовлену роботою випрямного чи випрямно-інверторного

перетворювача та тягового трансформатора. Несинусоїдність первинних струмів нових типів електровозів (ДСЗ, 2ЕС5К і 2ЕЛ5К) значно більша, ніж у електровозів типу ВЛ80Т, що давно експлуатуються на залізницях України. Статистичні моделі вольт-амперних характеристик електровозів нових типів являють собою гістерезисні залежності, які зміщуються в бік менших значень струму від 100 до 10 А.

4. Первинні напруги, тобто напруги в точках приєднання досліджуваних тягових підстанцій до живлячих ліній 154 кВ, являють собою стаціонарний випадковий процес з тримодальним розподілом в перерізі імовірностей напруги з математичними очікуваннями (для різних підстанцій) 165,8 і 154,3 кВ, а також середньоквадратичними відхиленнями 1,09 і 1,13 кВ відповідно.

Значення коефіцієнту спотворення синусоїдності K_U зазначених напруг по кожній фазі практично однакові, але відповідають вимогам ГОСТ 13109-97 лише в мережі 154 кВ і лише для однієї підстанції ($K_U \leq 2,8\%$). В точках інших приєднань K_U досягає 9 %, тобто перевищує гранично допустиме значення.

Якість електроенергії за коефіцієнтом несиметрії напруг по зворотній послідовності K_{2U} дотримується також лише в мережі 154 кВ і також однієї підстанції ($K_U = 0,48...1,34\%$). Несиметрія напруги в районній обмотці 35 кВ тягового трансформатора значно вище ($\sim 4,7\%$), ніж несиметрія в первинній мережі.

5. Напруга 27,5 кВ на шинах різних тягових підстанцій у квазістаціонарному режимі як з пристроями компенсації, так і без них являє собою також випадковий стаціонарний процес з одномірним у перерізі розподілом імовірностей напруги за законом Гауса з математичним очікуванням $M(U) = 27,43$ кВ і дисперсією $D(U) = 0,234$ кВ². В нестационарних аварійних режимах роботи системи електропостачання напруга $U(t)$ являє собою нестационарний випадковий негаусовський процес з коливаннями математичного очікування $M(U)$ від 25,93 кВ до 27,87 кВ і дисперсією $D(U)$ від 0,079 кВ² до 0,203 кВ².

6. Тягові струми в плечах живлення, у порівнянні з напругою на шинах підстанцій, змінюються в часі значно інтенсивніше, здійснюючи миттєві стрибки до 500...700 А. Емпіричні функції розподілу ймовірностей струму мають ліву асиметрію відносно закону розподілу Гауса з $M(I) = 281,9$ А та 300,6 А (відносно плечей живлення) та $\sigma(I) = 109$ А і 166,5 А відповідно. Кути навантажень в плечах залежать від тягових струмів і змінюються в межах від 20° до 85°, що відповідає значенням $\text{tg } \varphi = 0,364...11,43$ й тим самим свідчить про досить великі значення перетікань реактивної електроенергії.

7. Характер часової зміни напруги і струму тягових підстанцій відрізняється від синусоїдного закону. Їх амплітудні спектри та спектри активної і реактивної потужностей містять дискретні гармоніки непарного порядку (50, 150, 250,... Гц). Згідно балансу енергії за Будеану, споживання активної потужності складає 61,8 %, реактивної – 32,5 % і потужності спотворення – 5,7 %. При цьому

основну частину ($\sim 99\%$) неактивної потужності в системі досліджуваного тягового електропостачання складає реактивна потужність основної гармоніки.

8. Розрахунки за математичною моделлю свідчать, що існуючий на сьогодні алгоритм регулювання струмів компенсації, у порівнянні з нерегульованою компенсацією, призводить до зниження коефіцієнта K_{2U} з $2,73\%$ до $2,38\%$, однак останнє не відповідає нормі (2%).

Застосування в алгоритмі керування регульованою компенсацією отриманого в роботі аналітичного виразу визначення раціональних струмів компенсації реактивної потужності і наступним використанням такого удосконаленого алгоритму в розробленій в дисертації системі автоматичного оптимального керування пристроєм компенсації забезпечує зменшення коефіцієнту несиметрії K_{2U} до $1,78\%$ у порівнянні з базовим варіантом, для якого $K_{2U} = 2,73\%$, і зі схемою Скотта, для якої $K_{2U} = 2,24\%$.

Застосування симетруючих трансформаторів на ефекті Скотта не змінює розподілу значень коефіцієнтів реактивної потужності $\text{tg}\varphi$, він складає від $0,56$ до $4,03$ відносно середнього значення $1,94$. В режимі нерегульованої компенсації ширина діапазону зміни $\text{tg}\varphi$ не змінюється, проте знижується середнє значення до значення $0,3$ та виникають від'ємні значення $\text{tg}\varphi$, які викликані перекомпенсацією реактивної потужності. При автоматично регульованій компенсації як з існуючим алгоритмом регулювання, так і з удосконаленим $\text{tg}\varphi$ змінюється в межах від 0 до $1,5$, при цьому середнє значення складає $0,08\dots 0,1$.

9. Втрати потужності в системі електропостачання змінного струму обумовлюються перетіканнями реактивної електроенергії ($\sim 147,5$ кВт) та несиметрією струмів навантаження ($\sim 65,2$ кВт), складаючи разом для досліджуваної підстанції $2,5\%$ відносно споживання активної потужності тяговою обмоткою. Автоматично регульована компенсація реактивної потужності з удосконаленим алгоритмом зменшує втрати активної потужності до $117,5$ кВт та від несиметрії до $42,3$ кВт, тобто загальні втрати потужності складають $1,8\%$. Економія електричної енергії складає $0,7\%$.

10. Результати дисертаційної роботи прийнято до використання у вигляді рекомендацій по підвищенню ефективності використання автоматичної компенсації реактивної потужності Знам'янською та Котовською дистанціями електропостачання на тяговій підстанції Олександрія та Чубівка Одеської залізниці. Річна економія коштів від зниження втрат потужності складає $223\,928$ грн., від зниження плати за перетікання реактивної електроенергії – $632\,104$ грн. Річний економічний ефект складає $856\,032$ грн.

Основні положення і результати дисертації опубліковано в таких роботах

1. Босий Д. О. Математичне моделювання електротягового навантаження в задачах вивчення електромагнітних процесів для систем електропостачання електричного транспорту змінного струму / Д. О. Босий, В. Г. Сиченко // Технічна електродинаміка. – 2009. – Темат. вип. – Ч. 3. – С. 86-89.
2. Босий Д. О. Імітаційне моделювання системи тягового електропостачання для дослідження показників якості електричної енергії на тягових підстанціях

- змінного струму / Д. О. Босий // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізнич. трансп. – 2008. – Вип. 24. – С. 49-54.
3. Кузнецов В. Г. Оценка потерь электроэнергии в тяговой сети магистральных железных дорог / В. Г. Кузнецов, Р. С. Мыцко, Д. А. Босый // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізнич. трансп. – 2006. – Вип. 12. – С. 36-40.
4. Сиченко В. Г. Дослідження режиму напруги в тяговій мережі змінного струму при рекуперації електроенергії / В. Г. Сиченко, В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий. – Вісник Приаз. держ. техн. ун-ту. – 2008. – Вип. 18. – Ч. 2. – С. 35-39.
5. Скалозуб В. В. Оптимизация режимов ведения поездов по критерию минимума стоимости активной и реактивной электроэнергии / В. В. Скалозуб, В. Г. Кузнецов, Д. А. Босый, А. П. Иванов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2008. – № 4. – С. 111–114.
6. Сиченко В. Г. Аналіз режимів напруги на приєднаннях тягових підстанцій змінного струму / В. Г. Сиченко, Д. О. Босий // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізнич. трансп. – 2009. – Вип. 29. – С. 82-87.
7. Сиченко В. Г. Критерії керування пристроями компенсації реактивної потужності тягових підстанцій змінного струму / В. Г. Сиченко, Д. О. Босий // Гірнича електромеханіка та автоматика. – 2009. – № 83. – С. 36-45.
8. Босий Д. О. Оптимізація керування регульованою компенсацією реактивної потужності на тягових підстанціях змінного струму / Д. О. Босий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 1. – С. 24-32.
9. Пат. 48536 Україна, МПК H02J 3/26. Спосіб зниження несиметрії напруги тягової підстанції змінного струму / Сиченко В.Г., Босий Д.О.; заявник та власник патенту Дніпропетр. нац. ун-т залізнич. трансп. ім. ак. В.Лазаряна. – № U200909253; заявл. 08.09.09; опубл. 25.03.10, Бюл. № 6. – 2 с.

Додаткові праці:

10. Босий Д. О. Імітаційне моделювання систем тягового електропостачання з врахуванням якості електричної енергії / Д. О. Босий // Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті: міжнар. наук.-практ. конф., 24-26 трав. 2007 р.: тези доповідей. – Дніпропетровськ, 2007. – С. 12.
11. Босий Д. О. Застосування сучасних методів програмування при імітаційному моделюванні систем тягового електропостачання з врахуванням якості електричної енергії / Д. О. Босий // Електрифікація залізничного транспорту: междунар. науч.-практ. конф., 3-6 окт. 2007 г.: тезиси докл. – Дніпропетровськ, 2007. – С. 12.
12. Сыченко В. Г. Улучшение показателей качества электроэнергии в системе электрической тяги переменного тока 27,5 кВ применением регулируемой компенсации реактивной мощности / В. Г. Сыченко, Д. А. Босый, О. Г. Попов // Электрифікація залізничного транспорту: междунар. науч.-практ. конф., 3-6 окт. 2007 г.: тезиси докл. – Дніпропетровськ, 2007. – С. 60.
13. Сиченко В. Г. Дослідження режиму напруги в тяговій мережі змінного струму при рекуперації електроенергії / В. Г. Сиченко, В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий // Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств: міжнар. наук.-техн. конф., 21-23 трав. 2008 р.: тези доповідей. – Маріуполь, 2008. – С. 93-96.
14. Босий Д. О. Вплив якості електричної енергії на похибку електронних лічильників тягових підстанцій / Д. О. Босий // Транспортні зв'язки. Проблеми та перспективи: міжнар. наук.-практ. конф., 29-30 трав. 2008 р.: тези доповідей. – Дніпропетровськ, 2008. – С. 122.

15. Босий Д. О. Аналіз стану проблеми якості електроенергії для тягових підстанцій змінного струму / Д. О. Босий // Електрифікація залізничного транспорту: междунар. науч.-практ. конф., 30 сен. – 4 окт. 2008 г.: тези докл. – Дніпропетровськ, 2008. – С. 27.
16. Сиченко В. Г. Системна оцінка показників якості електроенергії тягових підстанцій Одеської залізниці / В. Г. Сиченко, Д. О. Босий // Електрифікація залізничного транспорту: междунар. науч.-практ. конф., 30 сен. – 4 окт. 2008 г.: тези докл. – Дніпропетровськ, 2008. – С. 59.
17. Сиченко В. Г. Оптимізація режимів роботи пристроїв компенсації реактивної потужності на тягових підстанціях Одеської залізниці / В. Г. Сиченко, Д. О. Босий, О. Г. Попов // Електрифікація залізничного транспорту: междунар. науч.-практ. конф., 30 сен. – 4 окт. 2008 г.: тези докл. – Дніпропетровськ, 2008. – С. 63.
18. Sichenko, V. Reacting power compensation equipment routine optimization at alternating current traction substations / V. Sichenko, D. Bosiy // Трансбалтика: междунар. науч. конф.: тези докл. – Дніпропетровськ, 2009. – С. 20-21.
19. Босий Д. О. Управління режимом компенсації реактивної потужності для зниження витрат за її споживання та генерацію на тягових підстанціях змінного струму / Д. О. Босий, О. В. Загинайко // Електрифікація залізничного транспорту: междунар. науч.-практ. конф., 3-5 юн. 2009 г.: тези докл. – Дніпропетровськ, 2009. – С. 31.
20. Босий Д. О. Аналіз ефективності застосування регульованої компенсації реактивної потужності в умовах Одеської залізниці / Д. О. Босий, А. В. Лойко // Електрифікація залізничного транспорту: междунар. науч.-практ. конф., 3-5 юн. 2009 г.: тези докл. – Дніпропетровськ, 2009. – С. 32.
21. Сиченко В. Г. Вивчення електромагнітних процесів в системах електропостачання електричного транспорту змінного струму / В. Г. Сиченко, Д. О. Босий // Електрифікація залізничного транспорту: междунар. науч.-практ. конф., 3-5 юн. 2009 г.: тези докл. – Дніпропетровськ, 2009. – С. 33.
22. Босий Д. А. Исследование возможности косвенного определения параметров электропоездов методом Монте-Карло / Д. А. Босий, А. В. Рябоконт, Б. А. Рябоконт // Проблемы и перспективы развития транспортного комплекса: образование, наука, производство: междунар. науч.-практ. конф., 7-8 окт. 2009 г.: сб. трудов. – Ростов н/Д, 2009. – С. 342-343.

АНОТАЦІЯ

Босий Д. О. Підвищення ефективності електропостачання системи електричної тяги змінного струму. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт. – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2010.

Дисертація присвячена зниженню втрат електроенергії від перетікань реактивної потужності та несиметрії струмів в обмотках тягового трансформатора за рахунок компенсації реактивної потужності. В роботі проаналізовано існуючі способи підвищення ефективності систем тягового електропостачання змінного струму. Розглянуто методи розрахунку і моделювання енергетичних процесів в системах тягового електропостачання та запропоновано їх

удосконалення. На підставі експериментальних досліджень проаналізовано режими роботи тягових підстанцій. Розроблено методику визначення раціональних струмів компенсації реактивної потужності та показано її застосування в системі керування регульованою компенсацією.

Ключові слова: електропостачання, електротранспорт, змінний струм, моделювання, напруга, реактивна потужність, компенсація, несиметрія, якість електроенергії, втрати.

АННОТАЦІЯ

Босый Д. А. Повышение эффективности электроснабжения системы электрической тяги переменного тока. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 – электротранспорт. – Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, 2008.

Диссертация посвящена снижению потерь электроэнергии от перетекания реактивной мощности и несимметрии токов в обмотках тягового трансформатора за счет компенсации реактивной мощности.

К основным недостаткам системы электрической тяги переменного тока из-за наличия однофазных нагрузок относятся перетекания реактивной мощности и токи обратной последовательности, что в свою очередь приводит к дополнительным потерям в системах электроснабжения и к штрафным санкциям в виде платы за перетекание реактивной энергии. Проанализированы существующие способы повышения эффективности систем тягового электроснабжения переменного тока, а именно устройства симметрирования на основе эффекта Скотта и устройства компенсации реактивной мощности.

Рассмотрены методы расчета и моделирования энергетических процессов в системах тягового электроснабжения, которые заключаются в применении модифицированного преобразования Лапласа и определении активных и обменных характеристик пассивного потребителя электроэнергии. Предложено усовершенствование матричного метода расчета мгновенных схем с применением метода функций токораспределения, что позволяет существенно снизить время расчета. Проанализировано адекватность существующей схемы замещения силовых цепей выпрямительных электровозов переменного тока. Для электровозов переменного тока новых типов с управляемыми преобразователями (ДСЗ, 2ЕС5К) предложено использовать статистические модели вольт-амперных характеристик.

На основании экспериментальных исследований проанализированы режимы работы тяговых подстанций переменного тока. Получены статистические характеристики режимов напряжения в первичной (154 кВ), районной (35 кВ) и тяговой сети (27,5 кВ). Проанализированы характеристики тяговых токов подстанций. Рассчитаны балансы составляющих полной мощности с применением концепций Фризе и Будеану. Выполнен анализ несимметрии напряжений на разных присоединениях, установлена ее взаимосвязь с

несимметрией токов в тяговой обмотке трансформатора. По результатам экспериментальных исследований оценена адекватность усовершенствованной модели системы электроснабжения переменного тока для значений коэффициента реактивной мощности и коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности. На основе разработанной модели приведены результаты моделирования различных устройств в различных режимах работы.

Выполнены теоретические исследования для определения условия отсутствия токов обратной последовательности тяговой подстанции с учетом реальных углов нагрузок в левом и правом плече питания. Это позволило определить выражение для определения токов компенсации, при которых достигается полное симметрирование. Выявлен недостаток симметрирования с помощью компенсации реактивной в обоих плечах питания, а именно наличие «перекомпенсации» или «недокомпенсации» в случае неравенства токов плеч питания.

С помощью установленной взаимосвязи несимметрии токов с несимметрией напряжений, выполнена оптимизация выражения для определения рациональных токов компенсации, в результате которых достигается отсутствие перетекания реактивной мощности и соблюдение требований ГОСТ 13109-97 по показателю несимметрии напряжений в системе тягового электроснабжения. Показано применение полученного аналитического выражения в системе управления регулируемой компенсацией реактивной мощности. Рассчитано снижение основных и дополнительных потерь, которые вызваны перетеканием реактивной мощности и несимметричными токами в первичной и тяговой обмотке.

Ключевые слова: электроснабжение, электротранспорт, переменный ток, моделирование, напряжение, реактивная мощность, компенсация, несимметрия, качество электроэнергии, потери.

ANNOTATION

Bosiy D. O. Increasing of AC traction power system effectiveness. – Manuscript.

The dissertation on receipt for a scientific degree of the candidate in technical sciences by specialty 05.22.09 – electric transport. – Dnepropetrovsk national university of railway transport named after academician V. Lazaryan, Dnepropetrovsk, 2010.

The dissertation is about decreasing power losses caused by reactive power and current unbalance in transformer windings by reactive power compensation. It is analyzed existent methods to effectiveness increasing of AC traction power supply. The author considered methods of energy process evaluating in traction power systems and proposed some improvements. Modes of traction substation working were analyzed on experimental data. Method for rational compensation currents was received and it's using in control system of regulated compensation devices are showed.

Keywords: power supply system, electrical transport, AC current, imitate simulation, voltage modes, reactive power, compensation, unbalance of currents, power quality, power losses.

Босий Дмитро Олексійович

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ ЗМІННОГО СТРУМУ

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Формат паперу 60x84 1/16.

Ум. др. арк. 0,9. Обл.-вид. л. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. № _____.

Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.03.

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