

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

**ПЕТРОВ АНДРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ**

**УДК 621.313.333**

**НЕПРОДУКТИВНІ ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ  
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ ПОСТІЙНОГО  
СТРУМУ**

**Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**дисертації на здобуття наукового ступеня**  
**кандидата технічних наук**

**Дніпропетровськ – 2011**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства інфраструктури України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
*Костін Микола Олександрович*,  
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства інфраструктури України, завідувач кафедри теоретичних основ електротехніки.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
*Шкрабець Федір Павлович*,  
Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, м. Дніпропетровськ, завідувач кафедри електричних машин;

кандидат технічних наук, доцент  
*Хворост Микола Васильович*,  
Харківська національна академія міського господарства Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, декан факультету заочного навчання.

Захист відбудеться «\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 р. о \_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, 49010, ауд. 314.

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

Автореферат розіслано «\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 р.

В.о. вченого секретаря спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01,  
д.т.н., професор



М.Б. Курган

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** З усієї споживаної залізницями України електроенергії основна її частина, 82,5...85,1%, використовується безпосередньо на електричну тягу поїздів. Щорічно помітно також зростає від 3286,4 до 5322,4 млн. квар·год. (за період 2004-2009р.р.) об'єм реактивної електроенергії, що споживається пристроями системи електричної тяги (СЕТ) і відповідно плата за неї від 19,27 до 41,03 млн. грн. Передача цих активної і реактивної електроенергій від районної підстанції (РП) до тягової підстанції (ТП) і далі електрорухомому складу (ЕРС) супроводжується обов'язковою закономірною втратою частини активної енергії в елементах системи. Ці втрати називають технологічними втратами. Одним із основних завдань, що стоять перед господарством електропостачання Укрзалізниці на найближчу перспективу та період до 2020 року, є зменшення таких втрат та за рахунок цього зниження енергоємності залізничного транспорту. Останнє є також однією із складових мети «Концепції Державної цільової економічної програми енергоефективності на 2010-2015 роки», схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 19.11.2008 р. № 1446-р.

Зазначене вище, імовірно, і обумовлює той факт, що навіть до теперішнього часу в різних звітних документах та наукових публікаціях проводиться оцінка і аналіз лише загальних сумарних (без їх поділу) втрат електроенергії. І якщо такий підхід цілком виправданий при розрахунках нових систем електропостачання (СЕС) та при уточненні навантажень, що живлять лінії електропередач (ЛЕП), то при оцінюванні технічної сторони транспортування електроенергії і якості організації та контролю існуючих зовнішнього і тягового електропостачань він є відверто недостатнім. Це обумовлено тим, що усі технологічні втрати слід поділяти на продуктивні (основні) та непродуктивні (додаткові). Продуктивні втрати обумовлені передачею активної енергії і вони мають бути зменшені до оптимального рівня, під яким розуміють такі їх значення, при яких не існує економічно виправданих способів їх подальшого зниження. Непродуктивні втрати пов'язані з перетіканням реактивної потужності і потужності спотворення, а також некорисною циркуляцією (обміном) енергії у системі РП-ТП-ЕРС і вони мають бути знижені до мінімуму.

В нових економічних умовах, у зв'язку з обмеженістю енергоресурсів в Україні, з техніко-економічної точки зору найбільш визначальним показником ефективності тягового електропостачання і електроспоживання повинен бути якраз рівень непродуктивних втрат, а не кількість і вартість спожитої електроенергії. Це обумовлено тим, що часто, поряд з загальною тенденцією до зниження споживаної активної електроенергії, споживання реактивної енергії (а отже і непродуктивні втрати, які пропорційні квадрату реактивної потужності) зростає, що й спостерігається, наприклад, в електрифікованих залізницях України. Наприклад, за період з 2007 по 2009 роки загальне споживання електроенергії на електротягу зменшилось від

5357,1 до 4513,7 млн. кВт год., а споживання реактивної енергії різко зросло від 3501,0 до 5322,4 млн. квар·год. Тому лише непродуктивні втрати найбільш точно відображають економічні сторони електропостачання і характеризують ефективність і раціональність процесу електроспоживання.

Вирішення задач зниження непродуктивних втрат вимагає попереднього виявлення точок і першопричин їх виникнення, кількісного визначення, а також оцінки можливостей зменшення до економічно виправданих мінімальних значень. При цьому треба мати на увазі, що для визначення зазначених втрат електровимірювальних приладів (лічильників) в практиці поки що не існує, тому втрати необхідно оцінювати або методом непрямого вимірювання, або «чисто» розрахунковим методом. В той же час в електроенергетиці електрифікованих залізниць взагалі відсутні і співвідношення, і методика оцінки непродуктивних втрат, а оскільки фідерні напруги і струми мають випадковий характер, то потрібна розробка нових підходів, методів і аналітичних виразів. Одночасно, з метою зменшення цих втрат необхідна компенсація неактивної потужності, перетіканням якої і обумовлюються зазначені втрати.

У зв'язку з вищезазначеним визначення непродуктивних втрат електроенергії в лініях зовнішнього електропостачання та в тягових мережах і розробка заходів по їх зменшенню є актуальною задачею підвищення ефективності електропостачання системи електричної тяги постійного струму.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.** Робота виконана у відповідності з Постановою Кабінету Міністрів України від 23.04.1999 р. №661 «Про заходи підтримки залізничного транспорту», головними напрямками «Програми енергозбереження на залізничному транспорті України на період 1996-2010 рр.», розробленої Укрзалізницею у червні 1996р., та «Концепцією Державної цільової економічної програми енергоефективності на 2010-2015 роки», схваленої Кабінетом Міністрів України 19.11.2008р., № 1446-р.

Дослідження за темою дисертації безпосередньо пов'язані з виконанням науково-дослідної роботи у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за темою «Підвищення ефективності електроспоживання ділянками системи електричної тяги постійного струму» (№ держреєстрації 0109U000478). При виконанні вказаних досліджень дисертант виступав виконавцем і є співавтором звіту із зазначеної науково-дослідної роботи.

Дисертаційна робота є також складовою досліджень за координаційним планом Наукової ради НАН України з комплексної проблеми «Наукові основи електроенергетики» за науковим напрямком «Розробка та удосконалення пристроїв та систем електричного транспорту».

**Мета роботи.** Метою роботи є підвищення ефективності використання та якості електроенергії в системах зовнішнього та тягового

електропостачання постійного струму на основі оцінки і зменшення в живлячих лініях непродуктивних втрат електроенергії, визначених шляхом досліджень реальних електроенергетичних процесів, що протікають в тягових електричних колах.

***Задачі досліджень.***

1. Здійснити погодинні, добові та місячні моніторинги фідерних напруг і струмів і в лініях зовнішнього електропостачання на ряді діючих електрифікованих ділянок Придніпровської залізниці; отримати осцилограми і реєстрограми.
2. Виконати імовірно-статистичну і кореляційно-спектральну обробку отриманих часових залежностей напруг і струмів на основі теорії випадкових величин і теорії випадкових процесів.
3. Розробити методи і методики визначення складових повної потужності та непродуктивних і продуктивних втрат електроенергії у СЕТ постійного струму з урахуванням стохастичного характеру зміни електроенергетичних процесів у силових тягових колах.
4. Оцінити гармонійний склад напруги і струму, а також показники якості і непродуктивні втрати електроенергії в живлячих лініях зовнішнього електропостачання.
5. Визначити рівні потужності та непродуктивних втрат активної електроенергії, енергетичних характеристик, а також їх залежності від технологічних коливань напруги і струму в тяговій мережі системи електропостачання.
6. Запропонувати ефективні методи та підходи компенсації неактивної потужності по Фризе й тим самим зменшення непродуктивних втрат активної електроенергії в системі електротяги постійного струму.

***Об'єкт досліджень*** – електроенергетичні процеси в силових колах тягового і зовнішнього електропостачання системи постійного струму.

***Предмет досліджень*** – енергетичні показники та непродуктивні втрати активної електроенергії в проводах мереж тягового і зовнішнього електропостачання.

***Методи досліджень.*** Моніторинг напруг і струмів здійснювали за методами вимірювання електричних величин, а їх імовірнісні та кореляційно-спектральні характеристики визначали методами теорії імовірностей та теорії випадкових процесів. Для розрахунків потужностей, коефіцієнтів потужностей, а також продуктивних і непродуктивних втрат електроенергії застосовували методи теорії потужностей, електричних кіл, а також методи електропостачання електрифікованих залізниць.

Обробку експериментальних даних виконували на ПЕОМ з використанням спеціалізованого програмного забезпечення: STATISTICA, EXCEL, MAPLE та MATHCAD.

***Наукова новизна отриманих результатів.***

1. Дістали подальший розвиток і вперше адаптовані до

електроенергетичних процесів систем електричного транспорту поняття і методи кореляційної теорії випадкових процесів, що дозволило на основі авто- і взаємкореляційних функцій фідерних напруг і струмів розробити новий метод і отримати нові аналітичні вирази складових повної потужності та енергетичних показників кіл системи тягового електропостачання залізниць.

2. Вперше встановлено закономірності і отримано раніше невідомі співвідношення впливу характеру випадкових технологічних пульсацій (коливань) напруг, струмів і миттєвої потужності в тяговій мережі і лінії зовнішнього електропостачання на непродуктивні в них втрати електроенергії, що дало можливість виконати повний і більш точний аналіз балансу реальних (стохастичних) електроенергетичних процесів в силових колах електропостачання й тим самим розробити методику визначення непродуктивних втрат активної електроенергії.
3. Вперше в спектрах стохастичних функцій напруг і струмів фідерів і тягових підстанцій виявлено періодичні низькочастотні коливання (інтергармоніки), які генеруються різкозмінним нестационарним навантаженням тягової мережі, що дозволило оцінити ще одну додаткову складову втрат електричної енергії в системі електропостачання.
4. Отримано закономірності перетоку неактивної потужності в тяговій мережі електропостачання, а також характеру часової зміни показників якості електроенергії в точках приєднання пристроїв системи електричної тяги, на основі яких зроблено висновок відносно необхідності встановлення у вузлах навантаження силових енергетичних фільтрів і розроблено методику визначення форми та параметрів їх струмів, що компенсують неактивні складові тягових струмів системи електропостачання.
5. Вперше встановлено закономірності впливу отриманих імовірнісно-статистичних і кореляційно-спектральних характеристик випадкових процесів фідерних напруг і тягових струмів на повну, активну і неактивну потужності, що передаються по тяговій мережі, а також на енергетичні показники системи, що дало можливість більш повно і точно визначити непродуктивні і продуктивні втрати електроенергії в живлячих лініях.

Отримані результати у сукупності мають суттєве значення в області електричного транспорту та його електропостачання.

Таким чином, наукова задача дисертаційної роботи полягає у встановленні закономірностей появи і об'єму непродуктивних втрат електроенергії в мережах системи електропостачання постійного струму та в розробці і обґрунтуванні методів і методик їх визначення з урахуванням характеру стохастичних коливань напруг і струмів в живлячих лініях.

***Практичне значення отриманих результатів.***

1. Отримані нові аналітичні співвідношення складових повної потужності, що передаються тяговою мережею, дають можливість виконати на більш точному рівні аналіз електроенергетичних процесів у СЕТ з урахуванням випадкових нестационарних технологічних змін фідерних напруг і струмів.
2. Розроблені методи оцінки неактивної потужності (реактивної по Фризе) дозволяють визначати непродуктивні втрати активної електроенергії в ТМ і в лініях зовнішнього електропостачання.
3. Запропонована методика визначення форми і параметрів миттєвої величини струму і функції провідності компенсуючого пристрою дає можливість структурно-параметричного синтезу таких пристроїв і зокрема силових енергетичних активних чи гібридних фільтрів.
4. Чисельно-графічні залежності непродуктивних і продуктивних втрат електроенергії від часу, а також від реактивної і відповідно активної потужностей рекомендуються для прогнозування зазначених втрат, а також при розробці технічних вимог при електрифікації нових ділянок залізниць.
5. Результати дисертації прийняті до використання при аналізі та налазці роботи фідерів ТП, а також ТМ електрифікованих ділянок Придніпровської залізниці. Річний економічний ефект складає 401149 грн.
6. Основні теоретичні розробки, методи визначення складових повної потужності, втрат електроенергії та інших енергетичних показників, а також прикладні результати дисертації можуть бути використані у навчальному процесі при підготовці аспірантів, бакалаврів і магістрів на кафедрі «Електропостачання залізниць» у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

***Особистий внесок здобувача.*** Постановка мети роботи і задачі досліджень виконано спільно з науковим керівником. У публікаціях, в яких відображено основні результати дисертації і які написано у співавторстві, автору дисертації належить: у [1] – розробка методів визначення повної потужності в системах електричної тяги; [2] – виконання чисельних розрахунків миттєвої реактивної потужності у системах електричного транспорту постійного струму; [5, 6] – отримання співвідношень для непродуктивних втрат електроенергії; [8] – виконання аналізу інтергармонік тягового струму і фідерної напруги в системах електричного транспорту; [9] – розробка способів компенсації неактивних потужностей в системі електротяги постійного струму.

Роботи [3, 4, 7] написано автором самостійно.

***Апробація результатів дисертації.*** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і одержали схвалення на наступних

міжнародних науково-технічних конференціях: VI-й «Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств», Маріуполь, 2008; III-й «Електрифікація залізничного транспорту». «Транселектро-2009», Місхор, АР Крим, 2009; IV «Електрифікація залізничного транспорту». «Транселектро-2010», Місхор, АР Крим, 2010; 70-й «Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпропетровськ, 2010 та 2011 рр. Загалом дисертація докладалася у квітні 2009р. і у травні 2010р. на семінарі Наукової Ради «Наукові основи електроенергетики» за тематикою «Розробка та удосконалення пристроїв та систем електричного транспорту».

**Публікації.** Результати дисертації опубліковано в 12 наукових працях, у тому числі: 8 – у фахових виданнях; 4 – у матеріалах і тезах міжнародних наукових конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається з вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і п'яти додатків. Основний текст роботи викладено на 177 сторінках. Дисертація містить 78 рисунків і 15 таблиць; рисунки і таблиці, розташовані на окремих сторінках, займають 46 сторінок. Список використаних джерел із 141 найменувань приведений на 16 сторінках, додатки – на 16 сторінках. Повний обсяг дисертації складає 227 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність, тему дисертації, сформульовано мету і задачі досліджень, приведено основні наукові положення та результати, які винесено на захист, а також подано відомості про практичне значення результатів роботи, апробацію і публікації матеріалів досліджень.

**У першому розділі** проаналізовано існуючі методи оцінки втрат електроенергії в пристроях тягового електропостачання системи постійного струму. У хронологічному порядку критично розглянуто основні публікації по розв'язуваній задачі і встановлено, що у всіх роботах проводиться оцінка і аналіз лише загальних, без розподілення на продуктивні і непродуктивні, втрат електроенергії. Зроблено висновок, що такий підхід з точки зору оцінювання технічної сторони транспортування електроенергії, якості організації та контролю існуючих зовнішнього і тягового електропостачань, та взагалі ефективності функціонування всієї системи є недостатнім. При розрахунку експлуатаційних енергетичних показників відсутній імовірнісний підхід до оцінки низькочастотних періодичних коливань у випадкових процесах напруги і струму на виході ТП, а також неактивної складової повної потужності, коефіцієнта потужності та коефіцієнта реактивної потужності системи електричної тяги постійного струму. Робиться висновок, що існуючі методи оцінки ефективності системи тягового електропостачання базуються тільки на критеріях мінімуму споживаної електроенергії і дотримувannya показників якості електроенергії (ПЯЕ), а питання втрат енергії, особливо непродуктивних, не розглядається.



У другому розділі наводиться аналіз методів визначення складових повної потужності, показників якості і втрат електроенергії, а також коефіцієнта потужності чи коефіцієнта реактивної потужності. В результаті подано обґрунтування того, що найбільш ефективним, з точки зору розв'язуваної задачі, є метод непрямого вимірювання, який базується на використанні отриманих в реальних умовах експлуатації випадкових

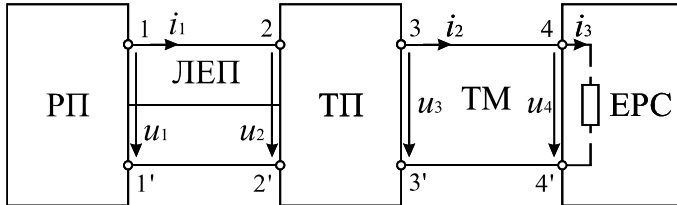


Рис. 1. – Якісна структурна схема досліджуваної електрифікованої ділянки.

процесів фідерних напруг і струмів, а також на основі сучасних уявлень і формул реактивної потужності. Наводиться методика моніторингу напруг і струмів в елементах електрифікованих ділянок (рис. 1).

Випробування проводили на реально діючих ТП Придніпровської залізниці: Горяїново, Письменна, Железняково, Миколаївка, Слав'янка, Сухачівка, Верхньодніпровськ, Нижньодніпровськ-Вузол; ПСК «Брагіновка» та ПСК-12. Вибір цих ТП був обумовлений великими значеннями тягового струму в зв'язку з наявністю підйому в профілі шляху ряду фідерних зон та високою

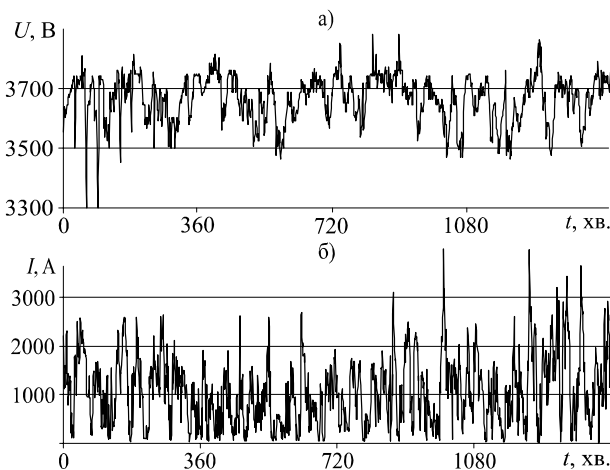


Рис. 2. – Приклади реальних часових залежностей випрямлених напруги (а) та струму (б) фідера ТП постійного струму.

вантажонапруженістю й тим самим значними коливаннями тягового струму на ділянках.

Синхронний запис напруг і струмів проводили за допомогою електронних осцилографів та самозаписуючих пристроїв, які під'єднували, згідно із затвердженою програмою, в точках 1-1', 2-2', 3-3' та 4-4' (рис. 1). У зв'язку зі стохастичністю зміни напруг і струмів (рис. 2) в дисертації визначено мінімальні та достатні тривалості записів однієї реалізації зміни цих величин.

У третьому розділі викладено теоретичні передумови та адаптовано методи визначення енергетичних характеристик і показників до системи електропостачання електричної тяги постійного струму.

Існуюча на сьогоднішній день, і яку найчастіше застосовують, в тому числі і в електричних колах систем тяги, традиційна класична система критеріїв ефективності електроенергетичних процесів включає в себе наступні показники якості енергопроцесів: коефіцієнт зсуву фаз основної гармоніки струму відносно основної гармоніки напруги ( $\cos \varphi_{(1)}$ ); коефіцієнт спотворення форми струму по відношенню до форми напруги ( $\nu$ ); коефіцієнт

несиметрії навантаження по фазах ( $K_{HC}$ ); коефіцієнт нерівномірності споживання електроенергії ( $K_{HP}$ ). Загальним показником в цій системі являється коефіцієнт потужності  $\lambda$ , який об'єднує зазначені локальні коефіцієнти.

Розглянуті вище показники змістовно тісно пов'язані з ПЯЕ згідно ГОСТ 13109-97 і тому в якості критеріїв нерідко обмежуються цими ПЯЕ. Однак останні, по-перше, «безлікі» відносні величини і не відображають економічної сторони протікання енергетичних процесів, зокрема втрат електроенергії. По-друге, вони нормалізують лише зміни напруги. І, нарешті, ПЯЕ не є обов'язковими між енергопостачальною організацією і споживачем. Тому, на нашу думку, найбільш важливим показником (критерієм) ефективності енергопроцесів електропостачання і електроспоживання в СЕТ можуть служити втрати активної електроенергії в пристроях системи, які називають технологічними втратами і які можна умовно поділити на продуктивні (основні) та непродуктивні (додаткові).

Продуктивні втрати обумовлені передачею лише активної енергії в ЕРС і вони мають місце, коли система «ЛЕП-ТП-ТМ-ЕРС» працює в синусоїдному, симетричному та стабільному, за характером споживання, режимі, в якому відсутні фактори неякості електроенергії, що обумовлює рівність нулю відповідних потужностей: реактивної (або зсуву)  $Q_{(1)}$ , спотворення  $D$ , несиметрії  $H_C$  та нерівномірності  $H_P$ . Основні втрати являються необхідними по суті передачі енергії і тому немінучі. Тому вони повинні бути зменшені лише до оптимального рівня.

Непродуктивні втрати пов'язані з неякісністю електроенергії, тобто вони мають місце, якщо в системі діє хоча б один із вищезазначених факторів неякості електроенергії. А останні в СЕТ обов'язково є, бо вона працює практично завжди в несинусоїдному, часто несиметричному і різкозмінному тяговому режимі навантаження. Тому саме непродуктивні втрати в елементах (пристроях) системи електротяги повинні бути основним критерієм ефективності енергопроцесів у системі. Ці втрати електроенергії не є необхідними при її передачі по ЛЕП до ТП і від ТП до ЕРС і вони повинні бути зменшені до мінімуму (бажано до нуля).

З проблемою знаходження непродуктивних втрат електроенергії тісно пов'язані питання оцінки складових повної потужності, і зокрема оцінка неактивної (реактивної) потужності. Загальновідома неоднозначність поняття та визначення реактивної потужності для кіл несинусоїдного струму, якими і є тягові мережі. Однак всі дослідники мають єдину думку, що з точки зору проблеми визначення втрат потужності в різних режимах роботи системи найбільш правильною та ефективною є концепція С.Фризе.

В дисертації вирішення цієї задачі, враховуючи випадковий характер напруг і струмів, було виконано за допомогою використання (викладених в роботі) методів «дискретної електротехніки» та дискретного перетворення

Фур'є, а також розроблено новий метод, метод кореляційних функцій, який базується на використанні апарату теорії випадкових процесів. Останній ґрунтується на відомих із теорії випадкових процесів поняттях авто- та взаємнокореляційних функцій. В результаті було отримано формули для

$$S = \sqrt{[K_U(\tau=0) + m_U^2][K_I(\tau=0) + m_I^2]}, \quad (1)$$

активної

$$P = K_{UI}(\tau=0) + m_U m_I \quad (2)$$

та реактивної (по Фризе) потужностей

$$Q_\Phi = \sqrt{[K_U(\tau=0) + m_U^2][K_I(\tau=0) + m_I^2] - [K_{UI}(\tau=0) + m_U m_I]^2}. \quad (3)$$

Коефіцієнт реактивної потужності визначиться за виразом:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sqrt{[D_U + m_U^2][D_I + m_I^2] - [K_{UI}(\tau=0) + m_U m_I]^2}}{K_{UI}(\tau=0) + m_U m_I}. \quad (4)$$

У виразах (1)-(4) маємо:  $K_U$ ,  $K_I$  – автокореляційні функції випадкових процесів напруги та струму відповідно;  $K_{UI}$ ,  $K_{IU}$  – взаємні кореляційні функції напруги зі струмом та струму з напругою відповідно;  $D_U$ ,  $D_I$ ,  $m_U$ ,  $m_I$  – відповідно дисперсії та математичні сподівання напруг та струмів.

Основною ж задачею цієї роботи було визначення непродуктивних  $\Delta W_D$ , а для порівняння і продуктивних  $\Delta W_O$ , втрат електроенергії в проводах ТМ і живлячої мережі (від РП до ТП). Їх визначали методом непрямого експериментального вимірювання з використанням експериментально (в реальних умовах експлуатації) одержаних реєстрограм напруг і струмів в живлячих лініях, тобто в лінії зовнішнього електропостачання і в тяговій мережі. З цією метою було застосовано концепцію С. Фризе. Згідно з цією концепцією та теоретичною електротехнікою навантаження (ЕРС чи вся система тяги), як пасивний двополюсник, зі струмом  $i(t)$  довільної форми

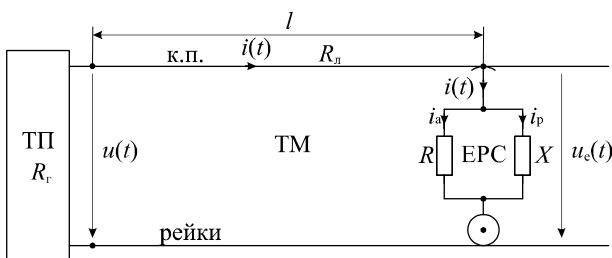


Рис. 3. Схема, яка пояснює утворення активної та реактивної складових струму в тяговій мережі.

представляють паралельним з'єднанням резистивного елемента  $R$ , що відображає споживану активну електроенергію, та реактивного елемента  $X$ , що характеризує споживання неактивних складових потужностей: реактивної потужності та потужності спотворення (рис. 3). Умовно вважають, що у вітці з елементом  $R$  протікає активна складова

струму  $i_a(t)$ , яка співпадає за формою з прикладеною до споживача напругою  $u_c(t)$ . По елементу  $X$  протікає реактивна складова струму  $i_p(t)$ ,

що ортогональна до напруги  $u_e(t)$ . Виходячи із понять в дисертації отримано такі вирази для непродуктивних  $\Delta W_D$  і продуктивних  $\Delta W_O$  втрат електроенергії:

$$\Delta W_D = R_\Sigma \frac{Q_{\Phi\tau}^2}{U_\tau^2} \tau, \quad (5)$$

$$\Delta W_O = R_\Sigma \frac{P_\tau^2}{U_\tau^2} \tau, \quad (6)$$

де  $R_\Sigma$  – сумарний еквівалентний опір системи, в якій визначаються втрати;

$U_\tau$ ,  $Q_{\Phi\tau}$ ,  $P_\tau$  – відповідно діюче значення напруги, реактивна потужність по Фризе та активна потужність, що передаються до навантаження за термін часу  $\tau$ .

Оскільки величини  $\Delta W_D$  і  $\Delta W_O$  є випадковими, в роботі також отримано вирази їх математичних сподівань і дисперсій, із яких випливає, що найбільшу дію на дисперсію втрат  $D[\Delta W_D]$  чинять коливання фідерних струмів: величина  $D[\Delta W_D]$  залежить від квадрату дисперсії струму  $D_I^2$ .

В якості кінцевого результату розділу приведена узагальнена методика розрахунку непродуктивних втрат електроенергії, яка враховує характер зміни (ергодичність, стаціонарність) стохастичних процесів напруги та струму в мережі.

У **четвертому розділі** визначено енергетичні показники та непродуктивні втрати електроенергії для лінії зовнішнього електропостачання. Для цього виконано гармонійний аналіз напруги та струму, які живлять безпосередньо тягові агрегати з 6-ти (рис. 4, а) і 12-пульсними (рис. 4, б) схемами випрямлення, на основі якого отримано такі показники якості електроенергії, згідно ГОСТ 13109-97, як коефіцієнт  $n$ -ої гармонійної складової та сумарний коефіцієнт спотворення синусоїдності напруги. Встановлено, що у режимі відносно слабкого тягового навантаження ці показники задовольняють вимогам вищевказаного ГОСТу за нормально допустимими значеннями, але зі

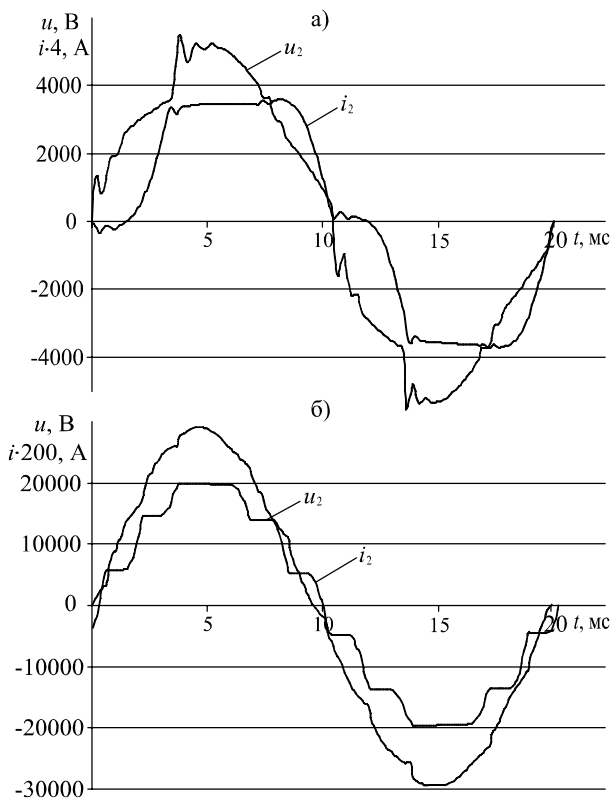


Рис. 4. – Осцилограми вхідної напруги та струму до ТП з 6-ти (а) та 12-пульсною (б) схемою випрямлення в режимі тягового навантаження.

зростанням навантаження синусоїди і струму і напруги спотворюються таким чином, що не задовольняють навіть гранично допустимим значенням (рис. 5). Сумарний коефіцієнт спотворення синусоїдності напруги  $K_U$  склав 10,5% та

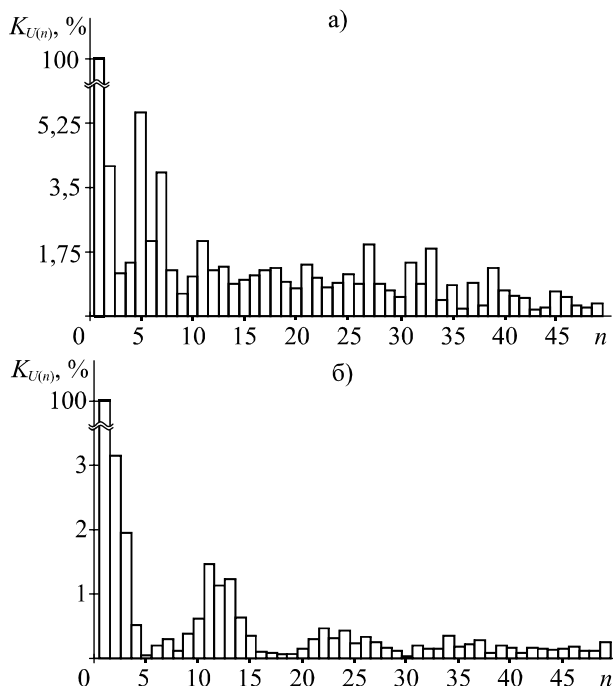


Рис. 5. – Значення коефіцієнтів  $n$ -ої гармонійної складової вхідної напруги до ТП з 6- ти (а) та 12-пульсною (б) схемою випрямлення в режимі тягового навантаження.

Значення  $I_{THD}$  склало 17,1% та 9,9% для підстанції з 6- ти та 12- пульсною схемою випрямлення відповідно. Слід зазначити, що якість струму також не задовольняє вимогам закордонних стандартів.

Як результат зазначеного аналізу отримано складові повної потужності і чисельні значення енергетичних показників та продуктивних і непродуктивних втрат електроенергії. Коефіцієнт реактивної потужності склав 0,273 та 0,137, продуктивні – 45,5 кВт·год. та 278 Вт·год., непродуктивні втрати електроенергії – 2,5 кВт·год. та 378 Вт·год. для підстанції з 6- ти та 12- пульсною схемами випрямлення відповідно.

**У п'ятому розділі** на основі виконаних імовірно-статистичного і кореляційно-спектрального аналізів випадкових процесів фідерних і підстанційних напруг і струмів та з використанням аналітичних співвідношень, отриманих в розділі 3, приведені і проаналізовані результати чисельних розрахунків показників якості електроенергії, складових повної потужності, енергетичних показників та непродуктивних втрат електроенергії в тягових мережах ряду міжпідстанційних зон.

Зокрема встановлено, що окрім високочастотних коливань випрямлених напруги і струму, які мають електромагнітне походження, присутні низькочастотні зміни цих напруг і струмів, які мають технологічне

4,6% для схеми з 6- ти та 12- пульсною схемою випрямлення при гранично допустимому 8% та нормально допустимому 4% значенні відповідно.

Крім цього, посилаючись на закордонний досвід, в роботі отримано чисельні значення показника якості електроенергії відносно струму, яким є сумарний коефіцієнт спотворення синусоїдності струму  $I_{THD}$  та коефіцієнт  $n$ - ої гармонійної складової струму:

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{49} (I^{(n)})^2}}{I^{(1)}} 100\%, \quad (7)$$

$$K_{I(n)} = \frac{I^{(n)}}{I^{(1)}} 100\%, \quad (8)$$

де  $I^{(1)}$  та  $I^{(n)}$  – діючі значення першої та вищих гармонік струму відповідно.

походження і навіть до цього часу залишаються без уваги дослідників. Тобто коливання (обвідної) випрямлених значень обумовлені коливаннями технологічного навантаження (ЕРС), масою, швидкістю ведення поїзда, профілем колії, режимом роботи енергосистеми тощо. Аналіз напруги свідчить, що  $U(t)$  є стаціонарним ергодичним процесом, значення якого на всіх досліджуваних ТП протягом доби змінюються в широкому діапазоні: від 2831 до 3961 В. Вигляд гістограм, незначні величини коефіцієнту асиметрії

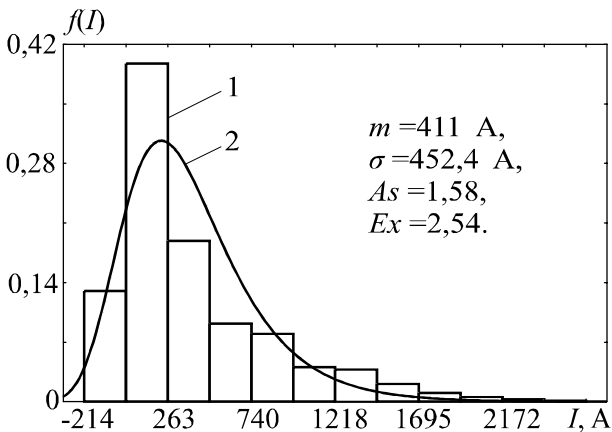


Рис. 6. – Статистичне (1) і теоретичне (2) розподілення фідерних струмів ТП «Горяїново» за добу.

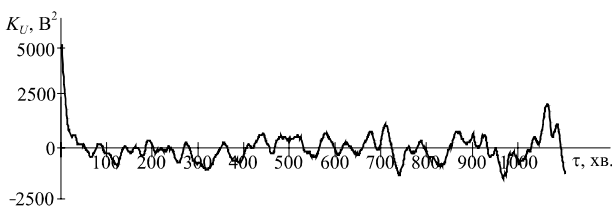


Рис. 7. – Кореляційна функція випрямленої напруги на шинах ТП «Слав'янка».

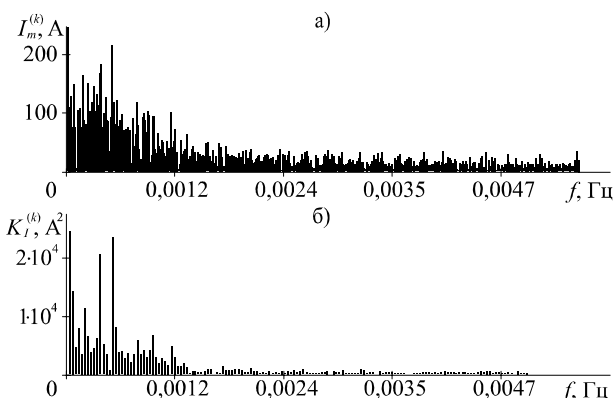


Рис. 8. – Спектр миттєвого графіку фідерного струму (а) та «хвоста» кореляційної функції (б) ТП «Письменна».

асиметрії  $As$  і ексцесу  $Ex$ , а також величина імовірності  $p=0,17\dots 0,25$  за критерієм Пірсона дозволяють зробити висновок, що імовірнісним законом розподілення випрямленої фідерної напруги ТП є закон Гауса. Вигляд гістограм фідерного і підстанційного струмів, а також додатні знаки та значення асиметрії і ексцесу свідчать про те, що імовірнісний закон розподілення струмів не є законом Гауса (рис. 6), що і підкреслюється додатнім знаком великих значень (від 0,26 до 1,89) коефіцієнта асиметрії  $As$ . Крім цього, ексцес  $Ex$  додатній і теж має великі значення (від 1,45 до 3,8).

Для виявлення у випадковому процесі невинуватих періодичних коливань було застосовано кореляційно-спектральний метод, який полягає в застосуванні перетворення Фур'є не до конкретної реалізації випадкового процесу напруги чи струму, а безпосередньо до незатухаючої частини його кореляційної функції (рис. 7), що дозволяє відфільтрувати періодичні низькочастотні коливання від власне випадкового процесу. Спектри випадкового процесу випрямленого струму, визначені за реалізацією, а також по кореляційній функції, наведено на рис. 8. Вони свідчать про наявність як випадкових коливань, так і інтергармонік в діапа-

зоні частот  $0,0003 \dots 0,0015$  Гц, що обумовлено низькочастотними технологічними коливаннями навантаження. Коливання напруги також містять як випадкові коливання, так і інтергармоніки у зазначених величинах в діапазоні частот  $0,0005 \dots 0,0012$  Гц. Наприкінці цих аналізів за допомогою поняття спектральної густини (рис. 9) була підрахована енергія випадкових процесів зміни напруги та струму. Встановлено, що енергія періодичних коливань (інтергармонік) у нарузі в ТМ становить величини до 10%, а струму до 16% від повної енергії всього випадкового процесу.

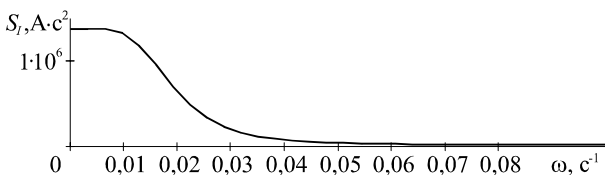


Рис. 9. – Графік спектральної густини фідерного струму ТП «Письменна».

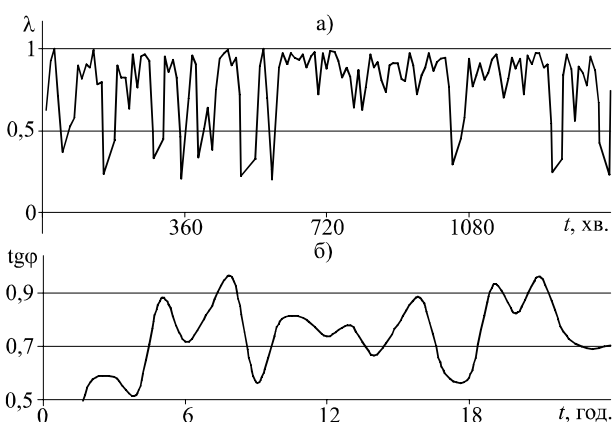


Рис. 10. – Часові залежності «миттєвих» значень коефіцієнта потужності  $\lambda$  (а) і «погодинних» значень коефіцієнта реактивної потужності  $\text{tg}\varphi$  (б) фідера 3,3 кВ ТП «Горяїново».

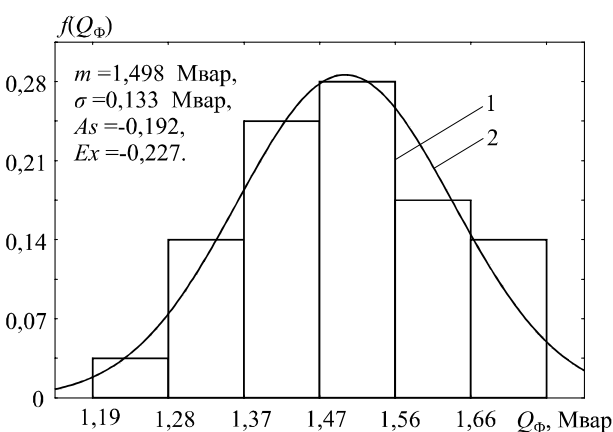


Рис. 11. – Статистичне (1) і теоретичне (2) розподілення «добових» значень реактивної потужності по Фризе фідера ТП «Горяїново» на ділянці Горяїново-Сухачівка

Коливання в тяговій мережі випрямлених напруги та струму призводять до зміни в часі споживаної повної потужності  $S(t)$ , та її складових: активної  $P(t)$  і реактивної по Фризе  $Q_\Phi(t)$ , які є теж різкозмінними процесами і які, в свою чергу, обумовлюють відповідні зміни коефіцієнта потужності  $\lambda(t)$  та коефіцієнта реактивної потужності  $\text{tg}\varphi(t)$  (рис. 10). В дисертації отримані залежності «миттєвих», «погодинних» та «добових» змін, а також гістограми та теоретичні закони розподілення зазначених величин (напр.  $Q_\Phi(t)$  на рис. 11).

Тягові кола ЕРС, а також ТМ разом з ТП споживають значну  $Q_\Phi$ , яка пульсує між ТП та ЕРС й тим самим обумовлює значні непродуктивні втрати електроенергії  $\Delta W_D$  в ТМ. Визначення  $\Delta W_D$  здійснювали за виразом (5), а продуктивних втрат  $\Delta W_O$  – за (6). Для визначення  $R_\Sigma$  виконували спеціальні експериментальні дослідження. Величини  $\Delta W_D$  і  $\Delta W_O$  змінюються в часі (рис. 12) і тому після дискретизації являють собою випадкові величини, «миттєві» значення яких підкорюються експо-

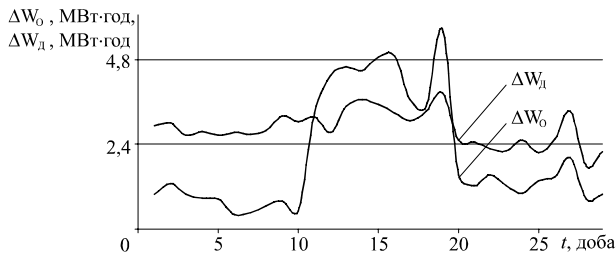


Рис. 12. – «Добові» залежності непродуктивних  $\Delta W_{\text{д}}$  та продуктивних  $\Delta W_{\text{о}}$  втрат електроенергії для ТМ ділянки Горяїново-Сухачівка.

ненціальному закону, «погодинні» – логарифмічно-нормальному, а «добові» – за Гауссом (з  $As = -0,007$ ;  $Ex = -0,475$ ). Розкид  $\Delta W_{\text{д}}$  за добу, наприклад для ділянки Горяїново-Сухачівка, складає 417,7...5675,9 кВт·год. при математичному сподіванні 2849,5 кВт·год. (таблиця).

Для аналізу тяговоенергетичних процесів важливим є не лише абсолютні значення  $\Delta W_{\text{д}}$  і  $\Delta W_{\text{о}}$ , але

й їх відносні величини, які приведені в таблиці, і із якої випливає, що для усіх досліджених в дисертації ділянок «добові» значення непродуктивних втрат електроенергії  $\Delta W_{\text{д}}$  складають 5,62...9,93% (а максимальні значення ~13%) по відношенню до споживаної (активної) електроенергії  $W$  і 100,4...136,7% відносно продуктивних втрат  $W_{\text{о}}$  і 11,22...17,2% загальних втрат  $W = \Delta W_{\text{д}} + \Delta W_{\text{о}}$  відносно споживаної електроенергії  $W$ . Отже, непродуктивні втрати майже на 15...37% перевищують продуктивні втрати, що й зобов'язує розробку організаційно-технічних заходів по їх зменшенню (бажано до нуля).

Таблиця  
Чисельні значення різних видів втрат електроенергії для деяких ділянок тягового електропостачання

Види втрат електроенергії	«Добові» значення втрат на ділянках		
	Горяїново-Сухачівка, $l = 12$ км	Письменна-Ул'янівка, $l = 20$ км	Слав'янка-Миколаївка, $l = 22$ км
Активна електроенергія, $W$ , кВт·год.	28684,9	37872,0	24461,5
Продуктивні втрати, $\Delta W_{\text{о}}$ , кВт·год.	2085,0	2791,7	1357,1
Непродуктивні втрати, $\Delta W_{\text{д}}$ , кВт·год.	2849,5	3216,8	1362,0
$\Delta W_{\text{о}}/W$ , %	7,27	7,34	5,60
$\Delta W_{\text{д}}/W$ , %	9,93	8,50	5,62
$\Delta W_{\text{д}}/\Delta W_{\text{о}}$ , %	136,7	116,2	100,4
$(\Delta W_{\text{о}} + \Delta W_{\text{д}})/W$ , %	17,20	15,84	11,22

У шостому розділі запропоновано та проаналізовано ряд способів підвищення енергетичних показників системи електричної тяги постійного струму за рахунок зниження непродуктивних втрат електроенергії.



Одним із заходів по вирішенню цієї задачі пропонується доповнення традиційної схеми некерованого чи керованого випрямляча на ТП вольтододатковим перетворювачем з одночасною заміною існуючого згладжуючого реактора на новий оптимальної форми і параметрів. В роботі проведено розрахунок і отримано основні технічні характеристики такого реактора. Цей захід дозволить не лише підвищити коефіцієнт потужності живлячої мережі до 0,98...0,99, але й знизити на 17,18% втрати електроенергії і намоткового матеріалу в згладжуючих реакторах.

Також була розроблена методика визначення форми та параметрів струму компенсуючого пристрою, за якою можливо повністю компенсувати інтергармоніки та внаслідок цього знизити непродуктивні втрати електроенергії.

Для зниження непродуктивних втрат електроенергії від технологічних коливань тягового струму необхідно цілком виключити з його спектру гармоніки, що стійко виявляються у випадковому процесі  $i(t)$  і на яких зосереджена значна енергія коливань струму. Таку компенсацію можна здійснити за допомогою використання гібридного фільтра послідовного типу, схемне рішення якого описано в роботі.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі на основі результатів виконаних теоретичних і експериментальних досліджень вирішена важлива науково-технічна задача підвищення ефективності використання та якості електроенергії в системі тягового електропостачання постійного струму. Отримані результати у сукупності мають суттєве значення в області електричного транспорту і його електропостачання.

Основні наукові результати, висновки і практичні рекомендації полягають у наступному.

1. Нарівні зі щорічним зростанням кількості електроенергії, що витрачається безпосередньо на електричну тягу від 82,5 до 85,1% (за період 2004-2009 рр.), а також збільшенням її закупівельного тарифу від 9,9 до 39,0%, найбільш помітним є також зростання об'єму (від 3286,4 до 5322,4 млн. квар за ті ж роки) реактивної потужності, споживаної залізницями і відповідно плата за неї (від 19,27 до 41,03 млн. грн.). Останнє, а, точніше, перетоки реактивної потужності, обумовлюють великі непродуктивні (додаткові) втрати електроенергії в живлячих мережах електрифікованих ділянок залізниць. І в той же час питання визначення, аналізу і зниження цих втрат залишається без уваги, як з боку Укрзалізниці, так і наукових кіл, що не дозволяє свідомо розробити достатні заходи по підвищенню рівня ефективності електропостачання в системі електричної тяги постійного струму.
2. Традиційна класична система критеріїв – коефіцієнтів (зсуву, спотворення, несиметрії, нерівномірності і реактивної потужності) оцінки

ефективності електроенергетичних процесів в системі електричної тяги повинна бути доповнена таким додатковим енергетичним показником як непродуктивні (додаткові) втрати електроенергії в проводах зовнішніх і тягових мереж, абсолютна величина яких пропорційна квадрату реактивної потужності по Фризе  $Q_{\phi}$ , що перетікає в елементах системи, а їх дисперсія пропорційна квадрату дисперсії тягового струму.

3. Розроблені в дисертації методи («дискретної електротехніки», дискретного перетворення Фур'є та кореляційних функцій) і методика визначення енергетичних показників системи тягового електропостачання достатньо точні (~2% похибки), мають узагальнений характер і тому у повній мірі застосовувані як при детермінованому, так і стохастичному нестационарному неергодичному характеру зміни фідерних напруг і тягових струмів.
4. Вхідні напруга і струм, тобто в точках приєднання до живлячих ліній досліджених тягових підстанцій з 6-пульсними некерованими випрямлячами, суттєво несинусоїдні з  $\varphi^{(1)} = +6^\circ$ . Сумарний коефіцієнт спотворення напруги  $K_U$  перевищує нормально (6%) і гранично (8%) допустимі значення і складає 10,5%, а інтегральний показник гармонійного складу струму  $I_{THD} = 17,1\%$ , що також вище нормативної величини. Коефіцієнт реактивної потужності  $\text{tg}\varphi = 0,237$ , а непродуктивні втрати електроенергії  $\Delta W_{\text{д}}$  в одному лінійному проводі живлячої лінії електропередачі склали 2,5 кВт·год. На вхідних затискачах досліджених тягових підстанцій з 12-пульсними некерованими випрямлячами спотворення напруги і струму, істотно менші, що впливає із таких значень:  $\varphi^{(1)} = +4^\circ$ ,  $K_U = 4,6\%$ ,  $I_{THD} = 9,91\%$ ,  $\text{tg}\varphi = 0,124$ . В результаті спостерігаються менші непродуктивні втрати електроенергії, які склали 0,38 кВт·год.
5. Фідерна випрямлена напруга  $U(t)$  на шинах +3,3 кВ у квазістационарному режимі являє собою випадковий стаціонарний ергодичний процес з одномірним у перетинах реалізацій статистичним розподіленням за законом Гаусса з функціями математичного сподівання  $m_U(t) = 3323 \text{ В}$  і дисперсії  $D_U(t) = 6742 \text{ В}^2$ .

Показники якості електроенергії не відповідають вимогам ГОСТ 13109-97:

- відхилення напруги складають 6,6...17,4% при нормативних 5% і граничних 10% значеннях;
- різкозмінні неперервні коливання напруги знаходяться в інтервалі 13,88...29,7% при нормально допустимих 6...10%. Особливо великий розмах коливань на пунктах секціонування, до 47,12% (напруга знижується до 2110 В при нормі 2700 В згідно з правилами технічної експлуатації);

- глибина провалів напруги досягає 36,1%.
6. Як фідерні, так і підстанційні випрямлені тягові струми являються стохастичними нестационарними процесами зі статистичним негауссовим у перетині реалізацій розподіленням (з асиметрією  $As = 1,26...2,03$  і ексцесом  $Ex = 1,45...4,84$ ). Фідерні струми більш різкозмінні, ніж підстанційні і змінюються протягом доби в діапазоні  $-150...2940$  А з  $m_I = 412...640$  А і  $\sigma_I = 442,9...524,3$  А.
  7. Спектральний склад як миттєвих графіків випрямлених напруг і струмів, так і «хвостів» їх кореляційних функцій свідчить, що випадкові процеси  $U(t)$  і  $I(t)$  містять інтергармоніки з діапазоном частот  $0,3 \cdot 10^{-3}...1,5 \cdot 10^{-3}$  Гц, енергія яких складає відповідно 9% і 16% відносно повних енергій процесів зміни  $U(t)$  і  $I(t)$ .
  8. Часові залежності реактивної потужності по Фризе (неактивної потужності)  $Q_\Phi(t)$ , як і повної  $S(t)$  та активної  $P(t)$  потужностей, що передаються по тяговій мережі від тягової підстанції до електрорухомого складу, є різкозмінними функціями. Статистичні розподілення «миттєвих» (середніх за кожні 10 хв.) і «погодинних» (середніх за кожну годину) значень випадкової величини  $Q_\Phi$  не є гауссовськими з математичними сподіваннями відповідно  $0,02...3,375$  Мвар і  $0,3...2,5$  Мвар; «добові» (середні за кожну добу) підкоряються нормальному закону з параметрами:  $m_{Q_\Phi} = 0,55...2,2$  Мвар,  $As = -0,192$ ,  $Ex = -0,227$ .
  9. Динамічний характер потужностей  $S$ ,  $P$ ,  $Q_\Phi$  обумовлюють також динамічні часові зміни випадкових величин коефіцієнта потужності  $\lambda(t)$  і коефіцієнта реактивної потужності  $\text{tg}\varphi$ . Математичне сподівання «добових» значень  $\lambda$  склало ( $m_\lambda = 0,595$ ), а розкиди  $0,38...0,784$ , тобто менші, ніж нормативні значення  $0,92...0,95$ . Відповідно не виконується і нормативне значення  $\text{tg}\varphi = 0,25$ , оскільки фактичні значення дорівнюють:  $m_{\text{tg}\varphi} = 1,431$ , а розкиди  $-0,8...2,56$ . Стан дотримання нормативних значень «миттєвими» і «погодинними» значеннями величин  $\lambda$  і  $\text{tg}\varphi$  дещо кращий: найбільш імовірні значення  $\lambda$  спостерігаються в діапазоні  $0,92...0,98$ , а  $\text{tg}\varphi - 0,27...0,59$ .
  10. Непродуктивні  $\Delta P_D(t)$  і продуктивні  $\Delta P_O(t)$  втрати електроенергії в тягових мережах досліджених підстанційних ділянок є також випадковими величинами; в деякі інтервали часу  $\Delta P_D > \Delta P_O$ , а в деякі  $\Delta P_D < \Delta P_O$ . Величина непродуктивних втрат  $\Delta P_D$  суттєво, у четвертому ступені, залежить від середньоквадратичного відхилення реактивної потужності  $\sigma_{Q_\Phi}^4$ . При цьому абсолютні «миттєві» значення випадкових

$\Delta P_d$  підкоряються експоненціальному закону з розкидом 7,5...102,4 кВт і вони відносяться як:  $\Delta P_d / \Delta P_o \approx 38\%$ .

11. «Добові» непродуктивні втрати електроенергії підкоряються нормальному закону з параметрами, наприклад, для однієї із тягових мереж дослідженої ділянки:  $M[\Delta W_d] = 2849,5$  кВт·год.,  $\sigma[\Delta W_d] = 529,2$  кВт·год.,  $As = -0,007$ ,  $Ex = -0,475$ .

Загалом для усіх досліджених тягових мереж непродуктивні втрати електроенергії  $\Delta W_d$  складають 5,62...13,0% по відношенню до споживаної (активної) електроенергії  $W$  і 100,4...136,7% відносно продуктивних втрат  $\Delta W_o$ ; одночасно, загальні втрати  $\Delta W = \Delta W_d + \Delta W_o$  складають 11,22...17,2% відносно споживаної  $W$ .

12. Підвищення ефективності тягового електропостачання системи постійного струму можливо застосуванням підстанційних випрямлячів з вольтододатковим перетворювачем (із замкненою системою компенсації) з одночасною заміною існуючих згладжуючих реакторів на нові оптимальної форми і параметрів, а також застосуванням гібридних фільтрів послідовного типу. За рахунок економії електроенергії, який має місце при використанні цих засобів, річний економічний ефект складає 401149 грн. на одну міжпідстанційну зону.

***Основні положення і результати дисертації опубліковані в таких роботах:***

1. Костин Н. А. Методы определения составляющих полной мощности в системах электрической тяги / Н. А. Костин, А. В. Петров // Технічна електродинаміка. Тем. вип. «ПСЕ – 2011». – 2011. – Ч. 3. – С. 53-59.
2. Костін М. О. Миттєва реактивна потужність у системах електричного транспорту постійного струму / М. О. Костін, О. І. Саблін, О. Г. Шейкіна, А. В. Петров // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2007. – Вип. 79. – С. 3-8.
3. Петров А. В. Показники якості електричної енергії в системі електричної тяги постійного струму / А. В. Петров // Вісник ДНУЗТ. – 2010. – № 32. – С. 180-183.
4. Петров А. В. Методи спектрального аналізу випадкових технологічних коливань напруги та струму фідера ТП постійного струму / А. В. Петров // Вісник ДНУЗТ. – 2010. – № 34. – С. 77-80.
5. Костін М. О. Зниження непродуктивних втрат електроенергії – найважливіша задача підвищення ефективності електроспоживання системами електричної тяги / М. О. Костін, П. Є. Михаліченко, А. В. Петров // Залізничний транспорт України. – 2009. – №2. – С. 43-44.

6. Петров А. В. Непродуктивні втрати електроенергії в тяговому електропостачанні системи постійного струму / А. В. Петров, М. О. Костін // Вісник ДНУЗТ. – 2010. – № 31. – С. 106-110.
7. Петров А. В. Згладжуючий реактор з оптимальними параметрами для тягових підстанцій постійного струму / А. В. Петров // Гірничя електромеханіка та автоматика. – 2010. – Вип. 85. – С. 26-32.
8. Костин Н. А. Интергармоники тягового тока и напряжения в системах электрического транспорта постоянного тока / Н. А. Костин, О. И. Саблин, А. В. Петров // Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції «EPQ-2008». – Україна, Маріуполь, 2008– С. 51-54.
9. Костін М. О. Компенсация неактивных мощностей электроподвижного состава / М. О. Костін, О. І. Саблін, А. В. Петров // Тези доповідей 71 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ, 2011. – С. 111-112.

### АНОТАЦІЯ

Петров А.В. Непродуктивні втрати електроенергії в системі електропостачання електричної тяги постійного 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, 2011.

Дисертація присвячена підвищенню ефективності електропостачання системи тяги постійного струму за рахунок зниження непродуктивних втрат електроенергії, визначених на основі досліджень балансу реальних електроенергетичних процесів, що протікають у силових тягових колах та системі зовнішнього електропостачання.

В роботі розроблено метод визначення енергетичних показників, а також непродуктивних втрат електроенергії в системі електропостачання електричної тяги постійного струму, з точки зору випадкового характеру зміни напруг і струмів. Отримано та проаналізовано значення цих електричних величин як для системи зовнішнього електропостачання, так і для тягової мережі.

Ключові слова: непродуктивні втрати, електроенергія, реактивна, Фризе, потужність, випадкові процеси, напруга, струм, інтергармоніки.

### АННОТАЦИЯ

Петров А. В. Непродуктивные потери электроэнергии в системе электроснабжения электрической тяги постоянного 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, 2011.

Диссертация посвящена повышению эффективности электроснабжения системы тяги постоянного тока за счет снижения непродуктивных потерь электроэнергии, определенных на основе исследований баланса реальных электроэнергетических процессов, протекающих в силовых тяговых цепях и системе внешнего электроснабжения.

Изложены теоретические предпосылки и адаптированы к системам электрической тяги постоянного тока методы определения составляющих полной мощности и коэффициентов мощности, а также непродуктивных потерь электроэнергии. Разработан новый метод – метод корреляционных функций, учитывающий стохастический характер изменения тока и напряжения на фидерах тяговой подстанции. Выведены формулы для расчета вышеуказанных величин.

Исследованы энергетические показатели и непродуктивные потери электроэнергии для ЛЭП, которые питают 6-ти и 12-пульсные выпрямительные установки. Установлено, что в режиме относительно слабой тяговой нагрузки такие показатели качества электроэнергии, как коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения и коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения удовлетворяют требованиям ГОСТа на качество электроэнергии, однако при росте нагрузки кривые напряжения и тока искажаются так, что указанные показатели не удовлетворяют даже предельно допустимым нормам.

Выполнены вероятностно-статистический и корреляционно-спектральный анализы случайных процессов фидерных и подстанционных напряжений и токов. При помощи аналитических соотношений, полученных в диссертации, приведены и проанализированы результаты численных расчетов показателей качества электроэнергии, составляющих полной мощности, энергетических показателей и непродуктивных потерь электроэнергии в тяговых сетях ряда межподстанционных зон. В частности установлено, что кроме высокочастотных колебаний выпрямленного напряжения и тока, имеющих электромагнитное происхождение, присутствуют низкочастотные колебания этих величин (интергармоники), имеющие технологическое происхождение.

Установлено, что тяговые цепи ЭПС, а также тяговая сеть вместе с ТП потребляют значительную неактивную мощность, которая пульсирует между ТП и ЭПС и тем самым обуславливает значительные непродуктивные потери электроэнергии в тяговой сети.

Показано, что для анализа энергетических процессов в тяговой сети важными являются не только абсолютные значения непродуктивных потерь электроэнергии, но и их отношения к продуктивным потерям и к потребленной активной электроэнергии. Получены и проанализированы численные значения таких отношений.

Предложен ряд мер по улучшению формы напряжения и тока как в

питающей линии, так и в тяговой сети. Среди них: предложено дополнение традиционной схемы управляемого или неуправляемого выпрямителя на ТП вольтодобавочным преобразователем, с одновременной заменой существующего токоограничивающего реактора на новый с оптимальными формой и параметрами, расчет которого выполнен в диссертации; разработана методика определения формы и параметров тока компенсирующего устройства, алгоритмом которой возможна компенсация интергармоник тока и напряжения; предложено использование гибридного фильтра для исключения из спектра тока и напряжения гармоник. Вследствие этого улучшаются качество электроэнергии и энергетические показатели, а также снижаются непродуктивные потери электроэнергии в системах внешнего и тягового электроснабжения.

Получено значение экономического эффекта, при условии использования предложенных мероприятий, для одной межподстанционной зоны.

Результаты диссертационной работы приняты к использованию в службе «Э» Приднепровской железной дороги, а также в учебном процессе Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна.

Ключевые слова: непродуктивные потери, электроэнергия, реактивная, Фризе, мощность, случайные, напряжение, ток, интергармоники.

### **ABSTRACT**

Petrov A.V. Non-productive power losses in the electrical supply system of DC electric traction. – Manuscript.

Thesis for a candidate degree in engineering sciences in speciality 05.22.09 – electric transport. – Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Dnepropetrovsk, 2011.

The dissertation is dedicated to increasing of the efficiency of direct current electric traction systems by minimization of additional power losses that are determined on the basis of studies of real electric power balance processes that occur in power traction and external power supply system.

A method for evaluation of energy factors and additional power losses in the electricity system of DC electric traction has been developed in the view of a random nature of voltages and currents changing. The values of these electrical parameters have been obtained and analyzed for both external power supply system and traction network.

Key words: non-productive losses, electric power, reactive, Fryze, power, random process, voltage, current, interharmonics.

ПЕТРОВ АНДРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

**НЕПРОДУКТИВНІ ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ  
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ ПОСТІЙНОГО  
СТРУМУ**

АВТОРЕФЕРАТ

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

Надруковано згідно з оригіналом автора

Підписано до друку 1.09.2011 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 1,0.

Зам. № \_\_\_\_ . Тираж 100.

Видавництво Дніпропетровського національного університету залізничного  
транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Свідоцтво суб'єкта видавничої діяльності ДК № 1315 від 31.03.2003

Адреса видавництва та дільниці оперативної поліграфії:  
вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, 49010  
[www.ditrvv.dp.ua](http://www.ditrvv.dp.ua)