

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

На правах рукопису

Петров Андрій Володимирович

УДК 621.313.333

НЕПРОДУКТИВНІ ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ  
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

ДИСЕРТАЦІЯ  
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник –  
доктор технічних наук, професор  
Костін Микола Олександрович

Дніпропетровск – 2011

## ЗМІСТ

ПРИЙНЯТІ УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ .....	5
ВСТУП.....	6
 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ. ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	14
1.1 Оцінка втрат електроенергії в пристроях тягового електропостачання системи постійного струму .....	14
1.2 Існуючі поняття та розрахункові співвідношення реактивної потужності .....	19
1.3 Компенсація неактивних потужностей.....	23
1.4 Висновки до розділу 1 .....	32
 2 УМОВИ, МЕТОДИКИ ТА ПРИЛАДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	35
2.1 Обґрунтування методу досліджень .....	35
2.2 Моніторинг напруг і струмів на елементах електрифікованих ділянок	36
2.2.1 Реєстрація напруг і струмів на виході районної підстанції, що живить тягову підстанцію .....	37
2.2.2 Фіксація напруг і струмів на вході тягової підстанцію .....	38
2.2.3 Реєстрація випрямлених напруг і струмів на виході тягової підстанції.....	38
2.3 Планування та імовірнісна обробка випадкових процесів напруги та струму.....	39
2.4 Методика оцінки показників якості електроенергії в системі .....	43
2.5 Висновки до розділу 2 .....	44
 3 ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ТА МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ПОКАЗНИКІВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ .....	46

3.1 Критерії ефективності електроенергетичних процесів тягового електропостачання. Енергетичні характеристики і показники .....	46
3.2 Методи визначення складових повної потужності системи .....	53
3.2.1 Інтегральні форми потужностей.....	54
3.2.2 Миттєві потужності .....	63
3.3 Методи визначення непродуктивних втрат електроенергії.....	68
3.3.1 Фідерні напруга і струм – стаціонарні ергодичні випадкові процеси .....	69
3.3.2 Фідерні напруги і струми – нестаціонарні випадкові процеси ...	73
3.4 Узагальнена методика розрахунку непродуктивних втрат електроенергії .....	77
3.5 Висновки до розділу 3 .....	79
 4 ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ЛІНІЙ ЗОВНІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ .....	81
4.1 Додаткові умови досліджень .....	81
4.2 Гармонійний склад напруги і струму та енергетичні показники лінії, що живить 6- пульсний випрямляч .....	83
4.3 Гармонійний склад напруги і струму та енергетичні показники лінії, що живить 12- пульсний випрямляч .....	88
4.4 Висновки до розділу 4 .....	93
 5 НЕПРОДУКТИВНІ ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ .....	95
5.1 Характер зміни фідерних напруги і струму та показники якості електроенергії.....	95
5.2 Імовірісно-статистичний і кореляційно-спектральний аналізи випрямленої напруги .....	102
5.3 Імовірісно-статистичний і кореляційно-спектральний аналізи фідерних і підстанційних струмів .....	120

5.4 Потужності та коефіцієнти потужностей тягових мереж .....	136
5.5 Непродуктивні втрати електроенергії в тягових мережах .....	149
5.5.1 Визначення еквівалентного активного опору тягової мережі міжпідстанційної зони (на прикладі ділянки Горяїново-Сухачівка) .....	150
5.5.2 Чисельна оцінка втрат електроенергії в тяговій мережі .....	154
5.6 Висновки до розділу 5 .....	165
 6 МЕТОДИ ТА ПРИСТРОЇ КОМПЕНСАЦІЇ НЕАКТИВНИХ ПОТУЖНОСТЕЙ .....	169
6.1 Постановка задачі .....	169
6.2 Вольтододатковий перетворювач зі згладжуючим реактором з оптимальними параметрами .....	170
6.3 Компенсація інтергармонік .....	179
6.3.1 Обґрунтування і методика визначення форми та параметрів струму компенсуючого пристрою .....	179
6.3.2 Схема гібридного фільтра .....	183
6.4 Розрахунок можливого річного економічного ефекту .....	189
6.5 Висновки до розділу 6 .....	190
 ВИСНОВКИ .....	191
 СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	196
 ДОДАТКИ .....	212

## ПРИЙНЯТІ УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

ЛЕП	–	лінія електропередачі
ПСК	–	пост секціонування
ТФ	–	тяговий фідер
СЕТ	–	система електричної тяги
СЕП	–	система електропостачання
РП	–	районна підстанція
ТП	–	тягова підстанція
ТМ	–	тягова мережа
ЕРС	–	електрорухомий склад
ТЕД	–	тяговий електричний двигун
ЯЕ	–	якість електроенергії
ПЯЕ	–	показники якості електроенергії
ВГ	–	вищі гармоніки
ІГ	–	інтергармоніки
АФ	–	активний фільтр
ГФ	–	гібридний фільтр
КП	–	компенсуючий пристрій
КРП	–	компенсатор реактивної потужності
ФП	–	фільтруючий пристрій
ФКП	–	фільтрокомпенсуючий пристрій
ПТЕ	–	правила технічної експлуатації

## ВСТУП

### Актуальність теми

З усієї споживаної залізницями України електроенергії основна її частина, 82,5...85,1%, використовується безпосередньо на електричну тягу поїздів [1-3]. 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. [1-3]. Середнє значення коефіцієнта реактивної потужності  $\text{tg}\varphi$  за останні 5 років по Укрзалізниці склало 0,5 при нормативній величині 0,25. 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 [4]. 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 [5-11]. І якщо такий підхід цілком виправданий при розрахунках нових систем електропостачання (СЕП) 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 умовно поділяти на

продуктивні (основні) та непродуктивні (додаткові) [12]. 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 електричних мережах промислової енергетики ці втрати складають до 20% [13-14].

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 [15-16]. 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. [1], а отже зросли непродуктивні втрати. Тому лише непродуктивні втрати найбільш точно відображають економічні сторони електропостачання, базуються на усіх чотирьох факторах неякості електроенергії в системі 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 лише розрахунковим методом. В той же час в

електроенергетиці електрифікованих залізниць взагалі відсутні і співвідношення, і методика оцінки непродуктивних втрат, існує лише методика оцінки загальних технологічних втрат [17], що базується на показанні лічильників, які, як відомо, вимірюють з великими похибками навіть в колах з несинусоїдними напругою і струмом, а в той же час фідерні напруги і струм мають випадковий характер. Останнє не дозволяє використовувати класичні поняття і вирази теоретичної електротехніки для визначення неактивної потужності і непродуктивних втрат електроенергії, потрібна розробка нових підходів, методів і аналітичних виразів. Одночасно, з метою зменшення цих втрат необхідна компенсація неактивної потужності, перетіканням якої і обумовлюються додаткові 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 СЕТ 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 і задачі досліджень**

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.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі.

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 імовірісно-статистичну і кореляційно-спектральну обробки 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 одержаних 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 визначання 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 нестаціонарним 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 СЕП 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 нестаціонарних 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 наладці роботи фідерів ТП, а також ТМ електрифікованих ділянок Придніпровської залізниці.

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 [103] – розроблено методи визначення повної потужності в системах електричної тяги; [107] – виконано чисельні розрахунки

миттєвої реактивної потужності у системах електричного транспорту постійного струму; [127, 128] – отримано співвідношення для непродуктивних втрат електроенергії; [137] – виконано аналіз інтергармонік тягового струму і фідерної напруги в системах електричного транспорту; [140] – запропоновано способи компенсації неактивних потужностей в системі електротяги постійного струму.

Роботи [119, 125, 131] 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.