

СИЧЕНКО В.Г.

САЄНКО Ю.Л.

БОСИЙ Д.О.

ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У ТЯГОВИХ МЕРЕЖАХ
ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ

Монографія

Дніпропетровськ, 2015

УДК 621.332.3:621.311-021.465
ББК 39.217 (УКР)
С 41
ISBN 978-966-97463-8-2
Видавництво ПФ «Стандарт-Сервіс»
Дніпропетровськ, 2015

*Рекомендовано до друку Вченою радою Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.
Протокол № 8 від 30.03.2015 р.*

Рецензенти:

д.т.н., проф. Гриб О.В.
д.т.н., проф. Хворост М.В.
д.т.н., проф. Шкрабець Ф.П.

**ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У ТЯГОВИХ МЕРЕЖАХ
ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ**

С 41 Сиченко В.Г., Саєнко Ю.Л., Босий Д.О.: ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У ТЯГОВИХ МЕРЕЖАХ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ: Монографія/ За загальною редакцією Сиченка В.Г. – Дн-вск: Видавництво ПФ «Стандарт-Сервіс», 2015.- 344 с.-ISBN 978-966-97463-8-2

УДК 621.332.3:621.311-021.465
ББК 39.217 (УКР)

Монографію написали: Сиченко В.Г. – передмова, розділи 1, 4, 7.2;
Саєнко Ю.Л. – розділи 2-3, 7.1;
Босий Д.О. – розділи 5-6, 7.3.

У монографії розглянуті загальні підходи до проблеми якості електричної енергії в тягових мережах, проблематика та нормативно-правове регулювання у сфері якості електричної енергії, результати експериментальних досліджень якості електричної енергії у системах тягового електропостачання постійного та змінного струму, питання обліку електричної енергії при несинусоїдних режимах роботи тягових підстанцій, а також методи і засоби поліпшення якості електричної енергії.

Монографія розрахована на наукових та інженерно-технічних працівників електрифікованих залізниць, які займаються питаннями проектування і експлуатації пристроїв тягового електропостачання та може бути корисною студентам, які навчаються за фахом «Електротехнічні системи електроживлення».

Рис. 210, табл. 33, бібл. 165 назв.

© Сиченко В.Г., Саєнко Ю.Л., Босий Д.О., 2015
© Дніпропетровський національний
університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна, 2015
© ТОВ «Електротягові системи», 2015
© Видавництво ПФ «Стандарт-Сервіс», 2015

ISBN 978-966-97463-8-2

ПЕРЕДМОВА

Вирішення проблеми якості електричної енергії у загальній структурі ресурсо- та енергозбереження має важливе народногосподарське значення. Перехід економіки України на енергозберігаючий шлях розвитку забезпечує зменшення питомої енергоємності національного доходу, значне скорочення витрат на використання паливно-енергетичних ресурсів в першу чергу, у сфері виробництва та споживання електричної енергії.

Одним з основних напрямків розвитку електроенергетики та електрифікації є інтенсифікація та підвищення ефективності наукових досліджень з проблеми електромагнітної сумісності (ЕМС), успішне вирішення якої багато в чому визначається комплексом науково-технічних досліджень, пов'язаних з оптимізацією якості електроенергії та зниженням її втрат в системах електропостачання електричних залізниць і промислових підприємств.

Вирішення цієї задачі обумовлене тим, що сучасний етап розвитку промисловості і транспорту характеризується постійним зростанням підприємств, що використовують в технологічних процесах енергоємне електротехнічне обладнання. Режим їх роботи пов'язаний як з симетричним, так і несиметричним відбором потужності від трифазної системи, значною часткою споживання реактивної потужності на частоті основної гармоніки з несинусоїдною формою кривих споживаного струму і живлячої напруги (напівпровідникові перетворювачі, електровози постійного і змінного струму, дугові сталеплавильні та рудотермічні печі, установки електрозварювання, та ін.). Впровадження таких приймачів електроенергії (ЕП) веде до істотного зниження показників якості електроенергії (ПЯЕ) в системах електропостачання та негативно позначається на їх техніко-економічних показниках.

Система електропостачання залізниць - це складна технічна система, що піддається різним зовнішнім впливам, обумовленим різкозмінними, потужними за величиною, несиметричними та нелінійними тяговими навантаженнями. При їх впливі система тягового електропостачання реагує зміною параметрів режиму роботи - модулів і фаз напруг, перетоків потужностей та струмів, здійснюючи при цьому негативний вплив як на систему зовнішнього живлення, так і на суміжні пристрої. Для забезпечення надійної роботи та підвищення якості

електричної енергії необхідно, в першу чергу, забезпечити умови для зменшення у тяговій мережі відхилень та коливань напруги.

У даній монографії розглядаються наступні питання: загальні підходи до проблеми якості електричної енергії в тягових мережах, характеристика електромагнітних процесів та питання організації експериментальних досліджень (розділ 1), проблематика якості електричної енергії (розділ 2) та нормативно-правове регулювання у сфері якості електричної енергії (розділ 3), результати експериментальних досліджень якості електричної енергії у системах тягового електропостачання постійного та змінного струму (розділи 4, 5), питання обліку електричної енергії при несинусоїдних режимах роботи тягових підстанцій (розділ 6), методи і засоби поліпшення якості електричної енергії (розділ 7).

Автори вважають за необхідне відзначити, що створення цієї монографії було б неможливим, якби вони не мали б можливості використовувати поради і допомогу працівників електрифікованих залізниць. Висловлюємо щирі подяки начальникам Головного управління електрифікації та електропостачання Малишко І.В., Данильченко В.І., Максимчуку В.Ф., головному інженеру ЦЕ Лагуті І.І., начальнику технічного відділу ЦЕ Фітіну В.О., начальникам служб електропостачання: Придніпровської залізниці – Отрудько О.С., Самкову О.О., Одеської залізниці – Суглобову О.І., Кучмію С.М., Львівської залізниці – Фесику М.О., Південної залізниці – Козачку М.П., Кравчуку С.М., Донецької залізниці – Бітюкову С.Д., Південно-Західної залізниці – Сухомлинову В.О., начальникам ЕЧ – Малишу С.М., Крітіну О.І., Гнатюку М.М., Скибі В.П., Козачку В.М., Юценку С.В., Антонишину В. В., начальникам ДЕЛ – Лутчаку Г.І., Барні А.І., Кордіну О.П., Попковичу С.В., усім електрифікаторам, які допомагали у проведенні експериментальних досліджень.

Висловлюємо щирі подяки рецензентам: д.т.н., проф. Грибу О. Г., д.т.н., проф. Хворосту М. В., д.т.н., проф. Шкрабцю Ф. П., зауваження і поради яких сприяли поліпшенню книги. Особлива подяка Косареву Є. М. та Міронову Д. В. за допомогу в оформленні рукопису.

Автори усвідомлюють, що ширина і спектр порушених питань з проблематики якості електричної енергії у тягових мережах не дозволили в повній мірі їх деталізоване висвітлення в плані формулювання окремих питань, тому з вдячністю приймуть зауваження та пропозиції щодо поліпшення змісту книги. Просимо надсилати їх на адресу: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. ак. В. Лазаряна, 2, ДНУЗТ, кафедра Електропостачання залізниць.

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

АБ - автоблокування
АД - асинхронний двигун
АН - автономний інвертор напруги
АРН - автоматичне регулювання напруги
АСКОЕ - автоматизована система комерційного обліку електричної енергії
АФ - активний фільтр
АЧХ - амплітудно-частотна характеристика
БК - батарея конденсаторів
БФ - блок формування
ВАХ - вольт-амперна характеристика
ВГ - вищі гармоніки
ВДП - вольтодавальний перетворювач
ВЛ - високовольтна лінія
ВН - висока напруга
ВП - вентиляний перетворювач
ВФ - відсмоктувальний фідер
ГДЗ - гранично допустимі значення
ДПР - два проводи-рейка
ДРП - джерело реактивної потужності
ДСП - дугова сталеплавильна піч
ЕЕ - електроенергія
ЕЕС - електроенергетична система
ЕМЗ - електромагнітна завада
ЕМС - електромагнітна сумісність
ЕМП - електромагнітні перешкоди
ЕОМ - електрична обчислювальна машина
ЕП - приймач електроенергії
ЕПЗ - електропостачання залізниць
ЕПП - екрануючий та підсилюючий проводи
ЕРС - електрорухомий склад
ЗВТ - засоби вимірювальної техніки
ЗФ - згладжуючий фільтр
КЗ - коротке замикання
ККД - коефіцієнт корисної дії
КН - коливання напруги

КП - компенсуючий пристрій
КРП - компенсація реактивної потужності
КСО - короточасне струмообмеження
ЛАТР - лабораторний автотрансформатор
ЛЗ - лінія зв'язку
МЕК - міжнародна електротехнічна комісія
НДЗ - нормально допустиме значення
НКРЕ - Національна комісія регулювання електроенергетики
НН - низька напруга
ОП - основний перетворювач
ОТБ - одноагрегатний тяговий блок
ПА - перетворювальний агрегат
ПБВ - перемикач без збудження
ПВД - перетворювач вольтододатку
ПЕ - поздовжнє електропостачання
ПК - поздовжня компенсація
ПЛЕП - повітряна лінія електропостачання
ПТЕ - правила технічної експлуатації
ПТС - перетворювальний сухий трансформатор
ПС - пост секціонування
ПЯЕ - показники якості електроенергії
РП - реактивна потужність
РПН - регулювання під навантаженням
САУНШ - система безконтактного автоматичного регулювання напруги на шинах тягової підстанції
САФ - силовий активний фільтр
СД - синхронний двигун
СЕП - система електропостачання
СЗЕ - система зовнішнього електропостачання
СІФК - система імпульсно-фазового керування
СК - синхронний компенсатор
СТЕ - система тягового електропостачання
СТК - статичний компенсатор
СП - симетруючий пристрій
СУПА - система управління перетворювального агрегату
СТАРНК - система телеавтоматичного регулювання напруги в контактній мережі
ТАБ - трансформатор автоблокування

ТЕЦ - теплова електроцентраль
ТЗП - точка загального приєднання
ТП - тягова підстанція
ТР - технічний регламент
ТС - телесигналізація
ТУ - телеуправління
УТРНК - пристрої телеавтоматичного регулювання напруги в контактній мережі
ФДЧ - фільтр дискретних частот
ФКП - фільтро-компенсуючий пристрій
ФНЗП - фільтр напруги зворотної послідовності
ФНЧ - фільтр низьких частот
ФСП - фільтро-симетруючий пристрій
ШАУН - шафа автоматичного регулювання напруги
ШІМ - широтно-імпульсна модуляція
ШІР - широтно-імпульсне регулювання
ЯЕ - якість електроенергії

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО ПРОБЛЕМИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

1.1. Вплив електроенергетичних процесів у системах тягового електропостачання на якість електричної енергії

Система тягового електропостачання електрифікованої залізниці (СТЕ) представляє собою складну електродинамічну розподілену систему, яка характеризується стохастичним характером параметрів функціонування, що змінюються у просторі, площині і часі, змінюючи електромагнітну обстановку у системі СТЕ-суміжні пристрої (система зовнішнього електропостачання, лінії зв'язку, інформаційні канали передачі даних, канали телеуправління та телесигналізації, рейкові кола і т. і.). Виникаючі взаємодії представляють складний електромагнітний процес, який має нестационарний та нелінійний характер.

Будь-яке електромагнітне середовище формується як результат певного технологічного процесу. У електроенергетичному процесі СТЕ - це розподіл, передача і споживання електроенергії. Кожному етапу цього процесу властиві певні зміни, викликані відхиленнями від заданого режиму, принципом дії електроустаткування і його станом, діями обслуговуючого персоналу, кліматичними чинниками, роботою засобів захисту і автоматики.

Електромагнітна обстановка, як сукупність електромагнітних явищ, що існують в даному середовищі, описується характеристиками джерел завад, параметрами їх дії, особливостями електротехнічних засобів, заходами, направленими на забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС), а також зовнішніми чинниками, впливаючими на вказані характеристики (кліматичні, механічні, виробничі і т.п.). Важливою характеристикою електромагнітної обстановки є рівень ЕМС. Рівень ЕМС - це встановлене значення електромагнітної завади (ЕМЗ), при якій з найбільшою ймовірністю гарантується нормальна взаємодія (функціонування) всіх технічних засобів, що є як джерелами завад, так і засобами, сприйнятливими до цих завад.

Коло питань, які визначають зміст ЕМС у СТЕ, досить велике і, у загальному, зводиться до вирішення таких основних завдань: оцінці

РОЗДІЛ 2

ПРОБЛЕМА ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

2.1. Загальні положення

Разом з проблемою енергоресурсозбереження, проблема якості електроенергії належить до найважливіших проблем сучасної електроенергетики. Коло питань, що становлять зміст цієї проблеми, досить велике і, в основному, зводиться до наступних: оцінці електромагнітної сумісності джерел електромагнітних завад і інших навантажень, тобто вплив низькочастотних електромагнітних завад на електроустановки і оцінка економічного збитку, що виникає при цьому; оцінці значень електромагнітних завад, генерованих різними нелінійними і різкозмінними навантаженнями, прогнозування їх значень в різних вузлах систем електропостачання, і, нарешті мінімізації їх рівнів до значень, допустимих відповідними стандартами, в окремих випадках - з використанням оптимізаційних рішень.

Таким чином, кажучи про проблему ЯЕ, можна виділити її основні аспекти: нормативний, розрахунковий, технічний і економічний. У останнє десятиліття істотний розвиток отримує економічний і правовий аспекти проблеми. Це дозволяє зробити висновок про те, що проблема якості електроенергії може розглядатися як самостійна наукова дисципліна, самостійна галузь знань, що сформувалася в останні десятиліття минулого століття разом з такими новими дисциплінами, як логістика, мехатроніка, екологія та ін.

Найбільш високу значущість проблеми ЯЕ ілюструє її економічний аспект. Так, за останніми даними, опублікованим в європейських і американських періодичних журналах щорічний економічний збиток, обумовлений низькою якістю електроенергії, складає від 50 до 500 млрд. євро за рахунок негативного впливу, головним чином вищих гармонік, а також несиметрії і коливань напруги.

Ріст встановленої потужності нелінійних, а також несиметричних і різкозмінних навантажень навіть в розвинених країнах випереджає впровадження заходів по мінімізації генерованих

РОЗДІЛ 3

НОРМАТИВНО-ПРАВОВЕ РЕГУЛЮВАННЯ В ОБЛАСТІ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

3.1. Загальні положення

Поняття електромагнітної сумісності (ЕМС) виникло ще на початку розвитку радіотехніки (кінець ХІХ століття) і мало вузьке смислове значення - пошук засобів боротьби з перешкодами радіоприйому. Сучасне поняття ЕМС виходить далеко за рамки класичного захисту від радіоперешкод, проте, як і раніше, включає його.

Нині проблема ЕМС належить до найважливіших і найбільш значущих разом з проблемами екології, енергетичної безпеки і енергоресурсозберігання. Щорічний економічний збиток, обумовлений незадовільним рівнем сумісності в промисловості і побуті, складає (за різними оцінками) від 100 до 500 млрд. євро.

Проблема якості електроенергії (ЯЕ), як зазначалось вище, є складовою частиною проблеми ЕМС. Нормування показників якості електроенергії (ПЯЕ) здійснюється згідно ГОСТ [8]. Він введений в дію на території України з 01.01.2000 р. ГОСТ встановлює як номенклатуру ПЯЕ і норми ЯЕ, так і засадничі вимоги до контролю, методів і засобів вимірів ПЯЕ.

У Російській федерації з 1 січня 2013 р. введений в дію новий стандарт на якість електроенергії ГОСТ Р 54149-2010 замість існуючого ГОСТ 13109-97. Метою розробки нового стандарту було введення в дію в РФ нового нормативного документу за вимогами до ЯЕ, що відповідає ринковим стосункам в електроенергетиці і економіці країни, враховує рекомендації і положення міжнародних стандартів і нових національних стандартів по методах і засобах виміру і оцінки показників ЯЕ, а також зближення структури і положень цього стандарту з європейським стандартом EN 50160:2010.

Основні відмінності ГОСТ Р 54149-2010 від діючого ГОСТ 13109-97 відносяться до сфери застосування стандарту, його структури і змісту, термінів і їх визначень, визначень і нормування ПЯЕ, відповідальності за ЯЕ мережевих організацій і споживачів, урахуванню вимог до ЯЕ в ізольованих системах електропостачання, вимогам до контролю і вимірів ПЯЕ.

РОЗДІЛ 4

ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У СИСТЕМІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

При проведенні експериментальних досліджень, виконувався аналіз основних показників якості електричної енергії на різних тягових підстанціях постійного струму електрифікованих залізниць України (табл. 4.1) різних регіонів. Крім того, на двох тягових підстанціях (№ 11, 12) дослідження виконувались протягом 1 тижня (7 діб), що є рекомендованим інтервалом спостереження відповідно до ГОСТ 13109-97. На декількох тягових підстанціях виконувались штучні досліди короткого замикання в тяговій мережі (табл. 4.1, поз. 7, 9, 10). За допомогою вимірювальної техніки зафіксовано перехідні процеси, які мають місце при виникненні коротких замикань.

Таблиця 4.1

Дані дослідних тягових підстанцій

№ поз.	Назва тягової підстанції та належність до залізниці	Схема випрямлення	Досліджувані приєднання
1	Лавочне, Льв.	6-п., інв.	110, 35, 10, 3.3 кВ
2	Сколе, Льв.	6-п., інв.	110, 10 кВ
3	Очеретине, Дон.		110, 10 кВ
4	Основа, Півд.		110, 10 кВ
5	Синельникове, Прдн.	6-п., 12-п.	10, 3.3 кВ
6	Новомосковськ, Прдн.	6-п.	35, 10, 3.3 кВ
7	Сартана, Дон.	6-п.	35, 3.3 кВ (К.З.)
8	Богуславський, Прдн.		35 кВ
9	Слов'янськ, Дон.	12-п.	35, 3.3 кВ (К.З.)
10	Верхньодніпровськ, Прдн.	6-п.	35, 3.3 кВ (К.З.)
11	Воловець, Льв.	6-п., інв.	35, 3.3 кВ
12	Красноармійськ, Дон.	6-п.	35, 10, 6, 3.3 кВ

Примітка. Позначення (К.З.) вказує, що на тяговій підстанції досліджувався тільки режим короткого замикання.

4.1. Аналіз показників якості напруги в первинній мережі 110 кВ

Режим напруги в первинній мережі тягових підстанцій електрифікованих залізниць є визначальним фактором в оцінці

РОЗДІЛ 5

ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У СИСТЕМІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ ЗМІННОГО СТРУМУ

5.1. Специфіка роботи системи тягового електропостачання змінного струму

На залізницях України, електрифікованих по системі змінного струму 25 кВ, застосовується електрорухомий склад з перетворювачами однофазного змінного струму або в постійний для живлення двигунів постійного струму або в трифазний змінний для живлення асинхронних двигунів. Електрорухомий склад живиться електричною енергією від системи зовнішнього електропостачання через систему тягового електропостачання. Безпеку руху поїздів забезпечує система сигналізації, централізації та блокування. Таким чином, робота електрифікованого залізничного транспорту являє собою взаємодію різних підсистем і стійка та надійна робота електрифікованих залізниць неможлива без забезпечення їх електромагнітної сумісності між собою.

Крім того, електрифіковані залізниці змінного струму є несиметричним нелінійним споживачем зі змінним навантаженням, розподіленим у просторі, а тягові підстанції отримують живлення від різних вузлів енергосистем. Електроенергетичні процеси в системі зовнішнього електропостачання взаємопов'язані з процесами в системі тягового електропостачання.

Тягові підстанції електрифікованих залізниць змінного струму виконують перетворення електричної енергії за допомогою триобмоткових трансформаторів. Метою їх глобального застосування було одночасне живлення розгалужених районних мереж та потужного однофазного тягового навантаження. Зниження капітальних затрат внаслідок живлення великих районів від обмотки середньої напруги, вочевидь, не враховувало можливого порушення якості електричної енергії безпосередньо на затисках районних споживачів.

На межі балансової належності систем зовнішнього і тягового електропостачання умови їх узгодження характеризуються якістю спожитої електроенергії та перетіканнями реактивної потужності.

РОЗДІЛ 6

ОБЛІК ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У НЕСИНУСОЇДНИХ РЕЖИМАХ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ

Взаємовідносини між продавцем і покупцем будуються в першу чергу на кількісній, якісній та вартісній оцінці товару. Електрична енергія, що постачається енергопостачальними організаціями, виступає як товар, що характеризується збігом у часі процесів виробництва, транспортування і споживання. Разом з тим до електроенергії, як до товару будь-якого виду, застосовуються категорії “кількість” і “якість”. Таким чином, зростаючі вимоги до точності обліку кількості електричної енергії при необхідній якості базуються на економічній основі.

У реальних умовах виробництва, перетворення, розподілу і споживання електроенергії виникають спотворення форми синусоїдного струму і напруги. Ці спотворення виникають при генерації електроенергії, її передачі мережею і, головним чином, при споживанні, пов'язаному з випрямленням чи інвертуванням.

В даний час зі зміною виробничо-економічної ситуації в країні, зміною структури ринку електричної енергії загострюються проблеми обліку електричної енергії, зростають вимоги до систем електропостачання.

Широко застосовувані нині лічильники електричної енергії розробляються і проходять перевірку виходячи з припущення, що напруга в мережі є синусоїдною, і вміст вищих гармонік в струмі навантаження не перевищує 10 %. На зазначений рівень спотворень опираються при виборі матеріалів та алгоритмів розрахунку при проектуванні та виробництві приладів обліку.

Однак, більшість споживачів є нелінійними, і при включенні таких електроприймачів в мережу, в споживаному ними струмі і напрузі з'являється значний вміст вищих гармонік. І, очевидно, що цей факт буде впливати на похибку приладу, призначеного для роботи в колах з практично синусоїдними сигналами.

Нижче приводяться дослідження, проведені в лабораторних умовах, щодо визначення похибки вимірювання потужності в колі з нелінійним навантаженням електронними лічильниками розповсюджених типів, перевірки відповідності класу точності,

РОЗДІЛ 7

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У ТЯГОВИХ МЕРЕЖАХ

7.1. Узагальнені принципи підвищення якості електричної енергії

7.1.1. Регулювання напруги

Одним із способів регулювання напруги є поздовжня компенсація (ПК) індуктивного опору повітряних і кабельних ліній систем електропостачання. Для цього в розтин лінії включається батарея конденсаторів (БК). На рис. 7.1 представлена схема включення БК в розтин лінії [93].

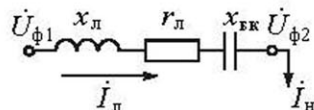


Рис. 7.1. Схема включення БК для компенсації індуктивного опору лінії

Векторна діаграма для лінії з БК представлена на рис. 7.2.

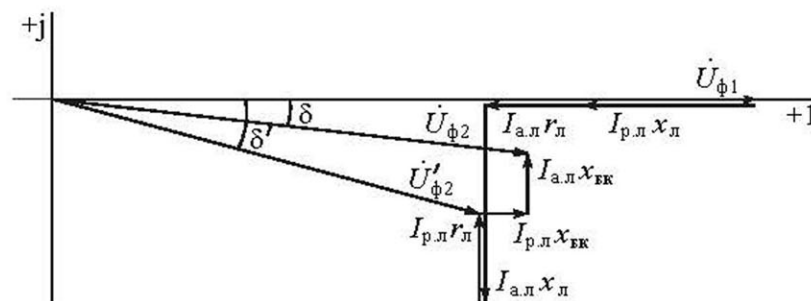


Рис. 7.2. Векторна діаграма для схеми рис. 7.1

З векторної діаграми слідує, що установка ПК забезпечує збільшення напруги у кінці лінії при незмінній напрузі на початку лінії.

Якщо навантаження задане потужністю, то поздовжня складова падіння напруги з урахуванням впливу БК

$$\delta U_y = \frac{P_H r_L + Q_H (x_L - x_{БК})}{U_2}, \quad (7.1)$$

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Карташев, И. И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения / И. И. Карташев. – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 120 с.
2. Кириленко, О.В. Моделирование энергетических процессов у системах энергопоставки при выполнении заданий энергосбережения / О. В. Кириленко, С. П. Денисюк // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України, Електродинаміка: Зб. наук. пр.– Київ: ІЕД НАН України, 2001.– С. 87-91.
3. Жаркин, А.Ф. Нормативно-правовое регулирование качества электрической энергии. Анализ украинских и европейских законодательных актов и нормативно-технических документов / А. Ф. Жаркин, В. А. Новский, С. А. Палачев. – К.: ІЕД НАН України, 2010. – 167 с.
4. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
5. Босий, Д. О. Підвищення ефективності електропостачання системи електричної тяги змінного струму: дис. к.т.н.: 05.22.09 / Д. О. Босий. – Д., 2010. – 165 с.
6. Мамошин, Р. Р. Повышение качества энергии на тяговых подстанциях дорог переменного тока / Р. Р. Мамошин – М.: Транспорт, 1973. – 167 с.
7. Жежеленко, И. В. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий: монография / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, Т. К. Бараненко, А. В. Горпинич, В. В. Нестерович. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 294 с.
8. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электропоставки общего назначения. – К.: Держстандарт, 1999. – 24 с.
9. Сиченко, В. Г. Дослідження режиму напруги в тяговій мережі змінного струму при рекуперації електроенергії / В.Г.Сиченко, В.Г.Кузнецов, Д.О.Босий // Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. пр. – Маріуполь, 2008. – Вип. 18. – ч. 2 – С. 35–39.
10. Сиченко, В. Г. Оцінка ефективності функціонування пасивних згладжуючих фільтрів тягових підстанцій постійного струму / В.Г.Сиченко, В.А.Зубенко // Вісник Дніпропетровського національного технічного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 25. – С. 63-68.
11. Сиченко, В. Г. Дослідження показників якості електричної енергії на тягових підстанціях постійного струму / В. Г. Сиченко, В. А. Зубенко, Д. О. Босий, М. О. Фесик, В. М. Козачок, В. М. Коротун // Гірнична електромеханіка та автоматика. Науково-технічний збірник НГУ. – 2008. – Вип. 81. – С. 53-60.
12. Сиченко, В. Г. Аналіз режимів напруги на приєднаннях тягових підстанцій змінного струму / В.Г.Сиченко, Д.О.Босий // Вісник Дніпропетровського національного технічного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 29. – С. 82-86.

13. Сиченко, В. Г. Дослідження якості електричної енергії в лініях автоблокування та поздовжнього електропостачання на електрифікованих ділянках постійного струму / В. Г. Сиченко // Гірнича електромеханіка та автоматика. Науково-технічний збірник НГУ. – 2009. – Вип. 83. – С. 57-65.
14. Сиченко, В. Г. Показники якості електроживлення у тягових мережах постійного струму / В. Г. Сиченко // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. Спец. випуск. – К.: ІЕД НАНУ, 2011. – Ч. 2. – С. 5-13.
15. Советов, Б. Я. Моделирование систем / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – М.: Высшая школа, 2001. – 343 с.
16. Электрические системы. Математические задачи электроэнергетики / Под ред. В. А. Веникова. – М.: Высшая школа, 1981. – 288 с.
17. Бадер, М. П. Электромагнитная совместимость / М. П. Бадер. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.
18. Пугачев, В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления / В. С. Пугачев. – М.: ГИФМЛ, 1960. – 884 с.
19. Химмельблау, Д. Анализ процессов статистическими методами / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1973. – 960 с.
20. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
21. Сиченко, В. Г. Дослідження електромагнітних процесів у системі тягового електропостачання постійного струму: проблеми, технічні засоби та реалізація / В. Г. Сиченко, В. А. Зубенко, Д. О. Босий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011. – № 2. – С. 58-63.
22. Жежеленко, И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. – 4-е изд., перераб. и доп. / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
23. Вагин, Г. Я. Режимы электросварочных машин / Г. Я. Вагин. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
24. Нормирование показателей качества электрической энергии и их оптимизация / Под ред. А. Богуцкого, А. З. Гамма, И. В. Жежеленко. Гливице: Изд-во Силезского политехнического института, 1988.
25. Жежеленко, И. В. Проблемы качества электроэнергии / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко // Промелектро. – 2002. – № 4. – С. 13–26.
26. Жежеленко, И. В. Электромагнитные помехи в системах электроснабжения промышленных предприятий / И. В. Жежеленко, О. Б. Шиманский. – Киев: Вища школа, 1986.
27. Mielczarski W. Quality of electricity supply. Electrical power quality and utilization. Crac 7w, 1997, p.15-23.
28. Montsinger V. M., Clem J. E. Temperature limits for shorttime overloads for oil-insulated neutral grounding reactors and transformers. Trans AJEE, 1956, 65, pt.11, p.966-973.

29. Warder S.B., Friedlander E., Arman A.N. The influence of rectifier harmonics in a railway system on the dielectric stability of 33 kV cables // Proc. IEE. – 1951. – Vol. 98. – P. 399 – 421.

30. Нормирование показателей качества электрической энергии и их оптимизация / Под ред. А. Богуцкого, А. З. Гамма, И. В. Жежеленко. Гливице: Изд-во Силезского политехнического института, 1988.

31. Вагин, Г. Я. Расчет ущербов от колебаний напряжения / Г.Я.Вагин // В кн.: Повышение качества электрической энергии в промышленных электрических сетях. – М.: МДНТП, – 1982. – С.51-56.

32. Трофимов, Г.Г. Качество электроэнергии и его влияние на работу промышленных предприятий / Г. Г. Трофимов. – Алма-Ата: Изд-во КазНИИТИ, 1986.

33. Hartman M., Hashad M., Iwazkiewicz I. Nowy parameter jakości energii elektrycznej – migotanie światła // EPN'2000. Materiały konferencyjne. Zielona Góra. 2000. S.43–57.

34. Кармашов, В. С. Федеральный закон «О техническом регулировании» направления совершенствования отношений при производстве, транспортировании, распределении и потреблении электрической энергии / В. С. Кармашов, А. В. Цапенко // Вести в электроэнергетике. – 2003. – № 3. – С.32–37.

35. Mielczarski W. Quality of electricity supply // Electrical power quality and utilization. Cracow. 1997. S.15–23.

36. Жежеленко, И. В. Методы оценки долевого участия вклада потребителей в уровень несинусоидальности в точке общего подключения / И. В. Жежеленко, Ю.Л.Саенко // IV Międzynarodowy Polsko-Ukraińskie Seminarium Naukowy “Problemy Elektroenergetyki”, Lodz, October, 2004.

37. Зыкин, Ф. А. Определение степени участия нагрузок в снижении качества электроэнергии / Ф. А. Зыкин // Электричество. – 1992. – № 11. – С.13–19.

38. Chun Li, Wilsur Xu. On Defining Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling // IEEE Power Engineering Review, July, 2002.

39. Сиченко, В. Г. Электроживлення пристроїв залізничної автоматики / В. Г. Сиченко, В. І. Гаврилюк. – Д.: Вид-во Маковецький, 2009. – 372 с.

40. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1964. – 462 с.

41. Мирошниченко, Р. И. Режимы работы электрифицированных участков / Р. И. Мирошниченко. – М.: Транспорт, 1982. – 207с.

42. ГОСТ 6962-75. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений. Госстандарт СССР, 1975. – 4с.

43. Довгалюк, О. М. Оценка закона распределения функции напряжения в питающих электрических сетях / О. М. Довгалюк // Світлотехніка та електроенергетика. – 2008. – № 1 – С. 70-75.

44. Сыченко, В. Г. Методология моделирования отклонений напряжения в подсистемах тягового электроснабжения постоянного тока / В. Г. Сыченко // Гірнична електромеханіка та автоматика. Науково-технічний збірник НГУ. – 2012. – Вип. 89. – С. 48-53.
45. Марквардт, Г. Г. Применение теории вероятностей и вычислительной техники в системе энергоснабжения / Г. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1972. – 224 с.
46. Мищенко, Т. Н. Вероятностные характеристики случайной функции напряжения на токоприёмнике первого украинского электровоза ДЭ 1 / Т. Н. Мищенко, П. Е. Михаличенко, Н. А. Костин // Електротехніка і Електромеханіка. – 2003. – №. 2 – С. 43-46.
47. Сиченко, В. Г. Діагностування згладжуючих фільтрів тягових підстанцій постійного струму / В. Г. Сиченко, М. П. Бадьор, В. А. Зубенко // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2000. – № 2. – С. 80-84.
48. Бессонов, А. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / А. А. Бессонов. – 11 изд. – М.: Гардарики, 2006. – 701 с.
49. Вентцель, Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М.: Высшая школа, 2007. – 479 с.
50. Маевский, О. А. Энергетические показатели вентиляльных преобразователей / О. А. Маевский. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
51. ГОСТ 26567-85. Преобразователи электрической энергии полупроводниковые. Методы электрических испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 56 с.
52. Зиновьев, Г. С. Основы силовой электроники. Учебное пособие / Г. С. Зиновьев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 672 с.
53. Гончаров, Ю. П. Перетворювальна техніка. ч. 2 / Ю. П. Гончаров, В. Г. Будьонний, В. Г. Морозов/під. ред. В. С. Руденка.–Харків:Фоліо, 2000.– 357 с.
54. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций/ под ред. М. Г. Шалимова. – М.: Транспорт, 1990. – 127 с.
55. Анохов, І. В. Про електромагнітну сумісність електрифікованих залізничних ліній постійного струму / І. В. Анохов, М. П. Бадьор, В. І. Гаврилюк, В. Г. Сиченко // Залізничний транспорт України. – 2000. – № 2.- С. 10-12.
56. Солодунов, А. М. Перетворювальні устройства електропоездов с асинхронними тяговими двигателями / А. М. Солодунов, Ю. М. Иньков, Г. Н. Коваливкер, В. В. Литовченко. – Рига: Зинатне, 1991. – 351 с.
57. Лозинова, Н. Г. Подавление высших гармоник в схемах передач постоянного тока с применением активных фильтров / Н. Г. Лозинова, М. И. Мазуров, А. В. Николаев // Электрические станции. – 2005. – № 12. – С. 59-63.

58. Рациональные режимы вождения поездов и испытания локомотивов / Под ред. С. И. Осипова. – М.: Транспорт, 1984. – 280 с.
59. Аржанников, Б. А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока / Б. А. Аржанников. – Екатеринбург: УрГУПС, 2010. – 176 с.
60. Марикин, А. Н. Стабилизация напряжения на токоприемниках подвижного состава электрифицированных железных дорог постоянного тока: Автореф. дис. д-ра техн. наук. 05.22.07 / А. Н. Марикин. – Санкт-Петербург, 2008. – 36 с.
61. Аржанников, Б. А. Тяговое электроснабжение постоянного тока скоротного и тяжеловесного движения поездов / Б. А. Аржанников. – Екатеринбург: УрГУПС, 2012. – 207 с.
62. Патент на корисну модель № 51917, H02M 7/00. Перетворювальний агрегат для тягової підстанції постійного струму/ Панасенко М. В., Гончаров Ю. П., Сиченко В. Г., Божко В. В. – Опубл. 10.08.2010, Бюл. № 15.
63. Дослідження забезпечення пропускної спроможності пристроями електропостачання при електрифікації ділянок К–Б, З–Д / Звіт з науково-дослідної роботи № 23.57.08.09, № держреєстрації 0108U10671. – Дніпропетр. нац. ун-т залізнич. трансп. – Дніпропетровськ. – 2009. – 105 с.
64. Дослідження підвищення ефективності використання автоматичної компенсації реактивної потужності на тяговій підстанції Ч / Звіт з науково-дослідної роботи № 23.58.08.08, № держреєстрації 0109U002984. – ДНУЗТ, Дніпропетровськ. – 2008. – 86 с.
65. Жежеленко, И. В. Источники интергармоник в системах электроснабжения и методы их расчета / И. В. Жежеленко, Саенко Ю. Л., Бараненко Т. К. – Промислова електроенергетика та електротехніка. – 2002, № 12. – С. 194-201.
66. 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, темат. вип., Ч. 3., 2009. – С. 86-89.
67. Bollen, M.H.J. Signal Processing of Power Quality Disturbances / M.H.J. Bollen, I.Y.H. Gu. – Piscataway, NJ.: IEEE Press, 2006. – 861 p.
68. Отнес, Р. Прикладной анализ временных рядов / Отнес Р., Энноксон Л. – М.: Мир, 1982. – 428 с.
69. Крогерис, А. Ф. Мощность переменного тока / А. Ф. Крогерис, К. К. Рапшевиц. – Рига: Физ.энерг. ин-т Латв. АН. – 294 с.
70. Казаков, О. А. Реактивная мощность как характеристика преобразования составляющих энергии электромагнитного поля / О. А. Казаков. – Инженерная физика. – 1999. – № 1. – С. 50-59.
71. Тонкаль, В. Е. Баланс энергий в электрических цепях / В. Е. Тонкаль, А. В. Новосельцев, С. П. Денисюк и др. – АН Украины. Ин-т пробл. энергосбережения. – К.: Наук. думка, 1992. – 312 с.

72. Костенко, М. П. Электромагнитные процессы в системах с мощными выпрямительными установками / М. П. Костенко, Л. Р. Нейман, Г. Н. Бладзевич. – АН СССР, 1946. – 107 с.
73. Тамазов, А. И. Несимметрия токов и напряжений вызываемая однофазными тяговыми нагрузками / А. И. Тамазов. – М.: Транспорт, 1965. – 235 с.
74. Капустин, Л. Д. Надежность и эффективность электровозов ВЛ80р в эксплуатации / Л. Д. Капустин, А. С. Копанев, А. Л. Лозановский. – М.: Транспорт, 1986. – 240 с.
75. Власьевский, С. В. Математическое моделирование процессов коммутации в выпрямительно-инверторных преобразователях электровозов однофазно-постоянного тока / С. В. Власьевский: Монография. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2001. – 138 с.
76. Власьевский, С. В. Улучшение формы напряжения контактной сети при работе электровозов с тиристорными выпрямителями / С. В. Власьевский, В. Г. Скорик, О. В. Мельниченко. – Вестник ВНИИЖТ, № 5. – 2007. – С. 42-46.
77. Власьевский, С. В. Система учета расхода и контроля качества электрической энергии, потребляемой электровозами на тягу поездов / С. В. Власьевский, О. А. Климова, В. Г. Скорик. – Вестник ДВГУПС. – 2007. – С. 3-10.
78. Руководство по эксплуатации для части поставки Сименс. Электровоз ДС3 25 кВ/50 Гц. № E44010–B0640–U085. – 2006. – 49 с.
79. Дослідження впливу рекуперації при русі поїздів змінного струму на якість електроенергії в первинній мережі та розробка рекомендацій / Звіт з науково-дослідної роботи № 23.51.07.08, № держреєстрації 0107U010376. – ДНУЗТ, Дніпропетровськ. – 2007. – 59 с.
80. Zynovchenko, A. Impedances of contact lines and propagation of current harmonics/ Zynovchenko Andriy, Xie Jian, Jank Steffen, Klier Franz. – Elek. Bahnen, № 5. – 2006.
81. Косарев, А. Б. Основы теории электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения переменного тока / А. Б. Косарев. – М.: Интекст, 2004. – 272 с.
82. Щуров, А. И. Метод прямого синтеза электрических цепей по их обменным характеристикам / А. И. Щуров, А. В. Фролов, А. Б. Косарев. – Вестник ВНИИЖТ. – 1995. – № 2. – С. 26-28.
83. Коробков, Г. В. Влияние компенсирующих устройств на режимы тяговых сетей переменного тока : автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.22.07 / Г. В. Коробков; Омский гос. ун-т путей сообщ. – Омск. – 2004. – 21 с.
84. Кулинич, Ю. М. Адаптивная система автоматического управления гибридного компенсатора реактивной мощности электровоза с плавным регулированием напряжения / Ю. М. Кулинич. – Хабаровск. – 2001. – 131 с.

85. Siczenko W. G. Badanie liczników różnych typów pod nieźrównoważonym obciążeniu / W. G. Siczenko, O. P. Koszmak // Infrastruktura transportu. – 2013. – № 1. – Р. 46-48.

86. ГОСТ 30207-94 Статистические счетчики Ватт-часов активной энергии переменного тока (классы точности 1 и 2). – М.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1996. – 54 с.

87. Гуртовцев, А. Электронные счетчики. Доверять или проверять? / А. Гуртовцев, В. Бордаев, В. Чижонок // Электронный журнал «Новости Электротехники». – 2005. – № 1(31), 2(32).

88. Тубинис, В. В. Европа принимает общие технические требования к приборам учета топливных энергетических ресурсов / В. В. Тубинис, О. В. Балашов // Электро. Электротехника. Электроэнергетика. Электротехническая промышленность. – 2005. – № 1. – С. 47-51.

89. ДСТУ 2708:2006. Повірка засобів вимірювальної техніки. Організація та порядок проведення.

90. ГОСТ 8.401-80. Государственная система обеспечения единства измерений. Классы точности средств измерений. Общие требования. – Взамен ГОСТ 13600-68; Введ. 01.07.81.

91. Босий, Д. О. Особливості роботи електронних лічильників у несинусоїдних режимах тягових підстанцій електричного транспорту / Д. О. Босий // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. – №9 (115). – С.29-37.

92. Босий, Д. О. Облік електроенергії сучасними електронними лічильниками в умовах гармонійних спотворень / Д. О. Босий, О. М. Синьогіна // Електрифікація транспорту. – 2014. – № 7. – С. 98-106.

93. Жежеленко, И. В. Расчет параметров фильтрокомпенсирующих устройств при наличии высших гармоник в системах электроснабжения / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко // Изв. вузов СССР. Энергетика. – 1985. – № 12. – С. 38–41.

94. Денисюк, С. П. Анализ и оптимизация энергетических характеристик систем с преобразователями электрической энергии / С. П. Денисюк // Техническая электродинамика. Тематический выпуск. Системы электропитания электротехнических установок и комплексов. – Киев. – 1999. – С. 129–134.

95. Влияние дуговых электропечей на системы электроснабжения / Ю. Л. Рыжнев и др. – М.: Энергия, 1975.

96. Жежеленко, И. В. Реактивная мощность в задачах электроэнергетики / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко // Электричество. – 1987. – № 2. – С. 7–12.

97. Саенко, Ю. Л. Реактивная мощность в системах электроснабжения с нелинейными нагрузками. Zeszyty Naukowe Politechniki Slaskiej. Elektryka, z.123, Gliwice, 1991.

98. Саенко, Ю. Л. К вопросу о компенсации реактивной мощности в сетях с нелинейными нагрузками / Ю. Л. Саенко, // Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2002. – № 4. – С. 11–25.

99. Бурков, А. Т. Электронная техника и преобразователи / А. Т. Бурков – М.: Транспорт, 2001. – 464с.

100. Двадцатичетырехпульсовый выпрямительный агрегат для тяговых подстанций постоянного тока / Б. С. Барковский, Г. С. Магай, М. Г. Шалимов, Л. С. Панфиль // Разработка и исследование автоматизированных средств контроля и управления для предприятий железнодорожного транспорта: Межвуз. темат. сб. тр./ Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. Омск. – 1990. –С. 37–42.

101. Бадер, М. П. Повышение энергетической эффективности выпрямительных агрегатов тяговых подстанций / М. П. Бадер, Ю. М. Иньков // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2007. – №6. – С. 18 – 21.

102. Волков, А. Г. Высоковольтные выпрямители для систем электроснабжения железных дорог / А. Г. Волков, Г. С. Зиновьев, А. П. Косарев // Техническая электродинамика. Силовая электроника и энергоэффективность. – 2010. –С.262–264.

103. Хворост, М. В. Підвищення ефективності дванадцятипульсових випрямлячів тягових перетворювальних агрегатів метрополітенів з поздовжньою високовольтною лінією живлення постійного струму / М. В. Хворост // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2004. – № 3. –С.50–54.

104. Жемеров, Г. Г. Новый класс преобразователей переменного напряжения в постоянное, электромагнитносовместимых с питающей сетью / Г. Г. Жемеров, Е. И. Сокол, Д. С. Крылов // Технічна електродинаміка. Тем.вип. Силова електроніка та енергоефективність. – 2001. – Част.1. – С.3–8.

105. Гончаров, Ю. П. Перетворювач з вольтододатком на повністю керованих напівпровідникових приладах для тягових підстанцій постійного струму / Ю. П. Гончаров, Н. В. Панасенко, В. В. Божко // Електротехніка і енергетика. – 2007. – № 2. – С. 23–34.

106. Статичні перетворювачі тягового рухомого складу / Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко, О. І. Семененко, М. В. Хворост. – Харків, НТУ“ХП”, 2007. – 192 с.

107. Звіт з виконання науково-дослідної роботи за договором №8/08-ЦТех-0259/08-ЦЮ від 16.04.08 р. Розроблення технічної документації на дослідний зразок дванадцятипульсового перетворювального агрегату з реверсним вольтододатком і безконтактним захистом від короткого замикання для тягових підстанцій постійного струму. № д.р. 0110U003713, 2010.

108. Сиченко, В. Г. До питання розробки активного фільтра тягової підстанції постійного струму / В. Г. Сиченко, В. А. Зубенко, М. П. Бадьор // Залізничний транспорт України. – 2006. – № 5. – С. 39 – 41.

109. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання / І. В. Жежеленко, А. К. Шидловський, Г. Г. Півняк, Ю. Л. Саенко. – Д., нац. гірн. ун-т, 2009. – 319с.

110. Rashid, M.H. Powerelectronics handbook. – SanDiego, Academicpress, 2001. – 892с.

111. Gyugyi L., Strycula E. C. Active AC power filters. – IEEE/IAS, Annu. Meet., 1976, Conf. Rec. – pp. 529 – 535.
112. Stacey E. J., Strycula E. C. Hybrid power filters. – IEEE/IAS, Annu. Meet., 1977. – pp. 1133 – 1140.
113. Агунов, А. В. Энергетические процессы в электрических цепях с несинусоидальными режимами и их эффективность. СПб / А. В. Агунов. – 2004. – 124 с.
114. Borchard L. O., Beukes H. J. Enslin J. H. Development of regenerative 3kV DC traction substation with active power filter capability // Computers in Railways VII, WIT Press – 2000. – pp. 567 – 575
115. Сыченко, В. Г. Силовой активный фильтр для тяговой подстанции постоянного тока / В. Г. Сыченко, В. А. Зубенко // 7-й Международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. Материалы симпозиума. Санкт-Петербург. – 2007. – С. 66-69.
116. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника / У. Титце, К. Шенк, – М.: Мир., 1982. – 512 с.
117. Ограничение спектра периодических сигналов обратных связей в силовых активных фильтрах для систем электроснабжения контактных сетей / Ю. П. Гончаров, Н. В. Панасенко, В. Г. Сыченко и др. // Гірничя електромеханіка та автоматика. Науково-технічний збірник НГУ.– 2010. - Вип. 84 – С. 28-38
118. Божко, В. В. Стабілізуючі перетворювальні агрегати вольтододакового типу підвищеної ефективності для тягового електропостачання постійного струму електрифікованих залізниць: автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук / В. В. Божко. – Х.: Харківська філія Державного НДЦ залізничного транспорту України, 2011. – 22 с.
119. Марквардт, Г. Г. Алгоритм регулирования напряжения на тяговых подстанциях / Г. Г. Марквардт, А. В. Клевцов // Сб. научн. тр./ ВЗИИТ. – 1986. – Вып. 132: Железнодорожный транспорт – пути развития и совершенствования его работы. - с. 91 - 96 : ил.
120. Розенфельд, В. Е. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.
121. Александровский, Н. М. Адаптивные системы управления сложными технологическими процессами / Н. М. Александровский, С. В. Егоров, Р. Е. Кузин. – М.: Энергия, 1973. – 272 с.
122. Борзенко, И. М. Адаптация, прогнозирование и выбор решений в алгоритмах управления технологическими процессами / И. М. Борзенко. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 144 с.
123. Тимофеев, Д. В. Режимы в электрических системах с тяговыми нагрузками / Д. В. Тимофеев. – М.: Энергия, 1972. – 272 с.
124. Аоки, М. Оптимизация стохастических систем / М. Аоки. – М.: Наука, 1971. – 424 с.

125. Аржанников, Б. А. Возможности системы электроснабжения постоянного тока для пропуска скоростных пассажирских и грузовых поездов повышенного веса / Режим доступа: <http://www.eav.ru/publlp.php?publid=2009-10a21>.

126. Аржанников, Б. А. Автоматическое регулирование напряжения в системе электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ / Б. А. Аржанников, Л. А. Фролов. – Екатеринбург, 2009. - 48 с.

127. Повышение эффективности функционирования тягового электроснабжения при применении возобновляемых источников электрической энергии / Ю. П. Гончаров, В. Г. Сыченко, Д. А. Босый, М. С. Пастушенко, Е. Н. Косарев // Problemy Kolejnictwa, czasopismo naukowe Instytut Kolejnictwa, Zeszyt nr 162, 2014. – с. 65–82

128. Система распределенного питания с промежуточным звеном повышенной частоты для электрифицированных железных дорог / Ю. П. Гончаров, Н. В. Панасенко, В. Г. Сыченко и др. // Вісник Дніпропетровського національного технічного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна. – 2011. – Вип. 38 – С. 45–52.

129. Сыченко, В. Г. Усовершенствование методологии расчета распределенной системы тягового электроснабжения с усиливающими пунктами / В. Г. Сыченко, Д. А. Босый, Е. Н. Косарев // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2014. – т. 2, № 9. – С. 8-18.

130. Пат. 95871 Україна, МПК G01R 19/257, H04W 4/20. Пристрій вимірювання напруги в мережі постійного струму з бездротовою передачею даних / Д. О. Босий; заявник та власник патенту Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. ак. В.Лазаряна. – № U201408019; заявл. 16.07.14; опубл. 12.01.15, Бюл. № 1. – 3 с.

131. Бородулин, Б. М. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог / Б. М. Бородулин, Л. А. Герман, Г. А. Николаев. – М.: Транспорт, 1983. – 183 с.

132. Василянский, А. М. Совершенствование системы тягового электроснабжения железных дорог, электрифицированных на переменном токе 27,5 кВ, 50 Гц / А. М. Василянский, Р. Р. Мамошин, Г. Б. Якимов – Железные дороги мира, № 8. – 2002. – С. 17–21.

133. А. с. 2258994 RU, МКИ H02J3/00, 3/04. Система распределенного электроснабжения переменного тока железной дороги с трёхфазными симметрирующими трансформаторами и однофазными трансформаторами/ Р. Р. Мамошин (RU), А. М. Василянский. – № 2258994/C2; Заявл. 20.12.2001; Опубл. 20.08.2005, Бюл. №23, 5 с.

134. Бородулин, Б. М. Симметрирование токов и напряжений на действующих тяговых подстанциях переменного тока / Б. М. Бородулин. – Вестник ВНИИЖТ. – 2003. – № 2. – С. 14–17.

135. Сероносков, В. В. Симметрирующая агрегация компенсирующих устройств и трехфазно-двухфазных преобразователей тяговых подстанций :

автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / В. В. Сероносков; Петерб. гос. ун-т путей сообщ. – СПб., 2007. – 17 с.

136. Шалимов, М. Г. Современное состояние и пути совершенствования систем электроснабжения электрических железных дорог / М.Г. Шалимов, Г.П. Маслов, Г.С. Магай, Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2002. – 49 с.

137. А. с. № 1188021 (СССР) Устройство для снижения индуктивного влияния электротяговых сетей / Б. Н. Тихменев, И. В. Павлов, Б. В. Шевцов. Опубликовано в Б. И. 1985. № 40.

138. Ермоленко, А. В. Утилизация энергии высших гармоник в системе тягового электроснабжения / А. В. Ермоленко, Д. В. Ермоленко, И. В. Павлов, Б. В. Шевцов. – Вестник ВНИИЖТ. – 1993. – № 8. – С. 28–31.

139. Ефимов, А. В. Схема автоматического регулирования параметров установки поперечной компенсации / А. В.Ефимов. – Труды МИИТа.– 1970. – Вып. 340. – С. 40–44.

140. Мамошин, Р. Р. Исследование возможности оптимизации качества энергии на шинах тяговых подстанций переменного тока с помощью однофазных регулируемых батарей / Р. Р. Мамошин. – Труды МИИТа. – Вып. 340. – С. 66–79. – 1970. –

141. Senini, S. A hybrid active/passive power conditioner for utility power applications / Senini S., Wolfs P. A. IEEEA, Vol. 13, No. 5, 2002.

142. Akagi, H. New trends in active filters for power conditioning. IEEE Transactions on industry applications / Akagi H., Vol. 32, No. 6, Nov/Dec 1996.

143. Bhattacharya, S. Hybrid solutions for improving passive filter performance in high power applications / Bhattacharya S., Cheng P., Divan M. D. IEEE Transactions on industry applications, Vol. 33, No. 3. – 1997.

144. Sutherland, P. E. System impacts evaluation of a single-phase traction load on a 115 kV transmission system / Sutherland P. E., Waclawiak M., McGranaghan M.F. – IEEE Transactions on power delivery, Vol. 21, No. 2. – 2006.

145. Battistelli, L. Two-phase controlled compensator for alternating-current quality improvement of electrified railway systems / L.Battistelli, D.Lauria, D.Proto. – IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 153, No. 2.

146. Li, X. Research on Balance Compensation of Statcom / Li Xiaqing, Zuo Li. – Second IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. – 2007.

147. Cheng-Ping, H. Loading Characteristics Analysis of Specially Connected Transformers Using Various Power Factor Definitions / Cheng-Ping Huang, Chi-Jui Wu and oth. – IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 3. – 2006.

148. Wang, G. A hybrid Active Compensation Method for Current Balance Based on Y/D-11 connection traction transformer / Wang Guo, Ren Enen, Tian Mingxing. – Workshop on Power Electronics and Intelligent Transportation System. – 2008.

149. Hongsheng, S. Rough Controlling TSC for Reactive Current Compensation in Traction Substations / Hongsheng Su, Qunzhan Li. – IEEE IPERC. – 2006.
150. Shaofeng, X. Influence on Harmonic Emission Limits of Coincidence Factor of Electrified Railway Load / Shaofeng Xie, Qunzhan Li and oth. – 35-th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. – 2004.
151. Куренный, Э. Г. Оценка несинусоидальности напряжения при анализе качества электроэнергии / Э. Г. Куренный, А. П. Лютый. – Электричество. – 2005. – № 8. – С. 2-9.
152. Куренный, Э. Г. Оценка несинусоидальности напряжения без разложения в ряд Фурье / Э. Г. Куренный, А. Д. Коломытцев. – Донецк, 1986. – Деп. в УкрНИИНТИ 15.01.87, № 187-Ук87.
153. Кондратьев, Ю. В. Совершенствование условий согласования систем внешнего и тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока: автореф. дис. канд.тех.наук: 05.22.07 / Ю. В. Кондратьев; Омский гос. ун-т путей сообщ. – Омск, 2006. – 20 с.
154. Машкин, А. Г. Проблемы качества и учета электроэнергии на границах системы тягового электроснабжения / А. Г. Машкин, В. А. Машкин. – Промышленная энергетика. – 2007. – № 11. – С. 29-31.
155. Сербиненко, Д. В. Качество электрической энергии и степень взаимного влияния тяговых подстанций железных дорог постоянного тока и системы внешнего электроснабжения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Д. В. Сербиненко; Моск. инст. инж. ж.-д. трансп. – М., 2006. – 18 с.
156. Герман, Л. А. Продольная емкостная компенсация в системе тягового электроснабжения переменного тока / Л. А. Герман. – Железные дороги мира. – 2007. – № 11. – С. 53–58.
157. Кириенко, В. П. Улучшение качества электроэнергии с помощью трансформаторно-тиристорного модуля с микропроцессорной системой управления при резкопеременном характере энергопотребления в цеховой сети / В. П. Кириенко, А. Б. Лоскутов, С. А. Ваганов. – Промышленная энергетика. – 2007. – № 5. – С. 15–19.
158. Гамазин, С. И. Обеспечение надежности электроснабжения и качества электроэнергии / С. И. Гамазин, В. М. Пупин, Ю. В. Марков. – Промышленная энергетика. – 2006. – № 11. – С. 51–56.
159. Машкин, А. Г. Способ симметрирования нагрузки тяговых трансформаторов / А. Г. Машкин, В. И. Пантелеев. – Промышленная энергетика. – 2006. – № 3. – С. 30–32.
160. Zhuo, S. A Novel Active Power Quality Compensator Topology for Electrified Railways / Zhuo Sun, Xinjian Jiang, Dongqi Zhu, Guixin Zhang. – IEEE Transactions On Power Electronics, vol. 19, no. 4, July 2004.
161. Зайцев, Г. Ф. Теория автоматического управления и регулирования / Г. Ф. Зайцев. – К.: Выща шк., 1989. – 431 с.

162. Попович, М. Г. Теорія автоматичного керування / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. – К.: Либідь, 1977. – 544 с.

163. Купер, Дж. Вероятностные методы анализа сигналов и систем / Дж. Купер, К. Макгиллем. – М.: Мир, 1989. – 376 с.

164. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії. Затв.: Наказ Міністерства палива та енергетики України 17.01.2002 №19 / Мін-во палива та енергетики України. – К., 2002. – 12 с.

165. Пат. № 48536 Україна: МПК H02J 3/26. Спосіб зниження несиметрії напруги тягової підстанції змінного струму / В.Г.Сиченко, Д.О.Босий ; заявник та власник патенту Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. ак. В. Лазаряна. – № U200909253; заявл. 08.09.09; опубл. 25.03.10, Бюл. № 6. – 2 с.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	3
СПИСОК СКОРОЧЕНЬ.....	5
1. ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ ДО ПРОБЛЕМИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.	8
1.1. Вплив електроенергетичних процесів у системах тягового електропостачання на якість електричної енергії.	8
1.2. Загальна характеристика якості електроенергії.	21
1.3. Теоретичні аспекти та практична реалізація проведення експериментальних досліджень.	26
2. ПРОБЛЕМА ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.	32
2.1. Загальні положення.	32
2.2. Вплив відхилень напруги на роботу споживачів електроенергії.	41
2.3. Вплив несиметрії напруги на роботу електроприймачів.	43
2.4. Вплив коливань напруги на роботу електроприймачів.	44
2.5. Вплив несинусоїдальності на споживачів електроенергії.	46
2.6. Вплив провалів напруги на електроустаткування.	48
2.7. Збитки від низької якості електроенергії.	48
2.7.1. Втрати активної потужності в елементах систем електропостачання.	48
2.7.2. Термін служби ізоляції при зниженні якості електроенергії.	52
2.7.3. Показники надійності електроустаткування при зниженій якості електроенергії.	54
2.7.4. Економічний збиток при зниженій якості електроенергії.	56
3. НОРМАТИВНО-ПРАВОВЕ РЕГУЛЮВАННЯ В ОБЛАСТІ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.	62
3.1. Загальні положення.	62
3.2. Нормування якості електроенергії.	66
3.3. Правові питання проблеми якості електричної енергії.	77
4. ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У СИСТЕМІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.	81
4.1. Аналіз показників якості напруги в первинній мережі 110 кВ.	81
4.2. Якість напруги на приєднаннях 35 кВ.	87
4.3. Якість напруги на приєднаннях 10 кВ.	91
4.4. Якість напруги на шинах 3,3 кВ.	100
4.5. Дослідження змін напруги на електрорухомому складі.	105
4.6. Оцінка ефективності функціонування пасивних згладжуючих фільтрів тягових підстанцій постійного струму.	108
4.7. Оцінка взаємодії системи тягового електропостачання та зовнішнього електропостачання.	113
4.8. Показники якості електроживлення у тягових мережах постійного струму.	116
5. ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У СИСТЕМІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ ЗМІННОГО СТРУМУ.....	129

5.1. Специфіка роботи системи тягового електропостачання змінного струму ...	129
5.2. Методика постановки експериментальних досліджень та виконання вимірювань показників якості електричної енергії.....	131
5.3. Аналіз режимів роботи тягових підстанцій змінного струму.....	141
5.3.1. Режими напруги в первинній, районній та тяговій мережі.....	141
5.3.2. Статистичні характеристики струмів тягового навантаження	147
5.3.3. Баланси складових повної потужності.....	150
5.4. Аналіз несиметрії напруги, викликаной струмами тягових підстанцій	157
5.5. Характер навантаження електровозів змінного струму.....	161
6. ОБЛІК ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У НЕСИНУСОЇДНИХ РЕЖИМАХ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ	178
6.1. Особливості роботи системи обліку в системах електропостачання електрифікованих залізниць.....	179
6.2. Технічні аспекти застосування лічильників різних типів.....	180
6.3. Необхідні умови та режими випробувань приладів обліку	183
6.4. Результати вимірювання похибок лічильників для нелінійного навантаження.....	187
7. ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У ТЯГОВИХ МЕРЕЖАХ.	193
7.1. Узагальнені принципи підвищення якості електричної енергії.....	193
7.1.1. Регулювання напруги.	193
7.1.2. Зниження коливань напруги.	195
7.1.3. Зниження несинусоїдальності напруги.	198
7.1.4. Методи і засоби зниження несиметрії напруги.	203
7.1.5. Компенсація реактивної потужності в мережах з вищими гармоніками на основі поняття “Миттєва реактивна потужність”.....	205
7.1.6. Розрахунок параметрів фільтрокомпенсуючих пристроїв по умові мінімізації втрат.	218
7.2. Тягові мережі постійного струму.....	221
7.2.1. Електромагнітносумісні випрямлячі комбінованої ідеології.....	221
7.2.2. Методологія активної фільтрації у системі тягового електропостачання постійного струму.....	232
7.2.3. Регулювання напруги в тяговій мережі постійного струму.....	242
7.2.3.1. Алгоритми регулювання напруги.....	242
7.2.3.2. Удосконалення режиму напруги при впровадженні швидкісного руху – аналітичний огляд.	256
7.2.3.3. Система контролю напруги вздовж електрифікованої ділянки.....	267
7.3. Тягові мережі змінного струму.	272
7.3.1. Аналіз існуючих способів підвищення ефективності систем тягового електропостачання змінного струму.....	272
7.3.2. Моделювання пристроїв симетрування та компенсації реактивної потужності.	273

7.3.3. Розробка методики визначення струмів компенсації реактивної потужності.	279
7.3.4. Результати моделювання симетруючих та компенсуючих пристроїв.....	287
7.3.5. Критерії керування компенсацією реактивної потужності.....	292
7.3.6. Методика визначення струмів компенсуючих пристроїв.....	300
7.3.7. Зниження несиметрії напруги на тяговій підстанції.....	319
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.	325

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІКТОР ГРИГОРОВИЧ СИЧЕНКО

ЮРІЙ ЛЕОНІДОВИЧ САЄНКО

ДМИТРО ОЛЕКСІЙОВИЧ БОСИЙ

ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У ТЯГОВИХ МЕРЕЖАХ
ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ

Монографія

Редактор Гетьман Г.К.
Комп'ютерна верстка А.А. Заїченко
Дизайн обкладинки Косарев Є.М., Міронов Д.В.

Видавництво ПФ «Стандарт-Сервіс»
Свідоцтво ДК №3197 від 28.05.2008 р.
52005, Україна, Дніпропетровська обл., смт. Ювілейне,
вул. Совхозна, 68, кв. 65
тел. (056) 370-30-22

Надруковано
ПФ «Стандарт-Сервіс». Підписано до друку 05.05.2015р.
Формат 29,7x42 ¼. Різографічна печать. Ум. друк. арк. 19,64.
Папір офсетний. Тираж 300 прим. Заказ № 15 від 11.05.2015р.

ISBN 978-966-97463-8-2