

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ В КЕРУВАННІ РЕЖИМАМИ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ

**Д. О. Босий**, докторант кафедри Електропостачання залізниць  
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка  
**В. Лазаряна**, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, 49010, Україна

*Представлено результати аналізу основних заходів удосконалення керування режимів роботи систем тягового електропостачання постійного та змінного струму. В якості методики виконання розрахунків використано просторово-часове уявлення основних електричних величин для систем електричної тяги. Для системи постійного струму запропоновано систему стабілізації напруги на струмоприймачах електровозів. В системі змінного струму розглядається заходи унеможливлення протікання вирівнювальних струмів, спричинених відхиленням параметрів режиму системи зовнішнього електропостачання.*

**Ключові слова:** система електропостачання, електрична тяга, постійний струм, змінний струм, режими роботи, напруга, якість електричної енергії, енергоефективність.

### Вступ

Початок XXI століття ознаменувався створенням нової енергетичної цивілізації, в основу якої покладено енергоефективність, інтелектуальні енергетичні системи, децентралізацію енергетики та застосування нових джерел генерації енергії. Переосмислюється концепція галузевої організації енергетики з переходом до системної за рахунок підвищення структурності, а саме заміни об'єднаної електроенергетичної системи інтелектуальною електроенергетикою на базі концепції Smart Grid [1-5].

Системою Smart Grid прийнято вважати повністю автоматизовану енергетичну систему, яка одночасно забезпечує двосторонні потоки електричної енергії та режимної інформації між генеруючими об'єктами та споживачами. За допомогою використання новітніх технологій Smart Grid системи доповнюють електроенергетичну системи «штучним розумом», що дозволяє різко підвищити її ефективність функціонування. За експертними оцінками застосування Smart Grid систем дозволяє також знизити споживання електричної енергії та підвищити надійність електропостачання.

Стратегія розвитку «інтелектуальних» мереж передбачає насамперед розробку стандартів для забезпечення сумісності інтелектуальних систем і пристроїв, що забезпечують керування режимами енергосистем, створення умов для обміну інформацією і забезпечення, при цьому, високого рівня надійності. Архітектура інтелектуальної електроенергетичної системи в загальному виді являє собою окрему структуру взаємодіючу між складовими її частинами зі складною топологією зв'язків.

З огляду на розгалуженість та протяжність систем тягового електропостачання електрифікованих залізниць, які представлені шістьма суб'єктами господарювання, що в свою чергу володіють інфраструктурою та розподілені за територіальним принципом, актуальним є впровадження інтелектуальних технологій до керування режимами їх роботи. Через те, що кінцевий споживач в системі тягового електропостачання постійно змінює свої параметри у часі та просторі та нерідко на межах залізниць виникають спірні питання, пов'язані з особливістю споживання електричної енергії електрорухомим складом, недосконалістю системи обліку електричної енергії та режимами напруги в системі електропостачання. Електричну енергію станом на 2015 рік всі залізниці України отримують з оптового ринку електроенергії, користуючись при її передачі до тягових підстанцій послугами транзиту акціонерних компаній, які розподілені територією країни за адміністративно-територіальним поділом, що додатково вносить складнощі при вирішенні спірних питань та пошуку причин їх виникнення.

### Режими перетворення електроенергії в системах електричної тяги

Під режимом роботи системи тягового електропостачання розуміється неперервний технологічний процес передачі, розподілу та споживання електроенергії, який характеризується величинами напруги, струмів, кутів зсуву фаз, коефіцієнтів потужності та втрат електроенергії на всьому шляху її передачі та перетворення. Будь-яке перетворення електричної енергії в системах тягового електропостачання зумовлене процесами випрямлення чи трансформації електроенергії на тягових підстанціях та безпосередньо на електрорухомому складі. Для більшості підстанцій системи постійного струму характерна двоступенева трансформація. Відомі також окремі випадки живлення

трифазних випрямлячів за принципом глухого вводу. Саме для системи постійного струму виконується більш ефективно перетворення електроенергії, ніж для системи змінного струму. Для порівняння в системі змінного струму коефіцієнт потужності однофазного випрямляча за даними експлуатації змінюється в межах  $\lambda = 0,8..0,7$  і навіть нижче, в системі постійного струму коефіцієнт потужності випрямлячів значно вище  $\lambda = 0,9..0,94$  [6]. На змінному струмі тягові підстанції виконують одинарну трансформацію отриманої з первинної мережі електроенергії, а подальше її перетворення до напруги, придатної для живлення електроприводу виконується з енергії однофазного змінного струму перетворювачами електрорухомого складу.

Крім того, на електрифікованих залізницях однофазного змінного струму унаслідок більш низького коефіцієнту потужності електрорухомого складу та активно-індуктивного характеру опору тягової мережі мають місце більші втрати напруги та електроенергії ніж в системі постійного струму. Так, проектоване відхилення напруги на струмоприймачеві електрорухомого складу від шин тягової підстанції за відносними значеннями для змінного струму складає  $\delta U_{\sim} = 27,5 - 25 = 2,5$  кВ, а для постійного  $\delta U_{=} = 3,3 - 3,0 = 0,3$  кВ. В абсолютних значеннях у відношенні до номінальної напруги на шинах підстанції відхилення напруги для обох систем становить 9,1 %

#### **Методика розрахунків систем тягового електропостачання**

Нестационарний характер електричних навантажень, який створюється електрорухомим складом в системі тягового електропостачання, та їх здатність переміщуватись у просторі відносно тягових підстанцій призводять до залежності напруги і споживання струму від характеру руху поїздів та особливостей електрифікованої ділянки. Напруга безпосередньо на струмоприймачах електровозів коливається в досить широких межах, що примушує враховувати зміни режиму напруги через те, що швидкість електровозів з тяговими двигунами послідовного збудження змінюється практично пропорційно їй та методика розрахунку системи тягового електропостачання не дозволяє врахувати процес споживання тяговим навантаженням постійної потужності. У розвиток цієї проблеми розроблена методика розрахунку миттєвих схем з використанням аналітичних функцій опору, що дозволяє виконати електричні розрахунки системи тягового електропостачання при споживанні електрорухомим складом заданої потужності при фактичному значенні напруги на струмоприймачеві [7]. Можливість застосування прямого розрахунку електричних величин за допомогою наведеної методики та аналітичні вирази отриманих для різних схем живлення контактної мережі функцій опору дозволяють значно спростити подальші оптимізаційні розрахунки режимів роботи систем тягового електропостачання.

Можливість виконання оптимізаційних розрахунків системи тягового електропостачання неможливе без складання моделі системи в просторово-часових координатах. Саме просторово-часове уявлення всіх електричних величин, які необхідні для розрахунків систем тягового електропостачання, дозволяє побудувати інтелектуальні системи керування режимами систем тягового електропостачання.

Просторово-часова модель системи тягового електропостачання ґрунтується на аналітичному описі основних електричних процесів функціями двох змінних, взаємозв'язок між якими визначається графіком руху поїздів (рис. 1), що визначає графік руху кожного окремого поїзду з номер  $n$  у будь-який момент часу  $t$ . Використовуючи інші вихідні у вигляді профілю потужності електровозу, параметрів системи зовнішнього та тягового електропостачання визначаються кусочно-задані функції двох змінних, які являють собою залежності розподілу струмів та втрат напруги в контактній мережі у часі та просторі. Добуток просторово-часових функцій розподілу втрат напруги та струмів в контактній мережі визначає розподіл втрат потужності. Інтегрування функції розподілу втрат потужності за координатою простору визначає миттєве значення втрат потужностей в системі електропостачання, а за координатою часу – розподіл втрат електроенергії уздовж розрахункової ділянки. Подвійне інтегрування функції розподілу втрат потужності визначає втрати електроенергії на розрахунковий ділянці за період розрахунку.

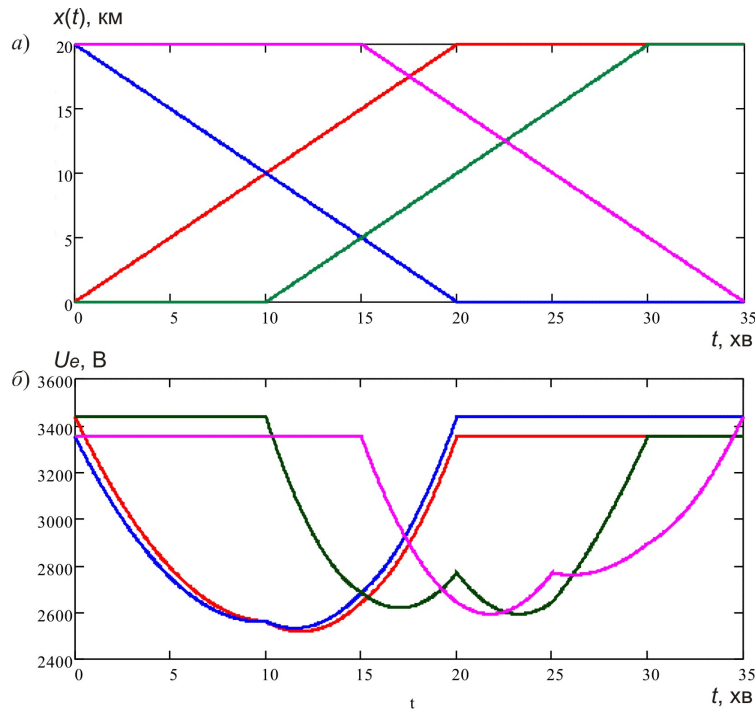


Рис. 1. Графік руху поїздів та результат розрахунку напруги на струмоприймачах електровозів

### Керування режимами в системах постійного струму

Система електропостачання тяги постійного струму представляє собою розподілену у просторі сукупність електротехнічних пристроїв для живлення електрорухомого складу. Напруга в контактній мережі залежить від великої кількості взаємопов'язаних і взаємовпливаючих факторів – організації руху поїздів, режиму ведення кожного поїзду та режиму роботи пристроїв електропостачання. Значення швидкості руху поїзду в значній мірі залежить від напруги на струмоприймачеві електровозу, яка визначається параметрами системи електропостачання та поїзною ситуацією. Збільшення об'єму перевезень та організація руху швидкісних та високошвидкісних поїздів призводить до того, що пристрої тягового електропостачання обмежують пропускну спроможність ділянки електрифікованої залізниці внаслідок зниження напруги на струмоприймачі електрорухомого складу нижче нормованих значень. Регулювання напруги на шинах тягових підстанцій не вирішує існуючу проблему повною мірою, через збільшення втрат потужності на міжпідстанційній зоні та відповідних експлуатаційних витрат.

Таким чином, виникає необхідність у контролі рівнів напруги у заданому діапазоні на струмоприймачах електрорухомого складу при русі міжпідстанційною зоною за будь-якої кількості поїздів. Для вирішення цього завдання вченими було запропоновано спосіб, який полягає у вимірюванні рівня напруги на шинах 3,3 кВ двох суміжних тягових підстанцій та подальшого обчислення середньої втрати напруги до струмоприймача електрорухомого складу. Отримане, таким чином, середнє значення напруги на струмоприймачеві подається на командний пристрій регулювання напруги в системі СТАРНК, який передається блокам регулювання випрямних агрегатів суміжних тягових підстанцій для підвищення напруги безпосередньо на шинах тягових підстанцій.

Для усунення недоліків з використанням сучасної вимірювальної техніки пропонується стабілізувати напругу в контактній мережі електрифікованої залізниці постійного струму безпосередньо на струмоприймачі кожного електрорухомого складу. Суть полягає в тому, що необхідно окрім напруги на шинах суміжних тягових підстанцій додатково виміряти розподіл напруги уздовж міжпідстанційної зони. Це є можливим за допомогою розроблених пристроїв вимірювання напруги з бездротовою передачею даних, дані з яких визначатимуть необхідну потужність генерації підсилюючих пунктів, які будуть розташовані уздовж електрифікованої ділянки [8].

На рис. 2 зображено схему електропостачання ділянки електрифікованої залізниці із використанням запропонованої системи з відповідними графіками напруги при її стабілізації.

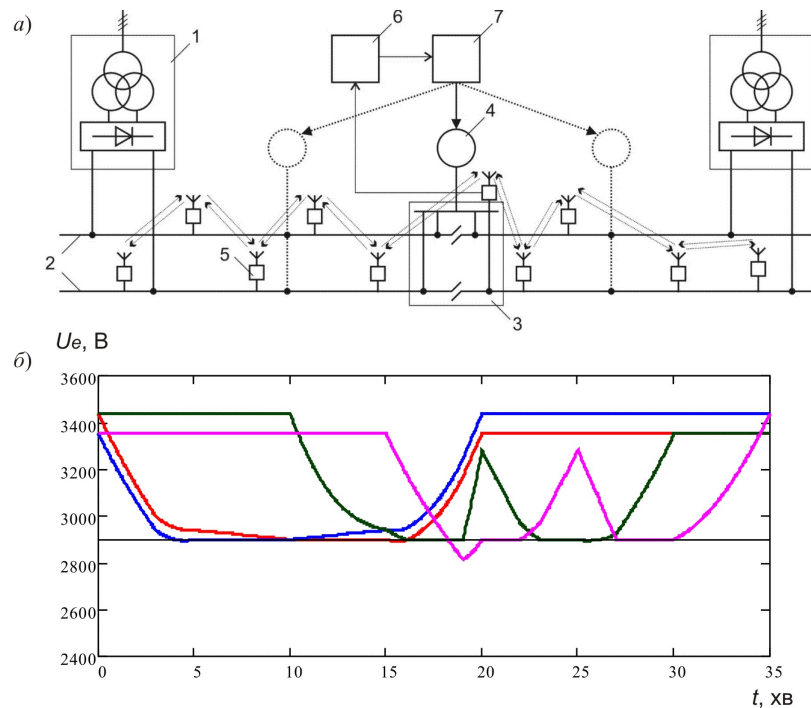


Рис. 2. Схема електропостачання ділянки електрифікованої залізниці з результатом розрахунку

На рис. 2 використано позначення: 1 – тягова підстанція; 2 – контактна мережа; 3 – пост секціонування; 4 – підсилюючий пункт тягової мережі; 5 – пристрій вимірювання напруги з бездротовою передачею даних; 6 – блок декодування даних; 7 – система управління.

Регулювання таким чином потужності генерації підсилюючого пункту тягової мережі забезпечує номінальний рівень напруги кожному електрорухомому складу на міжпідстанційній зоні та, в залежності від поїзної ситуації, зменшує втрати електроенергії в контактній мережі на 20-30 %.

Обробка інформації від розробленої системи традиційними способами з використанням аналітичних методів навіть для сучасної обчислювальної техніки займатиме багато часо-машинних ресурсів. Тому є доцільним застосування апарату нейронних мереж до розрахунку керуючого впливу джерелами розосередженої генерації. А безпосереднє навчання нейронної мережі доцільно виконувати на залежностях, отриманих в результаті використання просторово-часової моделі системи тягового електропостачання.

### Керування режимами в системах змінного струму

Для системи електричної тяги змінного струму для нормального режиму роботи не характерні проблеми з рівнем напруги в контактній мережі. Цьому сприяє майже на порядок вищий рівень напруги та значний резерв потужності на тягових підстанціях. Попри це, система змінного струму характеризується значними перетіканнями реактивної потужності, значним рівнем струмів зворотної послідовності та електромагнітним впливом на оточуюче середовище. Для забезпечення безперервності технологічного процесу перевезень для більшості ділянок встановлені нормальні схеми паралельної роботи тягових підстанцій. У випадках порушення нормальної схеми живлення в системі зовнішнього електропостачання між векторами однойменних первинних напруг виникає кут зсуву фаз, який викликає відповідну векторну різницю напруг на шинах тягової навантаження підстанцій. Під дією різниці напруг, зумовленою саме кутом зсуву фаз тяговою мережею, яка має активно-індуктивний характер, протікає майже активний вирівнювальний струм.

Керування режимом роботи системи змінного струму повинне керуватись кутом зсуву фаз векторів напруги суміжних тягових підстанцій. Вимірювання цього параметру режиму в умовах експлуатації дещо ускладнюється, оскільки необхідно мати джерело опорної напруги або вимушено застосовувати ненормальні схеми живлення. Так, для отримання приведеної на рис. 3 реєстрограми застосовувалось консольне живлення ділянки між суміжними підстанціями та розділення секцій шин 27,5 кВ з підключенням до трансформаторів напруги кожної секції вимірювальної апаратури.

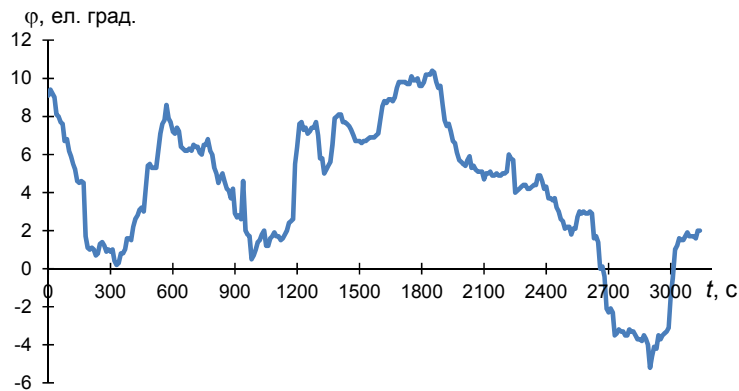


Рис. 3. Зміна кута зсуву фаз між однойменними фазами у часі

Сучасний рівень розвитку вимірювальної техніки дозволяє отримати кути зсуву фаз шляхом застосування пристроїв WAMS PMU, які в своїй роботі керуються прецензійною синхронізацією в часі супутниковими каналами зв'язку систем глобального позиціонування.

Активний характер вирівнювальних струмів в такому випадку ускладнює технічну реалізацію заходів протидії транзитним перетіканням. Тому застосування компенсації реактивної потужності впливатиме лише на реактивну складову вирівнювального струму. Перемикання положень анцапф трансформатора внесе певні корективи (рис. 4) але без остаточного їх уникнення. Вирішення можливе застосуванням фазозсуваючих силових трансформаторів з інтелектуальною системою управління. Вимірювальними органами системи повинні бути пристрої комплексних вимірювань електричних параметрів мережі, а виконавчими – пристрої перемикання обмоток трансформаторів, які зібрані за схемою зигзагу.

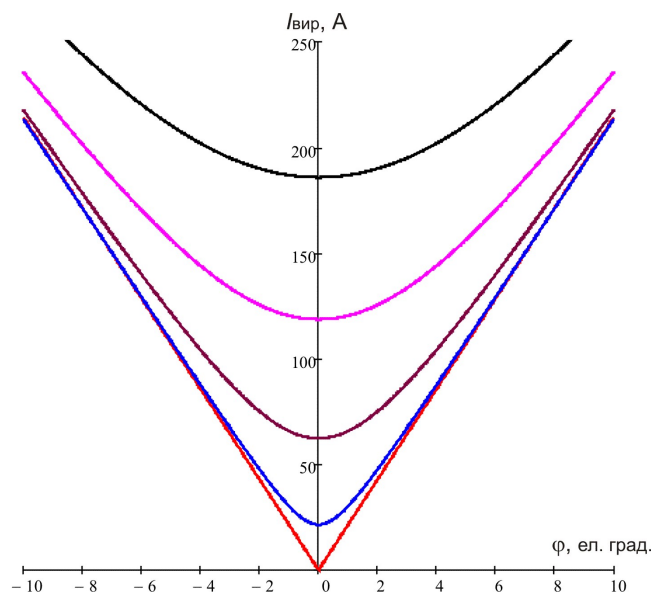


Рис. 4. Залежності вирівнювальних струмів в тяговій мережі на фазовій площині

### Висновки

1. Розрахунок режимів роботи системи тягового електропостачання з метою виконання оптимізаційних розрахунків чи розробки інтелектуальних систем управління доцільно виконувати в просторово-часових координатах за допомогою опису основних електричних величин кусочно-заданими функціями.

2. Система електричної тяги постійного струму підлягає удосконаленню в частині управління режимом напруги безпосередньо на струмоприймачах електровозів, що дозволяє забезпечити

нормований рівень при провадженні швидкісного та важковагового руху і значно знизити втрати потужності в тяговій мережі.

3. Ділянки, електрифіковані системою змінного струму доцільно удосконалювати в частині зниження режимних перетікань транзитної потужності при відхиленнях кута зсуву фаз між однойменними фазами.

### Література

1. *Стогній Б. С.* Аналіз світового досвіду та перспектив побудови інтелектуальних енергетичних систем в Україні / *Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, С. П. Денисюк* // Енергетика та Електрифікація. – 2013. – № 12. – С. 47–50.
2. *Стогній Б. С.* Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні / *Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, А. В. Праховник, С. П. Денисюк* // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 5. – С. 52–67.
3. *Стогній Б. С.* Інтелектуальні електричні мережі: світовий досвід і перспективи України / *Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, А. В. Праховник, С. П. Денисюк* // Праці Інституту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. Спец. випуск. Ч. 1. – К.: ІЕД НАНУ, 2011. – С. 5–20.
4. European Technology Platform – Smartgrids, April 2010: Strategic Deployment document for Europe’s Electricity Networks of the Future.
5. Grid 2030: A National Version for Electricity’s Second 100 Years // Office of Electric Transmission and Distribution United State Department of Energy, July 2003.
6. *Засорин С. Н.* Электронная и ионная техника / *С. Н. Засорин, Н. А. Карш, К. Г. Кучма, Р.И. Мирошниченко*; под. ред. *С. Н. Засорина*. – 2-е изд. – М.: Транспорт, 1973. – 440 с.
7. *Босий Д. О.* Методика розрахунку миттєвих схем системи тягового електропостачання для споживання постійної потужності / *Д. О. Босий* // Електрифікація транспорту. – 2014. – № 8. – С. 15-25.
8. *Сыченко В. Г.* Усовершенствование методологии расчета распределенной системы тягового электроснабжения с усиливающим пунктом / *В. Г. Сыченко, Д. А. Босый, Е. Н. Косарев* // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2014. – Сп. вип. – Т. 2. – С. 8-18.

УДК 621.331

### **Интеллектуальные системы в управлении режимами систем тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог**

**Д. А. Босый**, докторант кафедры Электроснабжение железных дорог

**Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, г. Днепропетровск, 49010, Украина**

*Представлены результаты анализа основных способов усовершенствования управления режимами работы систем тягового электроснабжения постоянного и переменного тока. В качестве методики выполнения расчетов использовано пространственно-временное представление основных электрических величин для систем электрической тяги. Для системы постоянного тока предложено систему стабилизации напряжения на токоприемниках электровазозов. В системе переменного тока рассматриваются способы предотвращения протекания уравнительных токов, вызванных отклонениями параметров режима системы внешнего электроснабжения.*

**Ключевые слова:** система электроснабжения, электрическая тяга, постоянный ток, переменный ток, режимы работы, напряжение, качество электрической энергии, энергоэффективность.

### **Intelligent systems in the management of modes in the traction power supply systems of the electrified railways**

**D. O. Bosiy**, postdoctoral student of the Power Supply of Railways Department

**Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryan Street, Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine**

*The analysis of the main ways to improve the operation control systems of DC and AC traction power supply are shown. As a method of performing calculations used space-time representation of basic electrical values for electric traction systems. For the DC system the voltage stabilization system at the electric current collectors proposed. For the AC system the ways of preventing the flow circulating currents caused by abnormalities mode parameters of the external power supply are discussed.*

**Keywords:** power supply system, electric traction, direct current, alternating current, modes of working, voltage, power quality, power effectiveness.