

**На Всеукраїнський конкурс
студентських наукових робіт з галузі
«ЕНЕРГЕТИКА»**

девіз «Парадигма»

**НЕСИМЕТРИЧНА СХЕМА ПІДСИЛЕННЯ
СИСТЕМИ ТЯГОВОГО
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО
СТРУМУ**

2018

АНОТАЦІЯ

наукової роботи під шифром «Парадигма»

Актуальність роботи. Впровадження швидкісного руху на діючих ділянках електрифікованих залізниць призведе до ускладнення умов експлуатації пристроїв електропостачання, оскільки при цьому не допускається зниження напруги на струмоприймачах електрорухомого складу нижче рівня 2900 В. Вирішення цих задач неможливе без пошуку нових структурних та схемних рішень як для системи тягового електропостачання в цілому, так і для окремих її ланок, а також без аналізу на стадії розробки системи процесів перетворення електроенергії, яка витрачається на процес перевезення.

В умовах збереження рівня напруги 3,0 кВ значно підвищити якість електропостачання можна шляхом заміни системи централізованого живлення на розподілену. В цьому випадку для живлення контактної мережі використовуються перетворювальні (підсилюючі) пункти, які підключаються до поздовжньої лінії електропередачі підвищеної напруги змінного чи постійного струму. Цей спосіб удосконалення тягової мережі є простим, дозволяє зменшити переріз проводів контактної мережі та втрати енергії, стає можливою підтримка необхідного рівня напруги в контактній мережі.

Тому дослідження, направлене на розробку нової схемотехніки тягової мережі є актуальним.

Мета – розробити новий підхід підсилення тягової мережі для підвищення ефективності існуючої системи тягового електропостачання для забезпечення необхідного рівня напруги на струмоприймачах електрорухомого складу при впровадженні швидкісного руху.

Завдання – розробка несиметричної схеми підсилення системи тягового електропостачання постійного струму для забезпечення стійкості по напрузі.

Використана методика дослідження. Використані методи імітаційного моделювання систем тягового електропостачання, статистичного аналізу та методика виявлення критичних місць по напрузі. Обробка результатів експериментальних досліджень виконана на ЕОМ з використанням програмних засобів Excel, MathCAD. Розрахунки варіантів підсилення системи тягового електропостачання виконані в середовищі iSet.

Загальна характеристика роботи

Робота складається з 26 сторінок, 12 рисунків, 12 використаних джерел.

СИСТЕМА ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, РЕЖИМ НАПРУГИ, ШВИДКІСНИЙ РУХ, СТІЙКІСТЬ ПО НАПРУЗІ, ПІДСИЛЕННЯ ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1. НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЕННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	7
2. РЕЖИМИ НАПРУГИ В СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	9
3. КІЛЬКІСНА ОЦІНКА СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПО НАПРУЗІ.....	13
4. НЕСИМЕТРИЧНА СИСТЕМА ПІДСИЛЕННЯ ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ.....	22
ВИСНОВКИ.....	24
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	25

ВСТУП

Актуальність роботи. Впровадження швидкісного руху на діючих ділянках електрифікованих залізниць призведе до ускладнення умов експлуатації пристроїв електропостачання, оскільки при цьому не допускається зниження напруги на струмоприймачах електрорухомого складу нижче рівня 2900 В. Вирішення цих задач неможливе без пошуку нових структурних та схемних рішень як для системи тягового електропостачання в цілому, так і для окремих її ланок, а також без аналізу на стадії розробки системи процесів перетворення електроенергії, яка витрачається на процес перевезення.

В умовах збереження рівня напруги 3,0 кВ значно підвищити якість електропостачання можна шляхом заміни системи централізованого живлення на розподілену. В цьому випадку для живлення контактної мережі використовуються перетворювальні (підсилюючі) пункти, які підключаються до поздовжньої лінії електропередачі підвищеної напруги змінного чи постійного струму. Цей спосіб удосконалення тягової мережі є простим, дозволяє зменшити переріз проводів контактної мережі та втрати енергії, стає можливою підтримка необхідного рівня напруги в контактній мережі.

Тому дослідження, направлене на розробку нової схемотехніки тягової мережі є актуальним.

Зв'язок роботи з науковими напрямками діяльності кафедри.

Обране дослідження безпосередньо пов'язане з виконанням науково-дослідних робіт у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, зокрема за наступними темами: «Розробка енергоефективної технології сумісної роботи системи централізованого тягового електропостачання та системи розподілених альтернативних джерел електроенергії», № держреєстрації 0117U004481.

Мета та задачі дослідження. Забезпечення стабільного рівня напруги у тяговій мережі при впровадженні швидкісного руху.

Об'єкт дослідження. Система тягового електропостачання постійного струму.

Предмет дослідження. Схема підсилення системи тягового електропостачання.

Методи дослідження. Методи статистичного аналізу, аналітичне дослідження режимів напруги. Обробка результатів експериментальних досліджень виконана на ЕОМ з використанням програмних засобів Excel, MathCAD. Експериментальні дослідження проводились на реальних перегонах.

Наукова новизна одержаних результатів.

Вперше запропоновано застосування несиметричної схеми підсилення тягової мережі, що дозволить підвищити ефективність функціонування та стійкість системи тягового електропостачання постійного струму для забезпечення необхідного рівня пропускної здатності при впровадженні швидкісного руху.

Практичне значення одержаних результатів.

Результати досліджень можуть бути використані при впровадженні швидкісного руху на території України для забезпечення необхідного рівня напруги та пропускної здатності.

Результати можна використати при впровадженні пристроїв поліпшення якості електроенергії на електроенергетичних об'єктах електрифікованих залізниць.

Розроблені методики та результати експериментальних досліджень можуть бути використані у навчальному процесі при підготовці бакалаврів та магістрів з електроенергетичних спеціальностей.

Публікації. За результатами роботи опубліковано 2 тези доповіді на міжнародних конференціях.

1. НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЕННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

При організації швидкісного руху на лініях постійного струму однією з найважливіших вимог до тягового електропостачання є підтримання рівня напруги на струмоприймачі поїзда 2900 В. Однак, виконання цієї вимоги неможливе без вдосконалення цієї системи, її модернізації та реконструкції. Підвищення техніко-економічних показників існуючих ділянок електричних залізниць постійного струму може бути досягнуто при проведенні певних технічних та організаційних заходів. Розглянемо деякі з них [1-3]:

- використання пунктів паралельного з'єднання;
- збільшення перерізу проводів контактної мережі;
- будівництво додаткових тягових підстанцій;
- застосування блоків розподіленого живлення;
- повна заміна шестипульсних випрямлячів на випрямлячі з дванадцятьма пульсаціями в кривій випрямленої напруги;
- розробка і випуск випрямлячів з оптимальною шкалою номінальних потужностей;
- розширення сфери рекуперативного гальмування і експлуатаційне освоєння дванадцятипульсних випрямно-інверторних перетворювачів;
- експлуатаційне освоєння ефективних схем згладжуючих фільтрів тягових підстанцій постійного струму;
- встановлення на фідерній зоні вольтододаткових пристроїв ВДП з регулюванням напруги;
- використання перетворювальних трансформаторів з регулюванням напруги під навантаженням.

Значно підсилити тягове електропостачання може не лише впровадження новітніх технологій і сучасного устаткування, а й застосування систем розподіленого живлення, тобто, перехід до нової схемотехніки мережі електротяги. Актуальним варіантом підсилення системи 3,0 кВ є установка

підсилюючих пунктів (ПП) на міжпідстанційній зоні, які будуть працювати за принципом децентралізованої системи. Перевагою цієї системи є потреба лише в підживленні контактної мережі, що не вимагає значної агрегатної потужності, а при використанні альтернативної енергії дозволяє значно знизити споживання електричної енергії з системи зовнішнього електропостачання. На сьогодні опрацьовано декілька варіантів побудови такої системи, у тому числі і з застосуванням змінного струму підвищеної частоти з напівхвильовим налаштуванням для живлення пунктів підсилення тягової мережі.

Економічний ефект досягається за рахунок зменшення перетину проводів контактної мережі, зменшення втрат енергії, підтримки необхідного рівня напруги в контактній мережі і збільшення коефіцієнта використання потужності основного енергетичного обладнання при зниженні його встановленої потужності. А окреме управління кожним ПП в режимі реального часу надасть можливість перерозподіляти згенеровану потужність вздовж тягової мережі та створить підґрунтя для побудови системи інтелектуального живлення. Необхідно зазначити, що ефективність системи розподіленого типу, особливо при застосуванні альтернативних джерел живлення, буде значно вищою при застосуванні накопичувачів енергії (ESS). Використання ESS в системі тягового електропостачання дозволяє частково або повністю усунути нерівномірності енергоспоживання, приймати надлишкову енергію рекуперації, підтримувати на певному рівні потужність тягової підстанції під час експлуатації та зменшити втрати енергії в зовнішній системі електропостачання. Окрім цього, накопичення і зберігання цієї енергії для повторного використання приведе до зменшення первинного енергоспоживання від зовнішньої системи електропостачання, що може привести до зниження встановленої потужності усіх агрегатів тягових підстанцій [4].

2. РЕЖИМИ НАПРУГИ В СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Визначення режиму напруги в системі тягового електропостачання і оцінка його впливу на роботу електрорухомого складу і пристроїв електропостачання є одним з найбільш важливих завдань при побудові сучасної системи електроживлення залізничного транспорту. Від режиму напруги залежать такі параметри, як швидкість руху поїзда, зміна струму і тягового зусилля електровоза, можливість подолання інерційних підйомів, навантаження і робота окремих пристроїв електропостачання. Режим напруги залежить від великої кількості взаємопов'язаних і взаємовпливаючих факторів. Насамперед, це якість напруги, режими роботи системи зовнішнього електропостачання, кількість електрорухомого складу на фідерній зоні, параметри системи тягового електропостачання та режим ведення кожного електровоза. У свою чергу, кожний із зазначених факторів залежить від певних чинників. Так, наприклад, режим ведення електровозу залежить від кваліфікації і досвіду машиніста, профілю ділянки, ваги поїзда, його складу і типу електровозу. Нормований рівень напруги в тяговій мережі електрифікованої ділянки забезпечує рух поїздів з необхідною економічно доцільною швидкістю, встановленою умовами пропускної здатності. Такий режим забезпечує регламентовані витрати енергії на тягу з урахуванням втрат в системі електропостачання, необхідну надійність роботи електрорухомого складу (ЕРС) та пристроїв електропостачання [38]. Робота ділянки при вимушеному режимі напруги призводить до необхідності використання резервної потужності і перевантаження обладнання тягових підстанцій. При цьому напруга на струмоприймачах стає нижчою допустимого рівня і виникає необхідність у зниженні розмірів руху та збільшенні інтервалу між поїздами.

Деякі результати експериментальних досліджень режимів напруги, виконаних на кафедрі Інтелектуальні системи електропостачання наведені на рис. 1-6.

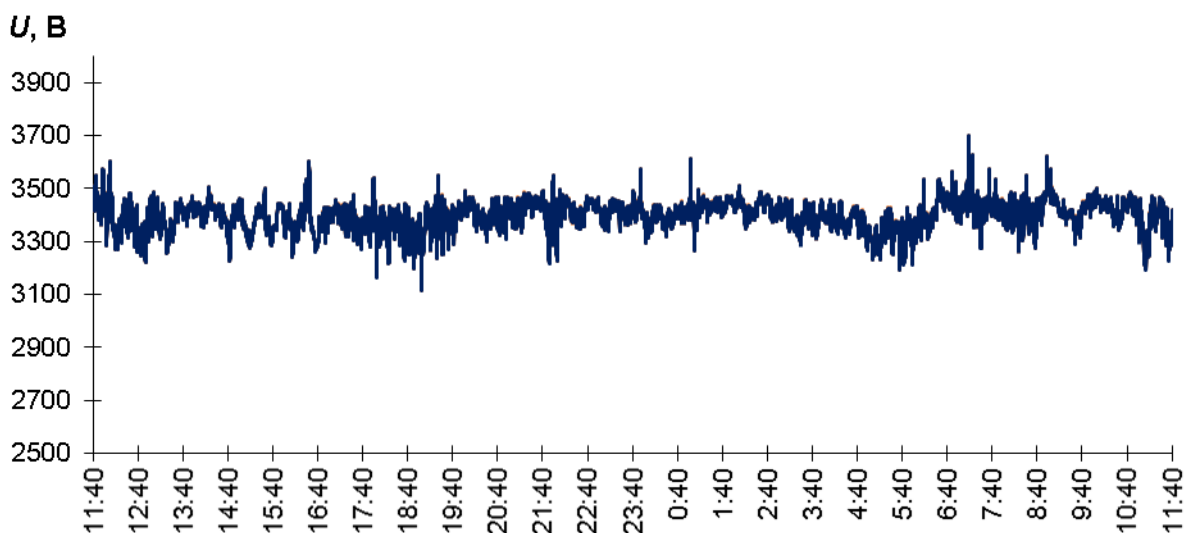


Рис. 1. Напряга на шинах 3,3 кВ ТП Верхівцеве

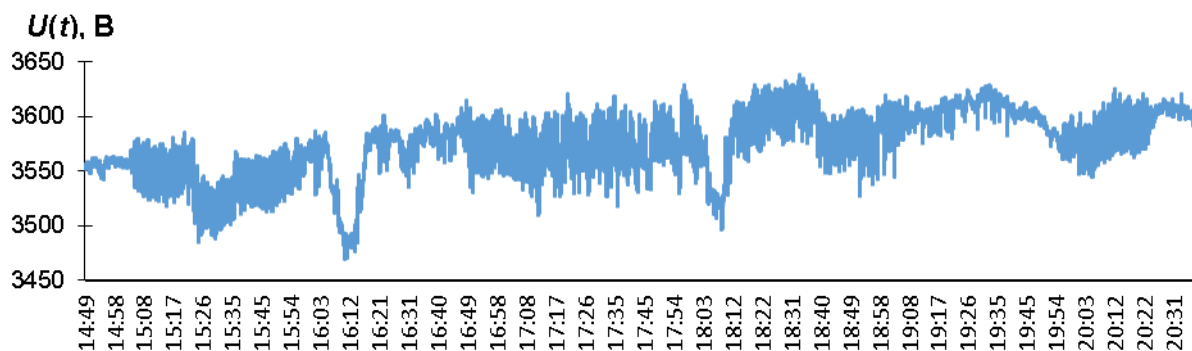


Рис. 2. Напряга на шинах 3,3 кВ тягової підстанції Тухля

Результати вимірювань показують, що значення напруги на шинах 3,3 кВ тягових підстанцій завищені відносно номінального рівня, але не перевищують нормованого значення. Розмах зміни напруги на тягових підстанціях знаходився в межах 250 В.

При переведенні ТП Ерастівка була переведена в режим поста секціонування, ділянка Верхівцеве – П'ятихатки працювала у вимушеному режимі. Внаслідок збільшення міжпідстанційної зони на ТП Ерастівка було зафіксовано значне зниження напруги при встановленому розмірі руху (рис. 3). З аналізу рисунку 3 напруги у різних режимах видно значну різницю у діапазоні зміни напруги: 3185 – 3600 В в режимі тягової підстанції, 2600 – 3780 В в режимі поста секціонування.

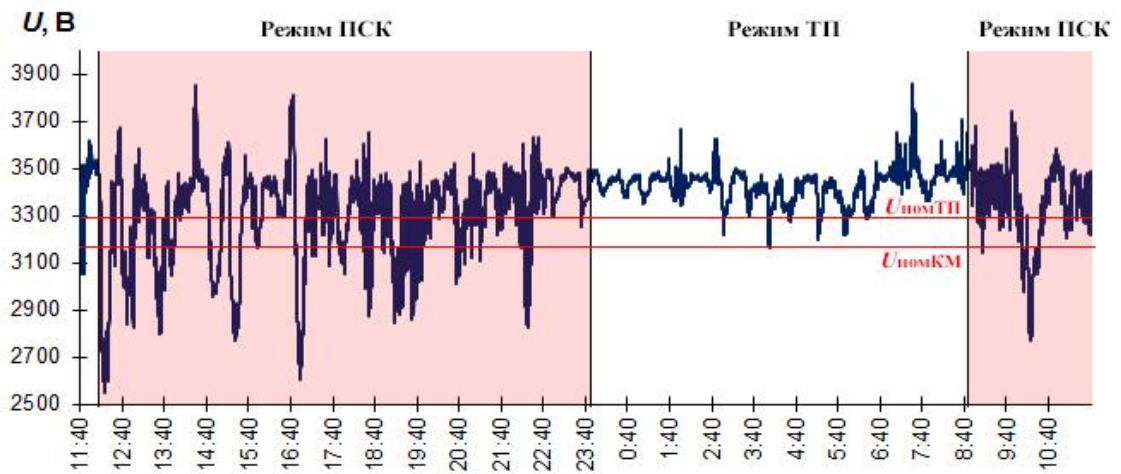


Рис. 3. Напруга на шинах 3,3 кВ ТП Ерастівка у вимушеному режимі

Використання нових, більш потужних електровозів або збільшення їх числа чи секцій для пропуску поїздів великої маси, супроводжується значним зростанням потужності та струму, що споживається з тягової мережі. Так, наприклад, на Придніпровській залізниці на ділянці К–Н при масі поїзда 6004 т два електровози ВЛ11 встановленою потужністю 4,6 МВт кожен, споживали сумарний тяговий струм до 3 кА (рис. 4). При цьому, в режимі тяги, напруга на струмоприймачах виходила за межі допустимих значень (рис. 5). В режимі вибігу також мали місце рівні напруги, які не відповідали нормованим значенням (рис. 6). Вони можуть бути обумовлені або коливаннями напруги на шинах тягових підстанцій, або короточасними піками тягових навантажень, які представляють собою наслідок співпадання пускових струмів окремих електровозів або їх накладання на тягові струми, що споживаються іншими поїздами, які знаходяться на міжпідстанційній зоні.

Аналіз рисунків 4-6 показує, що на струмоприймачі електровоза напруга також має різкозмінний характер. Максимальні коливання в режимі тяги можуть досягати значення 545 В, а в режимі вибігу – 618 В. Отримані результати обумовлюють необхідність зменшення коливань напруги в тяговій мережі та забезпечення сталості його ймовірнісних характеристик в межах, передбачених нормативними документами для швидкісного

транспорту [5]. При цьому для забезпечення більш високих енергетичних показників функціонування ЕРС необхідно ставити задачу зменшення діапазону зміни напруги на струмоприймачах протягом всього часу руху поїзда по перегону.

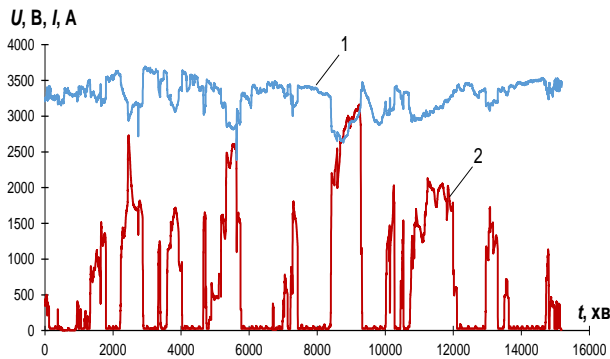


Рис. 4. Реалізація струму і напруги зведеного поїзда на дослідній ділянці:
1 – напруга на струмоприймачах;
2 – споживаний струм

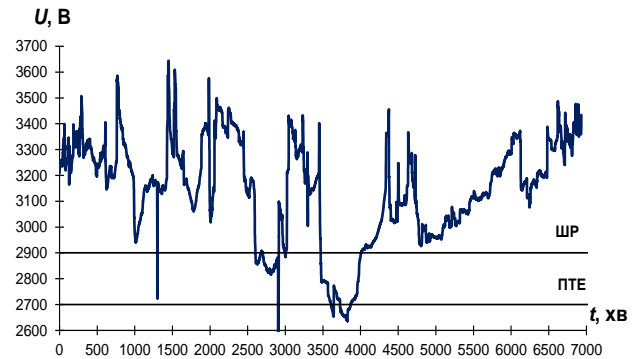


Рис. 5. Напруга на струмоприймачах в режимі тяги: ШР – норма напруги для швидкісного руху;
ПТЕ – норма напруги за ПТЕ

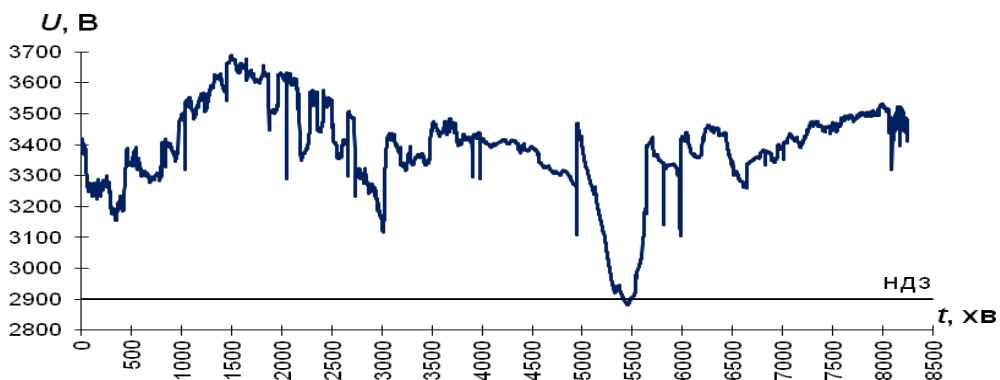


Рис. 6. Напруга на струмоприймачах в режимі вибігу

Проведені дослідження режимів напруги показали неспроможність централізованої системи тягового електропостачання забезпечити потрібний рівень потужності на кілометр.

3. КІЛЬКІСНА ОЦІНКА СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПО НАПРУЗІ

Процес електроспоживання в тяговій мережі відбувається під впливом різнорідних збурень: зміни режимів роботи електрорухомого складу в залежності від особливостей графіка руху поїздів, профілю колії та наявних обмежень, короточасних відривів струмоприймачів, різного роду перехідних процесів і т. і. Режим напруги в тяговій мережі під впливом цих збурень має нестационарний коливальний характер з різкими змінами напруги, які можуть призводити до низки проблем, таких як буксування, пошкодження зчіпних приладів або появи кругового вогню на колекторах і т.д. Різкий спад напруги супроводжується значним зменшенням струму і сили тяги, також може бути небезпечним для електрорухомого складу.

Дослідженню режимів напруги в тяговій мережі та їх впливу на функціонування системи тягового електропостачання при необхідній умові дотримання завданої пропускної здатності присвячена велика кількість наукових робіт. Сформовані раніше науковцями підходи при оцінці рівня напруги обмежуються визначенням напруги при середніх умовах руху чи при найбільшій його інтенсивності [3, 6]. Однак, величини цих напруг зовсім недостатні для характеристики функції напруги, як випадкової величини, і тому не можуть дати вичерпного уявлення про режими роботи електрифікованої залізниці. Справа в тому, що при вирішенні поставленого завдання ми маємо декілька обмежень:

- зазвичай, для режимів роботи електрифікованої ділянки встановлюються три рівні напруги: мінімальна, максимальна та середня. При цьому числові значення цих напруг можуть бути різними для кожної міжпідстанційної зони та мають випадковий характер;

- неможливо встановити закон розподілу напруги в тяговій мережі, тому оцінку змін рівнів напруги на струмоприймачі проводять або для кожного перегону, або відносно завданого Правилами тягових розрахунків рівня 3000 В;

- на рівень напруги у тяговій мережі значний вплив має рівень тягового навантаження, яке є різним для кожної ділянки і має випадковий характер;

- незважаючи на існуючі норми рівнів напруги в тягових мережах, різкоколивальний характер змін напруги на струмоприймачі електровоза робить їх значення “умовними”, а закладений в норми великий діапазон змін напруги 2,2-3,85 кВ не дозволяє оптимізувати наперед траєкторію руху потягу навіть при відомій його вазі або завданій швидкості руху.

Вирішення проблеми вбачалося в знаходженні “оптимальної напруги” з регламентованими межами змін, яка забезпечить рух поїзда з визначеною швидкістю, необхідною для забезпечення завданого часу ходу по перегону з мінімальними витратами на тягу та втратами потужності [6]. Втрати напруги і електроенергії в тяговій мережі визначаються в основному струмом тягових двигунів електровозів і параметрами тягової мережі. При різних середніх напругах на струмоприймачеві за рахунок відповідного підбору режиму ведення поїздів можна одержати однаковий час ходу по ділянці (однакову криву швидкості руху), якому відповідає та ж сама корисна механічна робота по переміщенню поїзда. При цьому прагнення до звуження діапазону відхилення напруги є умовою забезпечення номінального режиму тягових і допоміжних машин електровоза [7]. Вирішення цього завдання покладається на застосування пристроїв регулювання напруги: такий підхід врешті призвів до створення концепції керованого електропостачання [1], яка була реалізована на одній з ділянок Свердловської залізниці.

Однак, на більшості залізниць постійного струму відсутні засоби регулювання напруги, а керівні впливи на її рівень здійснюються малозатратними тривіальними засобами підсилення тягової мережі, які не в змозі, як зазначалось вище, забезпечити необхідну стійкість системи тягового електропостачання (СТЕ) по напрузі.

Забезпечення стійкої та надійної роботи будь-якої системи є важливою задачею, яка потребує свого вирішення. В даний час не існує чіткої класифікації видів стійкості [8]. Проте, з позицій системного підходу, можна

розглядати різні види стійкості: стійкість техніки; технологічну стійкість; організаційну стійкість; стійкість зовнішніх зв'язків; екологічну стійкість; структурну стійкість і т.п. Кожен з видів стійкості впливає на якісні характеристики роботи системи.

Через складність явищ та процесів, що проходять в електроенергетичних системах (ЕЕС), “фізичне” поняття стійкості для зручності традиційно розкладають на складові. В країнах колишнього СРСР була досить поширена математична декомпозиція стійкості на поняття “стійкість паралельної роботи енергосистем” та “стійкість навантаження”. В той же час, в країнах Європейського енергетичного об'єднання використовується дещо інша класифікація цього явища: “стійкість за кутом” та “стійкість за напругою”. Зазначені різні математичні формалізації по різному розглядають єдину фізичну суть стійкості енергосистем, але ні в якій мірі не протирічать одна одній. При цьому, даний підхід дозволяє більш чітко розділити загальне поняття на окремі математичні складові. Крім того, враховуючи перспективи України щодо входження до Європейської Енергетичної Спільноти, доцільно певним чином визначитися та залучити до використання сучасні світові підходи щодо аналізу стійкості режимів енергосистем [9].

Розрахунки стійкості виконуються при проектуванні та експлуатації енергосистем, а саме: вибір схеми живлення ЕЕС та уточнення розміщення основного обладнання; визначення допустимих режимів системи; вибір заходів щодо підвищення стійкості ЕЕС при зміні схеми живлення; визначення параметрів налаштування систем регулювання та керування, релейного захисту, АПВ тощо. Крім того, розрахунки стійкості проводяться при розробці та уточненні вимог до основного обладнання ЕЕС, релейного захисту, автоматики та системам регулювання за умовами стійкості ЕЕС.

Стійкість за напругою – це здатність енергосистеми підтримувати стійкі та прийнятні рівні напруги на всіх системах шин (СШ) як в нормальних, так і в післяаварійних та ремонтних режимах. Критерій

стійкості енергосистеми за напругою полягає у тому, що в поточному режимі на кожній СШ при збільшенні напруги величина реактивної потужності на тій самій СШ повинна збільшуватись. Динамічна стійкість за напругою пов'язана з оцінкою та підтримкою напруги впродовж 1-2 секунди відразу після великого збурення. Статична стійкість за напругою належить до форми стійкості, що визначається переважно статичними характеристиками навантаження та параметрами мережі. Статичну стійкість оцінюють за допомогою значення коефіцієнта запасу з напруги K_U у вузлах навантаження. Цей коефіцієнт визначається наступним чином [10]:

$$K_U = \frac{U - U_{кр}}{U_{кр}} \quad (1)$$

де $U_{кр}$ – це критична напруга у вузлі, за СОУ-Н-МЕВ 40.1-00100227-68:2012 [10] величина критичної напруги приймається $0,7U_{ном}$.

Зазначимо, що у системі тягового електропостачання електрифікованих залізниць оперативне керування режимами функціонування має суттєві відмінності від практики електроенергетичних систем [11]. Вони полягають у фактичній відсутності засобів регулювання режимів та моніторингу показників функціонування СТЕ. У кращому випадку енергодиспетчер має інформацію про рівні напруги на шинах тягового навантаження та величини споживаних струмів фідерів. За наявною телеметричною інформацією про склад ввімкненого обладнання при відомих схемах живлення він здійснює керування режимом при взаємодії з поїздним диспетчером з урахуванням реальної пропускної спроможності електрифікованої ділянки. По навантажувальній здатності контактної мережі визначається мінімальний міжпоїздний інтервал для забезпечення сталої роботи СТЕ. При цьому у енергодиспетчера відсутній інструментарій для оцінки стійкості по нарузі.

Відомо, що напруга на струмоприймачах електровозів навіть при нормальній схемі живлення міжпідстанційних зон змінюється у значних

межах. При цьому, чим більша потужність споживається електровозом, тим більші межі змін. Оцінка впливу стійкості СТЕ по напрузі має велике значення для функціонування електрорухомого складу. Це визначається тим, що у ряді випадків різкі зміни напруги можуть призвести до надмірного підвищення струму двигунів та тягових зусиль. Особливо неприємні наслідки при цьому можуть виникнути у разі роботи електровоза у режимі рекуперативного гальмування. Точне рішення поставленого питання надзвичайно ускладнене необхідністю розрахунку нелінійних залежностей, котрі визначають режими роботи СТЕ і ЕРС.

Тут необхідно звернути увагу, що рівень напруги в тяговій мережі залежить від значної кількості факторів, які змінюючись у часі, площині та просторі, мають ймовірнісний характер зі складними взаємозв'язками. З позицій систем автоматичного управління СТЕ – нелінійна розімкнена система с розподіленими параметрами. Традиційні підходи, застосовувані в теорії автоматичного управління, не дозволяють навіть з приблизною точністю отримати передатні характеристики СТЕ для подальших розрахунків стійкості по напрузі.

Стійкість СТЕ є істотним чинником, що впливає на ефективність режимів тягового електропостачання та споживачів. Через недостатню пропускну здатність тягових мереж, застарілі методи їх проектування та експлуатації, відсутність сучасних способів оцінки стійкості та ефективних засобів її підвищення стійкість системи тягового електропостачання по напрузі знижується. В усталеному режимі функціонування реальної СТЕ її параметри постійно змінюються, що пов'язано з наступними факторами: зміною навантаження (кількістю ЕРС на міжпідстанційні зоні та зміною їхньої потужності); відхиленнями напруги; температурою нагрівання контактних проводів. Таким чином, в усталеному режимі системи завжди є незначні збурення параметрів її режиму, при яких вона має бути стійкою.

Виходячи з визначення коефіцієнта стійкості по напрузі K_U необхідно зазначити, що стійкість є величиною, пропорційною величині напруги на

струмоприймачі електровозу. Тому крива стійкості буде мати ту ж форму, що й крива напруги. Кількісна оцінка стійкості по напрузі СТЕ за виразом (1) виконувалась за таких припущень: СШ – ковзний контакт струмоприймача, $U_{СШ} = f(t)$, $U_{ном} = 3,3$ кВ, $U_{кр} = 2,9$ кВ (для умов швидкісного руху).

В результаті застосування такого підходу в роботі [12] було встановлено, що в процесі руху поїзда по реальній ділянці мають місце зони відсутності стійкості по напрузі. Для уточнюючого розрахунку статичної стійкості було обрано перегін між підстанціями “Ж-В” через наявність зтяжного підйому, схема живлення – повна паралельна.

На першому етапі, з використанням експериментальних даних, було розраховано викиди напруги, тобто значні відхилення від середньої напруги, на розрахунковій зоні “Ж-В” та статичну стійкість. Таким чином, досліджувалась залежність стійкості від викидів напруги на струмоприймачі при русі електровоза по ділянці. Результати розрахунків наведено на рис. 7-8.

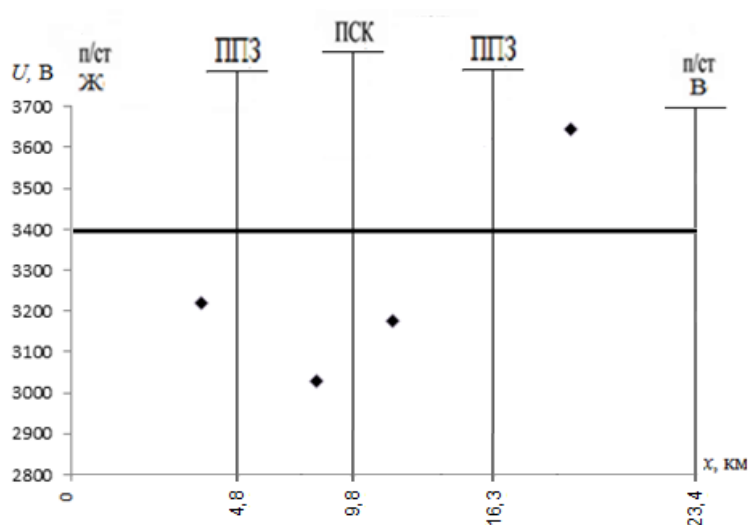


Рис. 7. Середня напруга на міжпідстанційній зоні “Ж-В” та викиди напруги

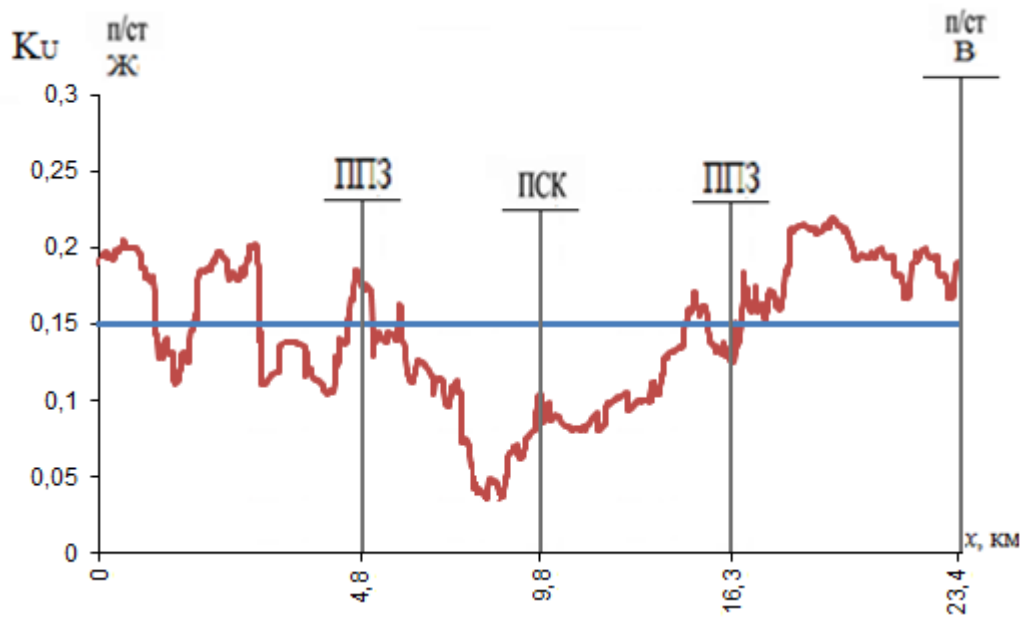
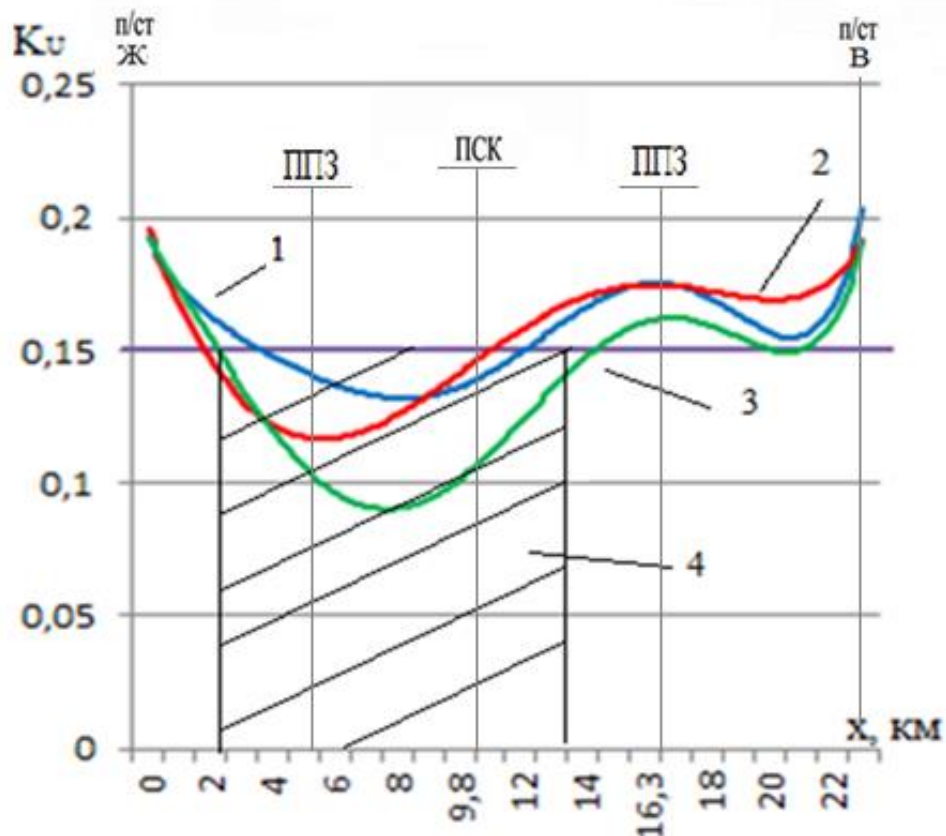


Рис. 8. Статична стійкість по напрузі на ділянці “Ж–В”

З аналізу наведених графіків можна зробити висновок, що статична стійкість не задовольняє умові $K_U < 0,15$ у тих місцях, де напруга на струмоприймачеві була нижчою 3,4 кВ. Таким чином, з цього можна зробити припущення, - якщо підвищити напругу у контактній мережі, то тим самим підвищиться і статична стійкість системи тягового електропостачання. При цьому підвищення напруги в тяговій мережі може призвести практично до пропорційного підвищення швидкості руху поїздів, за умови відсутності обмежень, тобто, збільшення пропускної здатності.

Надалі оцінювався вплив схеми живлення на стійкість СТЕ по напрузі. Для обраної ділянки розглядались наступні схеми живлення: повна паралельна, вузлова та двостороння. Довжина ділянки 23,4 км, тип контактної підвіски М120+2МФ100+А185. Для кожної зі схем живлення проводився розрахунок рівнів напруги по всій довжині ділянки (враховуючи зрівнювальні струми), з використанням дійсних значень споживаного струму електровозу з експериментальних даних. Отримані графіки K_U статичної стійкості по напрузі для різних схем живлення приведені на рис. 9.



1 – паралельна схема; 2 – вузлова схема; 3 – двостороння схема; 4 – зона нестійкості

Рис. 9. Статична стійкість при застосуванні різних схем живлення

Аналіз рис. 9 показує, що незалежно від схеми живлення тягової мережі СТЕ має нестійкі зони по напрузі, що при впровадженні швидкісного руху вимагатиме розробки заходів по їх усуненню. Необхідно звернути увагу, що в зоні нестійкості по напрузі розташовані пункт паралельного з'єднання і пост секціонування (ПСК), застосування яких покликане, в тому числі, і для поліпшення режиму напруги в тяговій мережі.

Підсумовуючи результати всіх наведених розрахунків, можна сказати, що існуюча система електропостачання, з використанням будь-якої схеми живлення, не стійка по напрузі і потребує модернізації. Тобто, існуюча схемотехніка СТЕ постійного струму не завжди в змозі забезпечити передачу електроенергії необхідної потужності і високої якості для високошвидкісних потягів.

Можна вказати наступні напрямки підвищення стійкості СТЕ по напрузі:

- підвищення напруги на шинах тягових підстанцій;
- підвищення напруги на струмоприймачах електровозів;
- зменшення діапазонів зміни напруги в тяговій мережі;
- розробка несиметричних схем підсилення тягової мережі;
- застосування системи розподіленого живлення.

4. НЕСИМЕТРИЧНА СИСТЕМА ПІДСИЛЕННЯ ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ

Приймаючи до уваги результати розрахунків стійкості по напрузі, була запропонована несиметрична схема підсилення тягової мережі, представлена на рис. 10.

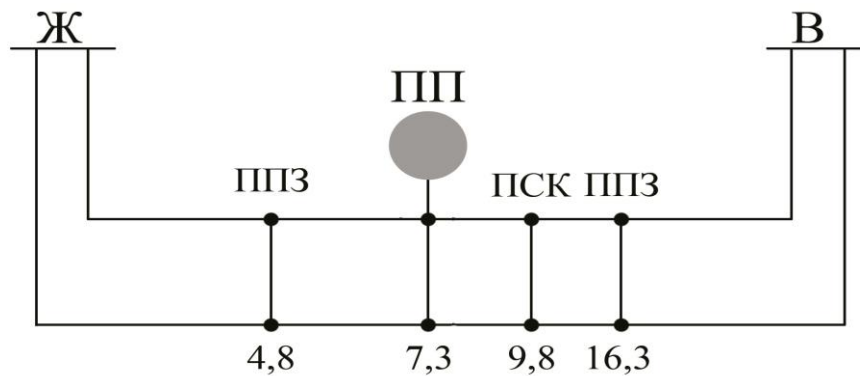


Рис. 10. Несиметрична схема підсилення тягової мережі розрахункової ділянки

Для дослідження ефективності впровадження несиметричної системи підсилення були використані наступні вихідні дані:

напруга холостого ходу тягових підстанцій 3600 В;

в координаті 7,3 км було встановлено підсилюючий пункт;

обмеження мінімального значення напруги в тяговій мережі відповідає коефіцієнту стійкості за напругою 0,15, тобто 3335 В.

При проведенні дослідних розрахунків електрифікованої ділянки отримані результати показали наступне: коефіцієнт стійкості за напругою відповідає встановленому значенню (рис. 11), мінімальне значення напруги на струмоприймачі ЕРС відповідає встановленому обмеженню (рис. 12), при цьому, пікова потужність підсилюючого пункту не перевищує 250 кВт (рис.29)

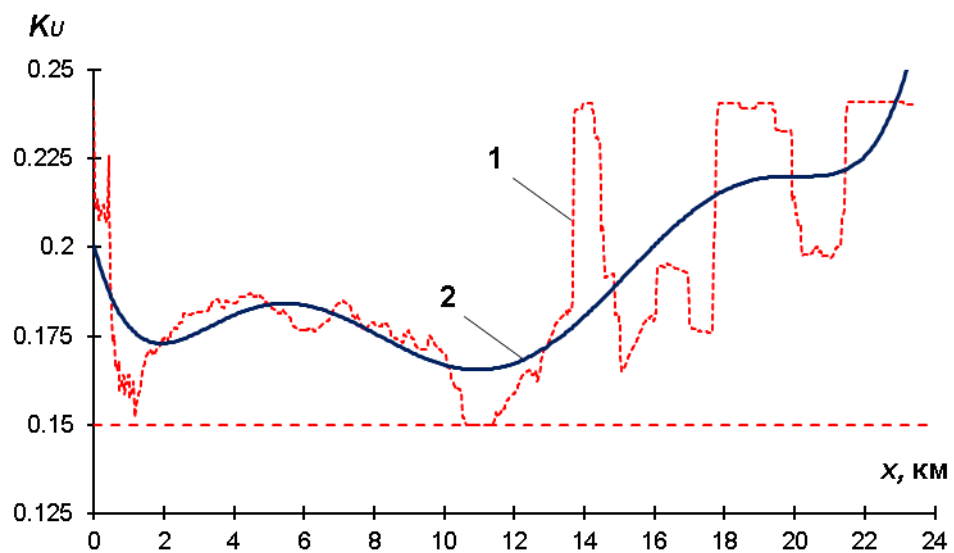


Рис. 11. Коефіцієнт стійкості за напругою:
1 – розрахункова крива; 2 – апроксимована крива

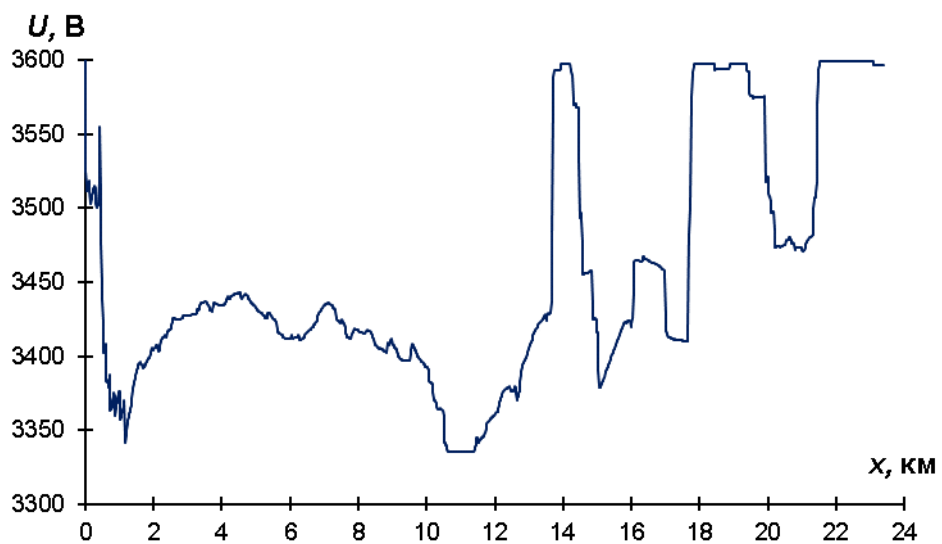


Рис. 12. Напруга на струмоприймачі ЕРС

ВИСНОВКИ

Існуючі системи тягового електропостачання, не в змозі у повному обсязі забезпечити провізну спроможність залізниць. Особливо гостро ця проблема стосується системи електричної тяги постійного струму 3 кВ на великих транспортних вузлах. Отже, необхідно шукати способи підвищення тягово-енергетичних можливостей експлуатованих систем тягового електропостачання для того, щоб сучасні енергетичні канали систем тягового електропостачання могли у повній мірі забезпечувати надійність та безперебійність живлення, стійкість до непередбачуваних впливів та високу енергоефективність. Аналіз систем живлення показує, що розподілені системи живлення тягового навантаження мають кращі техніко-економічні показники ніж централізована система живлення. При цьому в пристроях тягового електропостачання може використовуватися енергія, що отримується від поновлюваних джерел.

З отриманих розрахунків та результатів експериментальних досліджень можна зробити висновок, що децентралізована система тягового електропостачання в деяких випадках не спроможна забезпечити необхідну стійкість по напрузі, а також допустимі втрати потужності при впровадженні високошвидкісного руху. Дослідження проблеми стійкості по напрузі є фундаментом розробки технічних заходів по плануванню резервів потужності у системі тягового електропостачання постійного струму, направлених на підвищення режимної безпеки у ній як сьогодні, так і в найближчій перспективі.

Запропонована схема несиметричного підсилення тягової мережі електрифікованих ділянок постійного струму дозволяє забезпечувати необхідний рівень напруги в тяговій мережі при швидкісному русі, нормовану стійкість по напрузі з мінімізацією втрат потужності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Аржанников Б.А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока: монография / Б.А. Аржанников – Екатеринбург: УрГУПС, 2010. – 176 с.
2. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрических железных дорог / К.Г. Марквардт – М: Трансжелдориздат, 1958. – 288 с.
3. Мирошниченко Р.И. Режимы работы электрифицированных участков / Р.И. Мирошниченко – М.: Транспорт, 1982. – 207 с.
4. Пунынин В.Н., Шевлюгин М.В. Разработка энергосберегающих систем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока 3,3 кВ с использованием накопителей энергии. // Сборник научных трудов «Фундаментальные и поисковые научно-исследовательские работы в области железнодорожного транспорта 1998 г.». Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ), Москва 1999, выпуск 921, с. 14-22.
5. Правила технічної експлуатації залізниць. Київ, Україна: 1997. 48 с.
6. Б.А. Аржанников, Ю. В. Ткачев, Методика получения зависимости потери эл. эн. в тяг. сети от среднего напряжения на токоприемнике электровоза при заданном времени хода поезда по участку. Свердловск, Россия: Уральский электромех. ин-т инж. ж.д. трансп, 1986.
7. С.И. Осипов, Ред., Рациональные режимы вождения поездов и испытания локомотивов. Москва, Россия: Транспорт, 1984.
8. Д.Г. Дерев'янку, «Особенности оценки запаса стойкости локальных систем с различными джерелами генерації», ЕНЕРГЕТИКА економіка, технології, екологія. Спецвипуск, Матеріали аспірантських читань пам'яті А.В. Праховника, с. 15-19. 2013.
9. О.В. Кириленко, В.В. Павловський, Л.М. Лук'яненко, Є.В. Зорін, «Аналіз стійкості енергетичних систем за напругою», Технічна електродинаміка. №3 с. 59-66. 2010.

10. Стійкість енергосистем. Керівні вказівки: СОУ-Н МЕНВ 40.1 – 00100227 – 68: 2012.– Київ, Україна: ГРІФРЕ: Міненерговугілля України, 2012. – 35 с.
11. В.М. Авраменко, П.О. Черненко, Н.Т. Юнєєва, «Оцінювання поточного запасу статичної стійкості енергосистеми з використанням оперативного прогнозу вузлових навантажень», Вісник Вінницького політехнічного інституту. № 1, с. 90-93. 2013.
12. Сыченко В.Г. Матусевич А.А., Рогоза А.В., Павличенко М.Е., Васильев И.Л., Пулин Н.Н. «Повышение энергетической эффективности в эволюционирующих системах электроснабжения» Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». № 27(1249), с. 182-186. 2017.