

В. Сиченко, д. т. н., завідувач кафедри «Інтелектуальні системи електропостачання» ДНУЗТ ім. ак. В. Лазаряна

М. Пулін, перший заступник начальника служби електропостачання регіональної філії «Львівська залізниця» ПАТ «Укрзалізниця»

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА СИСТЕМА ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З РОЗПОДІЛЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ

Реконструкція системи електричної тяги постійного струму спрямована на підвищення пропускної і перевізної здатності залізниці.

Сучасний стан електрифікованих залізниць обумовлюється необхідністю забезпечення конкурентоспроможності з іншими видами транспорту, як при перевезенні пасажирів, так і при доставці вантажів. При цьому необхідно забезпечувати високий рівень комфортності і швидкості доставки. Рішення завдань зумовлює впровадження швидкісного і високошвидкісного пасажирського транспорту, а також великогазового руху потягів, що обумовлює необхідність збільшення перевізної здатності залізниць. Для цього здійснюються заходи із збільшення швидкостей руху, створюються нові електровози великої потужності, застосовуються різні способи підсилення тягового електропостачання.

Наявна система тягового електропостачання постійного струму не завжди у змозі забезпечити передачу електроенергії необхідної потужності та високої якості для цих потягів. До обмежень, що виникають, належать зниження напруги на струмоприймачі електровоза нижче дозволеного для нормальної експлуатації значення 2700 В (для швидкісного руху 2900 В) і нагрівання проводів контактної мережі, що сприяє втраті їх механічної міцності. Зменшення напруги на струмоприймачі знижує швидкість руху поїздів, а при збереженні рівня споживаної потужності відбувається збільшення струму електровоза і втрат електричної енергії в тяговій мережі.

З урахуванням того, що в Україні, так само як і на залізницях країн світу, за системою постійного струму електрифіковано близько половини ліній з електричною тягою,

очевидно, що необхідна реконструкція системи електричної тяги постійного струму, спрямована на підвищення пропускної і перевізної здатності. При цьому мають бути максимально реалізовані незаперечні переваги цієї системи з мінімальними додатковими капітальними вкладеннями.

Досвід розробок та дослідження наукових й навчальних інститутів, низки залізниць, зарубіжних організацій і фірм показує, що одним із способів усунення обмежень в напрузі і струмовим навантаженням в контактній мережі системи електротяги 3,3 кВ може бути вирішене з найменшими витратами за допомогою систем і пристроїв підвищення й автоматичного регулювання випрямленої напруги [1].

Однак регулювання напруги на шинах тягових підстанцій не вирішує проблему в цілому, через збільшення втрат потужності на міжпідстанційній зоні та відповідних експлуатаційних витрат. Тому для підвищення техніко-економічних показників ділянок залізниць, електрифікованих постійним струмом, застосовуються технічні та організаційні заходи:

- використання пунктів паралельного з'єднання;
- збільшення перерізу проводів контактної мережі;
- будівництво додаткових тягових підстанцій;
- застосування блоків розподіленого живлення;
- повна заміна шестипульсних випрямлячів на дванадцятипульсні;
- розробка і випуск випрямлячів з оптимальною шкалою номінальних потужностей;

- розширення сфери рекуперативного гальмування і експлуатаційне освоєння дванадцятипульсних випрямно-інверторних перетворювачів; експлуатаційне освоєння ефективних схем згладжувальних фільтрів тягових підстанцій постійного струму;
- встановлення на фідерній зоні вольтододаткових пристроїв (ВДП) з регулюванням напруги;
- збільшення потужності тягових підстанцій і зменшення відстані міжпідстанційних зон;
- підсилення зовнішнього електропостачання і обмеження відхилень рівня напруги на вводах тягових підстанцій [1].

Ефект від застосування окремих заходів різний і є недостатнім. Для підсилення системи тягового електропостачання (СТЕ) конкретної лінії, з метою досягнення необхідних показників якості електропостачання високошвидкісних поїздів, потрібно здійснювати комплекс заходів. Разом з технічними заходами, зниження втрат напруги в тяговій мережі може бути досягнуте завдяки раціональній організації руху. Наприклад, через застосування пакетного графіка руху швидкісних поїздів з інтервалами, рівними часу ходу з найбільш протяжної ділянки між тяговими підстанціями, що забезпечує знаходження на кожній міжпідстанційній зоні тільки одного поїзда. Електрифіковані високошвидкісні магістралі Японії, Франції, Іспанії, Італії та інших країн побудовані з урахуванням зазначених вимог, із застосуванням нових технологій електропостачання високошвидкісних поїздів. В Україні з наве-

дених вище способів використовуються тільки деякі:

- використання пунктів паралельного з'єднання;
- збільшення перерізу проводів контактної мережі;
- заміна шестипульсних випрямлячів на дванадцятипульсні.

При розрахунку СТЕ електрифікованих залізниць зі швидкістю руху до 160 км/год вважається, що характер тягового навантаження приблизно описується нормальним законом розподілу. Пристрої СТЕ вибираються в результаті максимальних значень струмових навантажень упродовж часу руху поїздів за графіком [2].

Високошвидкісні ж залізниці та залізниці з інтенсивним рухом, підвищеною пропускною здатністю, з невеликими інтервалами (3–15 хв) між поїздами і споживаною потужністю 10–12 МВт й більше мають інший характер тягового навантаження. Для таких ліній характерне імпульсне навантаження: для проводів тягової мережі, перетворювачів та комутаційних апаратів тягових підстанцій, постів секціонування, інших лінійних пристроїв. При цьому зростають пікові навантаження на тягові підстанції, збільшуються втрати напруги та енергії в пристроях тягового електропостачання, ускладнюються умови струмознімання і підвищується температура проводів контактної мережі.

Питома потужність електроспоживання високошвидкісних ліній складає 1–1,3 МВт/км, а для двоколіїсних ліній з підвищеною пропускною здатністю може досягати 1,7–2,5 МВт/км. За нормами Міжнародного союзу залізниць, розробленими в 1996 році для двоколіїсної високошвидкісної лінії з максимальною швидкістю 300–350 км/год передбачається максимальна питома потужність споживання електроенергії на тягу 3 МВА/км. Потужність пристроїв тягового електропостачання рекомендується приймати виходячи із зазначеної питомої потужності електроспоживання [3].

Необхідна потужність СТЕ залежить від багатьох факторів, основними з яких є маса поїзда,

швидкість руху, основний опір руху, інтервали між поїздами, частота чергування режимів руху і розгону, можливість рекуперативного гальмування, план і профіль колії, характеристики мережі тягового електропостачання. Параметри електротягової мережі для забезпечення необхідної точності мають визначатися за допомогою сучасного методу фізико-математичного моделювання процесу високошвидкісного руху поїздів.

Можливості підвищення енергоефективності залізничної системи далеко не вичерпані. Наразі основним напрямком заходів щодо зниження споживання енергетичних ресурсів є удосконалення конструкцій інфраструктури та рухомого складу, а також методів управління рухом. Для систем тягового електропостачання до таких напрямків відносяться: мінімальний рівень технологічних втрат, мінімізація небалансу (умовних втрат) і перетоків потужності.

Найчастіше системи тягового електропостачання експлуатуються не в номінальних режимах, а електрообладнання та мережі СТЕ виявляються недовантаженими або перевантаженими. Це призводить до збільшення частки втрат у трансформаторах та обладнанні, до зниження коефіцієнта потужності в системах електропостачання. Причинами низької енергоефективності систем електропостачання є:

- технічна зношеність електроустаткування, що виробило свій розрахунковий ресурс, який суттєво знижує безпеку обслуговування вузлів навантаження і надійність усієї системи електропостачання;
- нераціональні режими роботи основного електроустаткування;
- застарілі схемні рішення живлячих і розподільчих мереж;
- значні перетікання реактивної потужності у мережах СТЕ;
- стабільна нерівномірність добових графіків навантажень тягових підстанцій;
- суттєві відхилення показників якості електроенергії від нормованих.

Підвищення ефективності функціонування СТЕ може досягатися через зниження втрат електричної енергії в системі трансформації, розподілу і перетворення (трансформатори, розподільчі мережі, електрорухомий склад, системи зовнішнього та внутрішнього освітлення тощо), а також через оптимізацію режимів експлуатації обладнання. Як відомо, ефективний режим електроенергетичної системи — це режим (з дозволених), який задовольняє умовам надійності технічних засобів, що входять у систему, якості електроенергії, і при якому забезпечується мінімум сумарної витрати ресурсів. Власне поняття ефективного функціонування електроенергетичних систем розглядається в комплексному вигляді для тривалих і короткотривалих режимів роботи.

Якість електропостачання і умови використання енергії залежать від різних чинників, включно з опором електричних мереж, а також вплив деяких видів устаткування та використання енергії на характеристики електропостачання. У енергетичних системах бажані стабільність напруги, а також відсутність спотворень форми напруги і струму.

Враховуючи специфіку енергообмінних процесів у СТЕ, актуальною є проблема розробки теорії та методів розрахунку показників енергоефективності постачання електричної енергії в сучасних електричних мережах з урахуванням несиметричного, нелінійного та швидкозмінного характеру споживання електричної енергії сучасними споживачами.

На сьогодні до основних критеріїв ефективності функціонування електроенергетичних систем тягового електропостачання, зазвичай, належать такі:

- кількість спожитої електричної енергії;
- втрати електроенергії в елементах системи електропостачання;
- рівень напруги;
- несиметрію і несинусоїдальність напруги;
- рівень вищих гармонік.

Варто зазначити, що сьогодення сучасної енергетики обумовлюється зростаючим обсягом електроенергії отриманої від відновлюваних джерел. В основі цього процесу є необхідність вирішення екологічних проблем, охорони довкілля і складнощі енергетичної політики у світі, обумовлені зростаючим дефіцитом традиційних енергетичних ресурсів. Україна за останні декілька років досягла значного прогресу в розвитку джерел альтернативної електричної енергії, зокрема, сонячних (СЕС) і вітрових (ВЕС) електростанцій [4].

На сьогодні у світі є приклади успішного впровадження використання електроенергії, отриманої від відновлювальних джерел, в системі електричної тяги. Так, наприклад, у 2011 році було відкрито рух поїздів за маршрутом Париж–Амстердам з використанням енергії сонця від фотобатарей, встановлених на маршруті руху поїзда. ВАР «РЖД» також має намір використовувати альтернативні джерела енергії для залізниць Росії. Наразі електроенергія від фотобатарей забезпечує потреби станції Комсомольська (Краснодарський край). У подальшому передбачається, що використання енергії вітру дасть максимальний ефект на Північній залізниці та на Сахаліні, а сонячних батарей — на Північно-Кавказькій залізниці. В Україні також реалізовано пілотні проекти паралельної роботи СЕС та зовнішньої системи електропостачання для живлення шин 10 кВ на тяговій підстанції Самбір та ВЕС для живлення шин 35 кВ на тяговій підстанції Старий Самбір.

Інтеграція джерел розподіленої генерації (ДРГ) в систему тягового електропостачання постійного струму вимагає розробки нових принципів проектування, функціонування та керування режимами роботи тягового електропостачання. Необхідність їх розробки зумовлена такими факторами:

— змінюється структура електричної системи, потужність генерації ДРГ визначається зовнішніми факторами (зокрема інтенсивністю сонячного випромінювання та вітрового потоку) і мало залежить

від режиму роботи електричної мережі, до якої вони під'єднані; — установки ДРГ можуть мати коливальний або переривчастий характер генерації потужності, що може призвести до сильних коливань потужності в системі та впливати на режими її роботи; — більшість ДРГ під'єднані до мережі за допомогою силових електронних перетворювачів (інверторів), які дуже чутливі до рівнів напруг.

Тому необхідно вирішувати низку питань: визначення впливу ДРГ на стабільність роботи тягових підстанцій та інших споживачів, що приєднані до шин тягової підстанції з урахуванням допустимих режимів роботи споживачів, розробка рекомендацій щодо особливостей приєднання такого типу генерації до електричних мереж залізниць, функціонування пристроїв релейного захисту та автоматики, забезпечення необхідного рівня надійності електропостачання споживачів з необхідними якісними характеристиками тощо.

► Підвищення якості напруги в тяговій мережі постійного струму.

Режим напруги в тяговій мережі, при відсутності експлуатаційних обмежень, визначає перевізну та пропускну здатність електрифікованої залізниці. Забезпечення необхідного рівня напруги у тягових мережах електрифікованих залізниць має здійснюватись через застосування необхідних технічних можливих заходів при розробці та виготовленні обладнання і комплектувальних виробів; проектуванням та побудовою системи тягового електропостачання на базі обґрунтованого вибору її конфігурації і параметрів та раціональних схем підключення до системи зовнішнього електропостачання.

Особливостями передачі електроенергії по тяговій мережі є зміна положення електрорухомого складу (ЕРС) і зміна режимів їх роботи, обмеження, що накладаються поїздами один на одного залежно від їх взаємного розташування, а також обмеження пов'язані, загалом, із забезпеченням перевізного процесу.

Одним з основних показників якості передачі електричної енергії в системі тягового електропостачання є рівень напруги на шинах тягової підстанції, а отже на струмоприймачах електровозів, який залежить не лише від зміни тягового навантаження, але від зміни навантаження районних споживачів і живлячої енергосистеми, а характер чинників, що впливають на напругу є нелінійним та нестаціонарним. Таким чином, рівень напруги, як показник якості, має розглядатися як деякий параметр, що оптимізує передачу і споживання електроенергії для ЕРС.

Оскільки графіки споживаного струму швидкісних поїздів, застосовуваних в Україні є «засекречені», попередні розрахунки для розробки структури удосконаленої СТЕ здійснювались на підставі експериментальних даних, отриманих при русі здвоєних великовагових поїздів. Використання нових, більш потужних електровозів або збільшення їх кількості чи секцій для пропуску поїздів великої маси, супроводжується значним зростанням потужності та струму, що споживається з тягової мережі. 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. При цьому, в режимі тяги, напруга на струмоприймачах виходила за межі допустимих значень (рис. 1).

Сучасний стан тягового електропостачання постійного струму характеризується зростаючим дефіцитом електричної енергії для забезпечення необхідного режиму напруги в тяговій мережі при впровадженні швидкісного та високошвидкісного руху. Використання наявних засобів підсилення в багатьох випадках не забезпечує необхідних енергетичних показників і є досить дорогим. Зростаючий дефіцит енергоресурсів ставить завдання дослідити можливість використання незалежних джерел електричної енергії для живлення пунктів підсилення тягової мережі (ПП).

Перевага живлення ПП від ДРГ полягає у відсутності необхідності

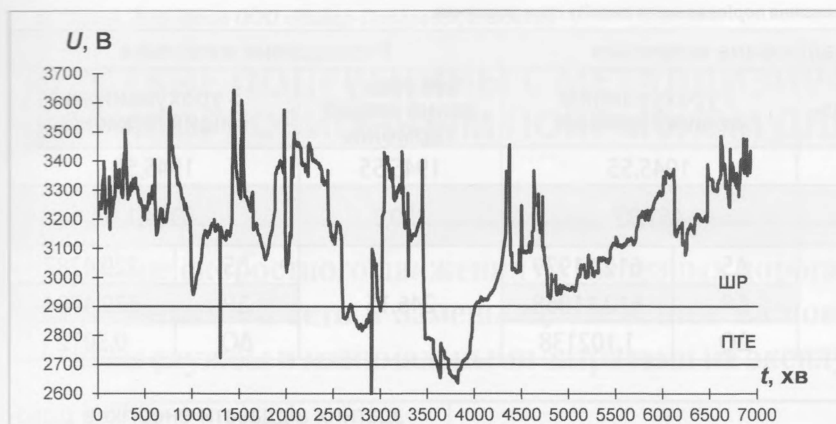


Рис. 1. Напряга на струмоприймачах в режимі тяги:
ШР — норма напруги для швидкісного руху; ПТЕ — норма напруги за ПТЕ

в монтажі додаткової живильної лінії від тягової підстанції і незалежності їх роботи від неї. До питань, які необхідно вирішити належать:

- тип джерела поновлюваної електричної енергії;
- компенсація впливу погодних умов на рівень генерованої енергії;
- схемотехніка, компоновання і елементна база;
- техніко-економічне обґрунтування їх застосування з прив'язкою до надійності забезпечення живлення тягового навантаження з необхідними енергетичними характеристиками.

Алгоритм вибору параметрів і структури електротехнічного комплексу з локальними джерелами електроенергії має базуватися на виявлених залежностях напруг на струмоприймачі і втратах потужності в елементах розподіленої мережі від параметрів електротехнічних пристроїв, які виконують генерацію, що забезпечує оптимальне значення цільової функції втрат потужності в різних режимах, та залежать від потужності впроваджених генераторів (підсилювальних пунктах).

Кожен підсилювальний пункт може керуватися на основі закону керування, який формується в реальному часі. Параметри цього закону визначаються значеннями координат та струму електрорухомого складу, який розташовується в міжпідстанційній зоні; необхідними рівнями генерації потужності та компенсації втрат напруги, що дає змогу оптимізувати режим напруги в тяговій мережі. Структурна схема

запропонованої СТЕ із застосуванням ДРГ зображено на рис. 2 (координати встановлення ПП, відповідно — 5, 10 та 15 км при відстані між тяговими підстанціями 20 км).

Необхідно зазначити, що кількість і потужність ПП має визначатись за двома критеріями: компенсації втрат напруги та забезпечення норми необхідної питомої потужності тягової мережі. За умовами організації руху поїздів при нормальному режимі руху, в залежності від довжин блок-діляниць, відстань між поїздами може складати 3,5–5 км, тому

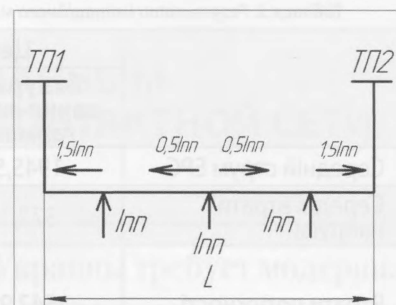


Рис. 2. Структурна схема живлення тягової мережі з трьома ПП:
ТП1, ТП2 — тягові підстанції; l_{pp1} , l_{pp2} , l_{pp3} — струми відповідно трьох підсилювальних пунктів;
L — довжина міжпідстанційної зони

в першому наближенні (розглянутий вище приклад на рис. 2) може бути прийнятий за основу для попередніх розрахунків, результати яких зведені в табл. 1 та зображені на рис. 3.

■ Забезпечення необхідного рівня питомої потужності

Кожен ПП має керуватися на основі закону, який формується у реальному часі. Вид цього закону визначається значенням координати та струму електрорухомого складу, який розташовується в міжпідстанційній

Таблиця 1. Результати розрахунків рівнів напруги

Варіант дослідження	Напряга на струмоприймачі, В				
	0 км	5 км	10 км	15 км	20 км
Розрахунок (без підсилення)	3300	3083	2661	2684	3300
Розрахунок (з підсиленням)	3300	3476	3204	3096	3300

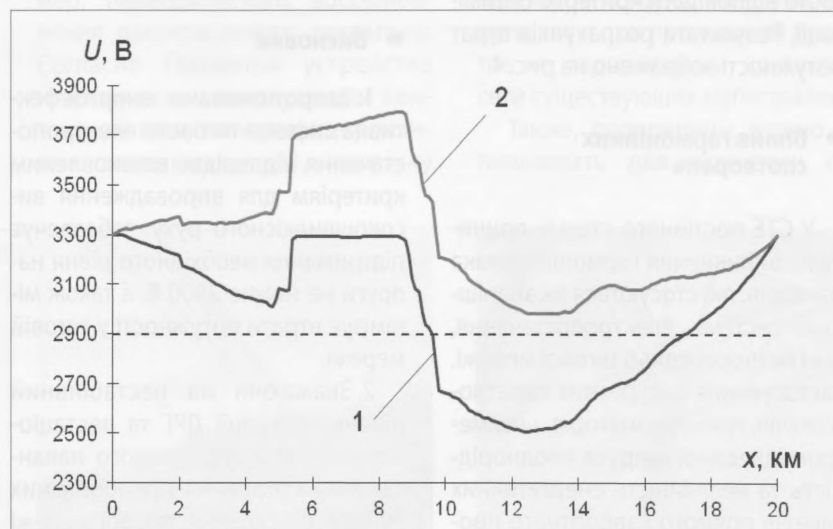


Рис. 3. Миттєві значення напруги на ділянці з двостороннім живленням:
1 — без підсилення, 2 — з ПП

Таблиця 2. Результати імітаційного моделювання порівняльного аналізу схем живлення

	Централізоване живлення		Розподілене живлення	
	Без урахування вищих гармонік	З урахуванням вищих гармонік	Без урахування вищих гармонік	З урахуванням вищих гармонік
Середній струм ЕРС	1945,55	1945,55	1945,55	1945,55
Середні втрати напруги	372,18	451,32	250,5	304,1
Втрати потужності	542,93	ΔS 612,11979	246,15	ΔS 329,4787
		ΔP 612,11968		ΔP 329,4784
		ΔQ 1,102138		ΔQ 0,5012

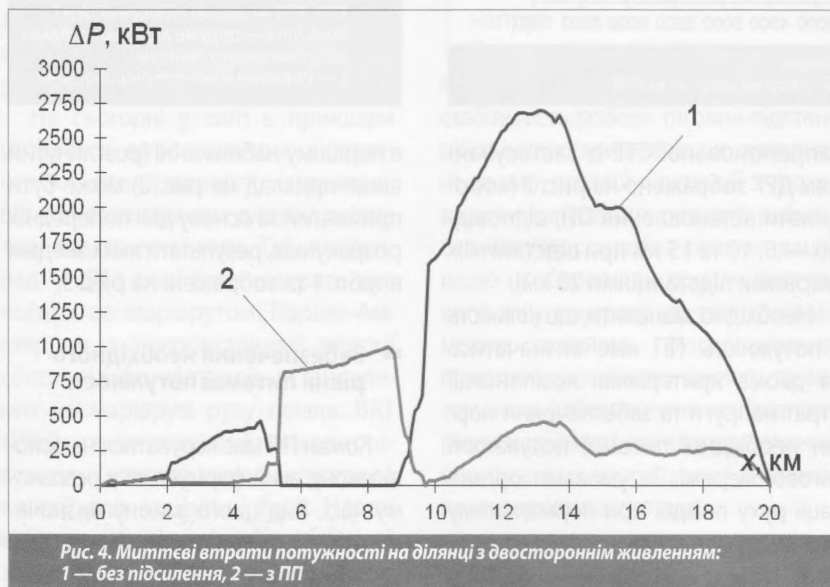


Рис. 4. Миттєві втрати потужності на ділянці з двостороннім живленням: 1 — без підсилення, 2 — з ПП

зоні. Як цільову функцію приймаємо втрати потужності ΔP у тяговій мережі, які необхідно мінімізувати. Таким чином, залежно від координати розташування поїзда, струми підсилювальних пунктів мають мати таке значення, щоб забезпечувався мінімум цільової функції ΔP , тобто відповідати критерію оптимізації. Результати розрахунків втрат потужності зображено на рис. 4.

Вплив гармонійних спотворень

У СТЕ постійного струму причинами виникнення гармонік є низка факторів, які стосуються як зовнішньої системи електропостачання, так і безпосередньо тягової мережі. Застосування дискретних перетворювачів, трансформаторів, несиметрія підведеної напруги, неоднорідність та нелінійність енергетичних каналів прямого і зворотного провідників, режими роботи ЕРС призводять до генерування небажаних

гармонійних складових. Застосування СТЕ розподіленого типу дає змогу зменшити рівні гармонійних спотворень у тяговій мережі та підвищити енергетичні показники використання електричної енергії. Результати попередніх розрахунків наведені в табл. 2.

Висновки

1. Запропонована енергоефективна система тягового електропостачання відповідає встановленим критеріям для впровадження високошвидкісного руху: забезпечує підтримання необхідного рівня напруги не нижче 2900 В, а також мінімізує втрати потужності у тяговій мережі.

2. Зважаючи на нестабільний рівень генерації ДРГ та нестаціонарний характер тягового навантаження створення пропонованих пунктів підсилення тягової мережі має передбачати застосування накопичувачів електричної енергії,

здатних віддавати енергію в різкозмінних режимах.

3. Для підвищення ефективності функціонування системи тягового електропостачання постійного струму з пунктами підсилення при наявності рекуперації, необхідно розробити закони керування режимами ПП у реальному часі в єдиній інтелектуальній системі тягового електропостачання.

Список літератури:

1. Аржанников Б. А. Концепция усиления системы тягового электропостачания постоянного тока 3,0 кВ : монография / Б. А. Аржанников, И. О. Набойченко. — Екатеринбург : УрГУПС, 2015. — 258 с.
2. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог: учебник / К. Г. Марквардт. — М.: Транспорт, 1982. — 528 с.
3. Бурков А. Т., Бурков С. А., Шарпилова М. А. Режимы движения и особенности тяговых расчетов при определении нагрузок на устройства электроснабжения высокоскоростных линий / Электрификация, инновационные технологии, скоростное и высокоскоростное движение на железнодорожном транспорте. Материалы VI Международного симпозиума 25 – 28 октября 2011. — Санкт-Петербург: ПГУПС, 2013. — С. 337–349
4. Сиченко В. Г. Интеграция солнечных электростанций у систему тягового электропостачання постійного струму. / В. Г. Сиченко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». — 2015. — № 12 (1121). — С. 364–368.