

В. Г. СИЧЕНКО, Є. М. КОСАРЕВ, П. В. ГУБСЬКИЙ (ДНУЗТ),
В. В. ЗАМАРУЄВ, В. В. ІВАХНО, Б. О. СТИСЛО (ХПІ)

Кафедра «Електропостачання залізниць» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, 49010 м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна 2, тел. +38(056)373-15-25, e-mail: elpostz@i.ua, kosarev@e.dit.edu.ua, peter.gybskiy@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0002-9533-2897, orcid.org/0000-0003-3574-7414, orcid.org/0000-0002-0216-7256

Кафедра «Промислова і біомедична електроніка» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», 61002 м. Харків, вул. Фрунзе 21, тел. +38(057) 707-60-44, e-mail: vyz1@ukr.net, v-ivakhno@ukr.net, bohdanstyslo@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ НАПРУГИ В СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Вступ

Визначення режиму напруги і оцінка його впливу на роботу електрорухомого складу і пристроїв електропостачання є одним з найбільш важливих завдань при побудові сучасної інтелектуальної системи тягового електропостачання. Від режиму напруги залежать такі параметри, як швидкість руху поїзда, зміни струму і тягового зусилля електровоза, можливість подолання інерційних підйомів, навантаження і робота окремих пристроїв електропостачання [1-3]. Режим роботи електрифікованих ділянок залежить від великої кількості взаємопов'язаних і взаємовпливаючих факторів. Насамперед, це 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 електровоза залежить від кваліфікації і досвіду машиніста, профілю ділянки, ваги поїзда, його складу і типу електровоза. 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. Робота ділянки у вимушеному режимі 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.

Впровадження швидкісного руху, збільшення вагових норм потягів обумовлює необхідність нарощування провізної здатності залізниць, але застосовувані системи тягового електропостачання постійного струму не завжди в змозі забезпечити передачу електроенергії необхідної потужності і високої якості для цих потягів. До числа основних обмежень відноситься зниження напруги на струмоприймачі електровоза нижче допустимого для нормальної експлуатації значення 2700 В (для швидкісного руху 2900 В) і нагрівання проводів контактної мережі, що сприяє втраті їх механічної міцності.

Метою роботи є аналіз режимів напруги та розробка рекомендацій щодо його покращення в системі тягового електропостачання постійного струму при впровадженні швидкісного та великовагового руху.

Дослідження режиму напруги на шинах тягових підстанцій

Одними з основних параметрів системи тягового електропостачання є число та потужність тягових підстанцій і відстань між ними. Повна встановлена потужність тягових підстанцій в основному складає 10÷20 МВт, але сучасний стан тягового електропостачання постійного струму характеризується зростаючим дефіцитом електричної енергії для забезпечення необхідного режиму напруги в тяговій мережі при впровадженні швидкісного руху. При цьому коефіцієнт використання режимної потужності та обладнання тягових підстанцій не перевищує 15 %. Це підтверджується дослідними вимірюваннями, які були проведені авторами на тягових підстанціях Придніпровської залізниці (табл. 1).

Рівень напруги на шинах тягової підстанції впливає на експлуатаційні характеристики функціонування електрифікованих залізниць та

залежить як від навантаження, так і від коливань напруги системи зовнішнього електропостачання. Вибіркові результати експерименталь-

них досліджень зміни напруги на шинах тягових підстанцій 3,3 кВ приведені на рис. 1 та рис. 2.

Таблиця 1

Результати дослідження завантаження тягових підстанцій

Тягова підстанція	Встановлена потужність P_B , кВт	Середня споживана потужність P_C , кВт	Коефіцієнт завантаження K_3 , %
ТП 1	20800	2868	13,7
ТП 2	20800	1080	5,2
ТП 3	19800	956	4,8
ТП 4	19800	422	2,1

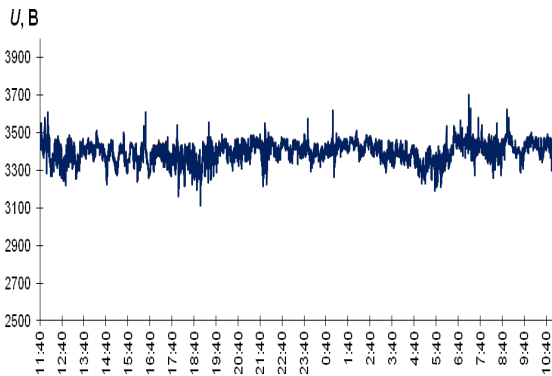


Рис. 1. Напруга на шинах 3,3 кВ тягової підстанції 1

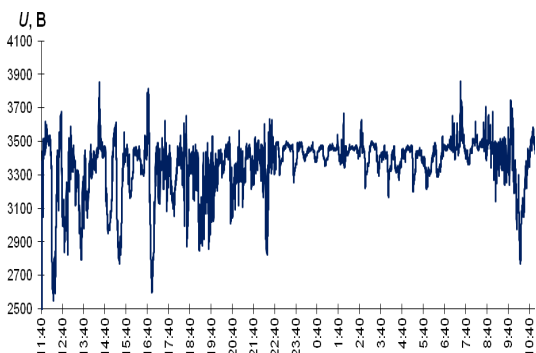


Рис. 2. Напруга на шинах 3,3 кВ тягової підстанції 2

Хоч режим напруги на шинах 3,3 кВ тягової підстанції і впливає на експлуатаційні характеристики функціонування електрифікованих залізниць, але різкозмінний характер напруги приводить до умовності застосування нормованих рівнів напруги [4]. Дослідженнями [5] роботи тягових допоміжних машин за умовами обмежень по зчепленню, за типом навантаження, по нагріванню обмоток, обмежень по потужних умовах на колекторі і по комутації під щітками рекомендуються тривала найбільша напруга 3,6 кВ і тривала найменша 2,8 кВ. Цей діапазон зміни напруг стосовно регламентованого Правилами технічної експлуатації залізниць [4] $3,85 \pm 2,7$ кВ хоча й зменшений, але від номінальної напруги на струмоприймачі електровоза 3 кВ відрізняється на +20 % і -6,67 %.

Для забезпечення швидкісного руху нижній діапазон ще менший: - 3,33 %, що ставить питання про необхідність керування режимом напруги в тяговій мережі.

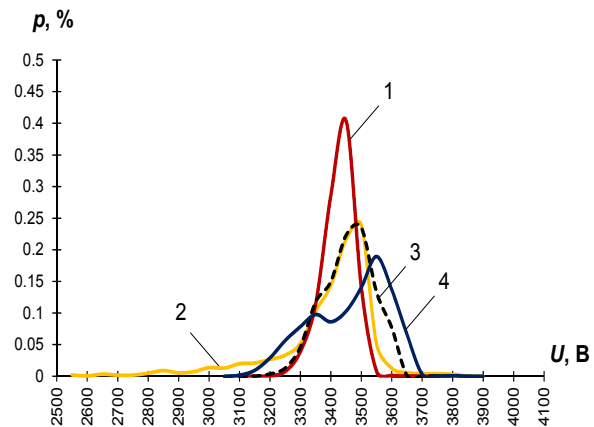


Рис. 1. Емпіричні розподіли напруги на шинах тягових підстанцій

З аналізу емпіричних розподілів напруги на шинах тягових підстанцій (рис. 3) можна зробити висновок, що рівні напруги на шинах дослідних тягових підстанцій мають широкий розкид значень та, при відсутності пристроїв регулювання напруги, забезпечення нормованої якості напруги на струмоприймачах ЕРС – неможливе. Числові характеристики режиму напруги в різних режимах роботи тягових підстанцій приведені в таблиці 2. Їх аналіз показує, що на шинах 3,3 кВ напруга має різкозмінний характер, а максимальні коливання напруги сягають значення 1300 В (табл. 2).

Дослідження режиму напруги на струмоприймачах електрорухомого складу

Координація роботи різних служб електрифікованих залізниць здійснюється за допомогою графіка руху, який визначає час ходу поїздів, обертання локомотивів, роботу станцій і т. і. Тому основна вимога до системи електропостачання зводиться до забезпечення нормального режиму напруги на струмоприймачах, який

би гарантував досягнення заданої швидкості, обумовленої графіком руху та забезпечував надійну та справну роботу ЕРС [1-6].

Використання нових, більш потужних електро-возів 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).

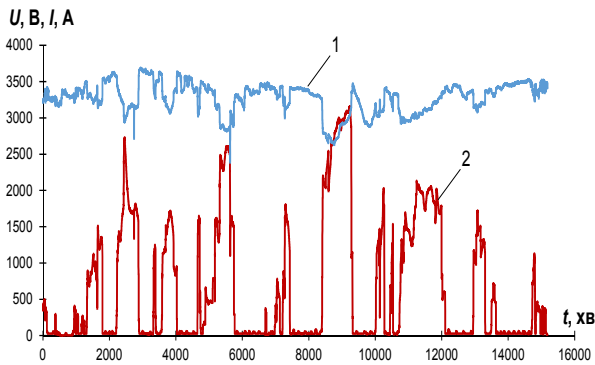


Рис. 4. Реалізація струму і напруги здвоєного поїзда на дослідній ділянці: 1 – напруга на струмоприймачах; 2 – споживаний струм

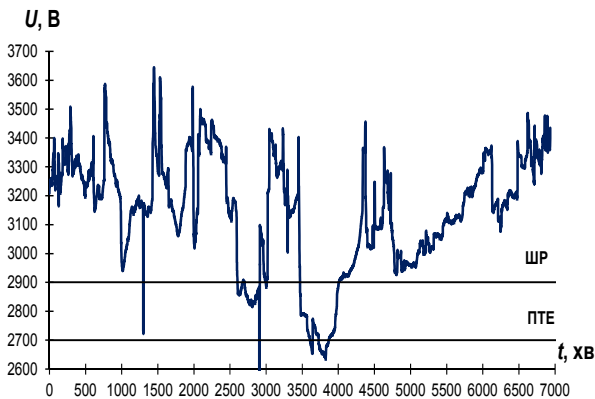


Рис. 5. Напруга на струмоприймачах в режимі тяги: ШР – норма напруги для швидкісного руху; ПТЕ – норма напруги за ПТЕ

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.

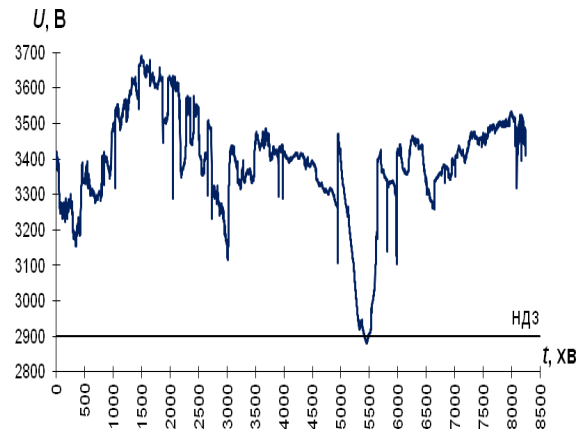


Рис. 6. Напруга на струмоприймачах в режимі вибігу

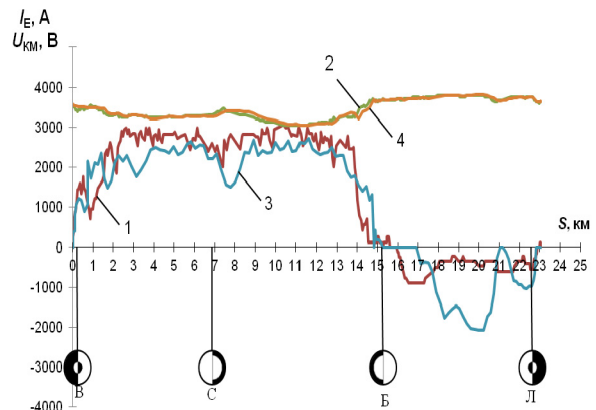


Рис. 7. Реалізація струму і напруги здвоєного поїзда на дослідній ділянці: 1, 2 – відповідно струм і напруга електровоза 2EC10; 3, 4 – відповідно струм і напруга електровоза 2EC6

На Львівській залізниці на ділянці Л – В струм двох сучасних електровозів 2EC10 та 2EC6 при масі поїзда 3800 т сягав 5,5 кА, але значення напруги на струмоприймачах не було нижчим 3000 В¹ (рис. 7). Дотримання нормального режиму напруги було забезпечене за рахунок незначної відстані між тяговими підстанціями та значним збільшенням сумарного перерізу контактної мережі.

При проведенні експериментальних досліджень на ділянці З-С2 Придніпровської залізниці значне споживання тягового струму електровозом призвело до значного зниження напруги на струмоприймачеві. Мали місце значення рівнів напруги, як в режимі тяги (рис. 8), так і в режимі вибігу (рис. 9), які не відповідали встановленим нормам. Обробка дослідних даних показала, що крива щільності розподілу імовірностей значень напруги на струмоприймачі електровозу (рис. 10) має двомодальний характер, представлений суперпозицією двох законів, близьких до нормального. Це пояснюється чергуванням двох режимів роботи ЕРС – тяги та вибігу. При аналізі

¹ Дані надано доц. каф «ЕРС» ДНУЗТ Арпулем С. В.

змін напруги на струмоприймачах електровозів доцільно розглядати ці два режими окремо (рис. 11, 12). Такий підхід дає можливість оцінити статистичні характеристики напруги без їх взаємного впливу.

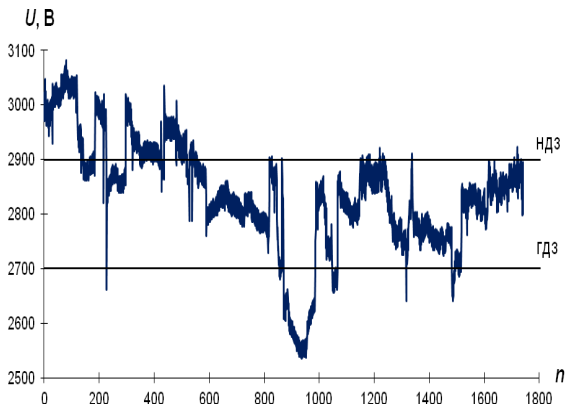


Рис. 8. Напруга на струмоприймачі в режимі тяги

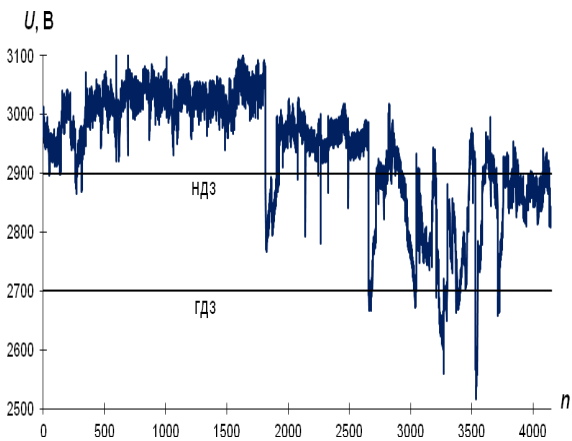


Рис. 9. Напруга на струмоприймачі в режимі вибігу

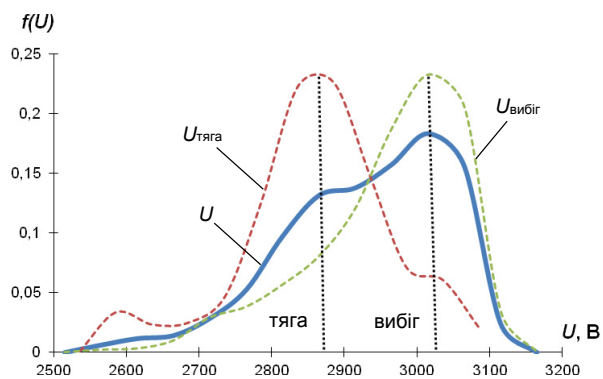


Рис. 10. Емпіричні функції розподілу імовірностей напруги на струмоприймачі

Функція розподілу імовірностей напруги на струмоприймачі в режимі тяги має тримодальний характер, що є результатом перегрупування тягових двигунів електровозу в з'єднання «С», «СП» та «П» (рис. 11). Чітке вираження мод в функції розподілу може свідчити про від-

сутність іншого тягового навантаження на ділянці, окрім дослідного поїзда, або незначний вплив інших споживачів на рівень напруги на струмоприймачеві даного електровоза.

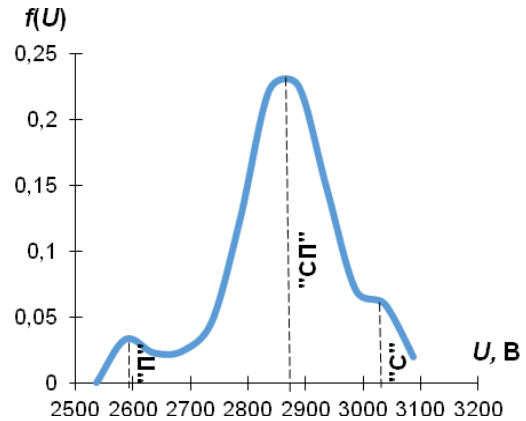


Рис. 11. Емпірична функція розподілу імовірностей напруги на струмоприймачі в режимі тяги

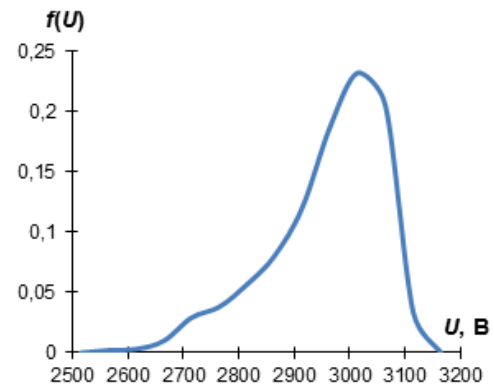


Рис. 12. Емпірична функція розподілу імовірностей напруги на струмоприймачі в режимі вибігу

Таким чином, повертаючись до графіка напруги в режимі вибігу (рис. 9), можна сказати, що в цьому випадку недотримання нормованих значень відбувається за рахунок коливань напруги на шинах тягових підстанцій.

Числові характеристики режиму напруги в різних режимах роботи електровозу приведені в таблиці 2. Їх аналіз 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 високошвидкісного транспорту [4]. При цьому для забезпечення більш високих енергетичних показників функціонування ЕРС необхідно ставити задачу зменшення діапазону змін напруги на струмоприймачах протягом всього часу руху поїзда по перегону.

Числові характеристики режимів напруги

Показник	Шини 3,3 кВ		Струмоприймач ЕРС			Рекуперація
	ТП 1	ТП 2	Загалом	Тяга	Вибіг	Напруга
$M(U)$	3399.38	3363.21	2906.11	2835.91	2935.63	3388,039
$M_o(U)$	3427.10	3343.39	3013.00	2845.00	3036.00	3418,466
$M_e(U)$	3407.11	3411.31	2923.50	2840.00	2958.00	3606,605
$D(U)$	2695.26	26836.09	12712.14864	10767.09	10633.96	222,2468
$s(U)$	51.92	163.82	112.7482	103.7646	103.1211	49393,66
$As(U)$	-0.62	-1.71	-0.70	-0.46	-0.98	-0,66284
$Ex(U)$	0.87	3.94	0.10	0.60	0.58	-0,26951
$\min(U)$	3113.52	2550.97	2516.00	2536.00	2516.00	2770,48
$\max(U)$	3700.35	3857.84	3134.00	3081.00	3134.00	3947,699
$M(\Delta U)$	99.4	63.2	-93.9	-164	-64.4	388
$U(0,95)$	3485.24	3530.52	3056.84	3011.21	3061.17	3294.36

Дослідження режиму напруги в системі тягового електропостачання при рекуперації енергії

Для аналізу режимів напруги в режимі рекуперації були проведені синхронізовані вимірювання одночасно на двох суміжних ТП і на електровозі, що рухався по ділянці між ними в режимі рекуперації (інших споживачів на дослідній ділянці не було). Для дослідження була обрана двоколійна міжпідстанційна зона С–В Львівської залізниці, оскільки в напрямку ст. В на ділянці ухил (спуск) сягає 28,4 ‰ і з метою обмеження швидкості поїздів є обов'язковим використання електричного гальмування (рис. 13).

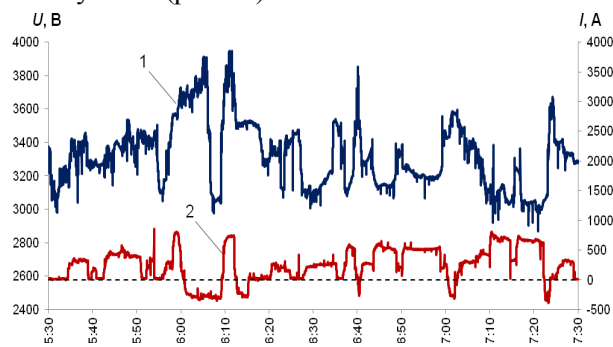


Рис. 13. Фрагмент параметрів електроспоживання електровоза ВЛ11М на ділянці К–С–В:
1 – напруга; 2 – струм

Аналіз отриманих результатів показав, що для нормально встановленої схеми живлення режим напруги в тяговій мережі відповідав встановленим вимогам. Мінімальне значення напруги для двосторонньої схеми складало 2770 В у режимі тяги при загальному струмі електровозу 1220 А. Найвище значення напруги на струмоприймачі зафіксоване в режимі рекуперації, яке складає 3947,7 В при загальному струмі рекуперації електровозу 760 А.

Необхідно зазначити, що такі рівні напруги забезпечуються незначною відстанню між тяговими підстанціями та значним перерізом контактної мережі.

Розвиток підходів до поліпшення режиму напруги в тяговій мережі

На сьогоднішній день для поліпшення режиму напруги можуть застосовуватися різні способи, які мають різні схемні реалізації [4-5]. В Україні для покращення режиму напруги застосовується тільки установка пунктів паралельного з'єднання і збільшення перерізу дровів контактної мережі, а регульовальні можливості управління режимами напруги обмежуються застосуванням пристроїв РПН на тягових підстанціях. У реальних умовах експлуатації СТЕ це призводить до неоптимального функціонування тягової мережі [7]. На сьогоднішній день, за участі авторів, пропонуються різні варіанти удосконалених схемних рішень для поліпшення режиму напруги в тяговій мережі, основою яких є застосування розподіленої системи тягового електропостачання [4, 6-8].

Нині пророблено декілька варіантів побудови таких систем, наприклад, розподіленої системи тягового електропостачання із застосуванням одноагрегатних тягових підстанцій, основою яких є застосування перетворювача ПА-5200 [9]. В цій системі здійснюється рівномірний розподіл агрегатної потужності по довжині електрифікованої ділянки. При проведенні оціночних розрахунків для обґрунтування доцільності цієї схеми приймалися наступні припущення: електровози споживають постійний і незмінний за величиною струм, поїзди рухаються рівномірно із постійною встановленою швидкістю 160 км/год, не враховується час на розгін та гальмування, загальний час ходу всіх

поїздів розрахунковою зоною становить 15 хв, напруга на шинах тягових підстанцій є сталою та незмінною за величиною у часі, внутрішні опори тягових підстанцій приймаються рівними. Результати порівняльного розрахунку схем централізованого та розподіленого живлення тягової мережі показують, що втрати електроенергії при реалізації заданого графіку руху поїздів при застосуванні схеми розподіленого живлення склали 104,21 кВт·год, що на 35,9 % менше від втрат електроенергії при централізованому живленні.

Регулювання споживаної потужності при цьому здійснюється у єдиній системі розподіленого керування активним інтелектуальним обладнанням, здатним адаптивно змінювати характеристики передачі, перетворення та споживання електроенергії і оптимізувати режим функціонування системи тягового електропостачання при завданих обсягах перевізної роботи та в умовах швидкісного руху.

Необхідно зазначити, що ефективність системи розподіленого типу, особливо при застосуванні альтернативних джерел електричної енергії, буде значно вищою при застосуванні накопичувачів електричної енергії. Використання накопичувачів електричної енергії (НЕ) в СТЕ дозволяє частково або повністю усунути нерівномірності енергоспоживання СТЕ, приймати надлишкову енергію рекуперації, підтримувати на певному рівні потужність тягової підстанції під час експлуатації, 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 ТП [10-15].

На сьогоднішній день в пристроях СТЕ пропонуються до використання різні типи накопичувачів, але доцільність застосування того чи іншого типу накопичувача до цього часу не обґрунтована в повній мірі. Необхідно вказати, що за результатами експериментальних досліджень потужність НЕ для компенсації втрат напруги має бути 0,5÷1,5 МВт, в залежності від рівня споживаного струму та координати. Для застосування в системі розподіленого живлення НЕ повинен функціонувати в умовах різкої зміни навантаження та компенсувати коливання напруги при мінімальному часі відновлення. Як показує аналіз доступних джерел, на сьогоднішній день найбільш перспективним напрямком є застосування батарейних систем накопичення

електричної енергії (BESS), дозволяючих зменшити коливання споживаної потужності і рознести в часі фази накопичення та віддачі електроенергії [16].

Незважаючи на широку номенклатуру пропонуєваних акумуляторних накопичувачів електричної енергії, специфіка використання їх в енергетиці накладає достатньо серйозні обмеження на вибір типу акумулятора:

- висока енергоємність;
- термін служби акумуляторної батареї;
- відсутність «ефекту пам'яті»;
- допустимість режимів швидкого заряду батареї;
- здатність працювати в режимі великих струмових перевантажень;
- безпека використання;
- низька вартість.

На жаль, жоден з існуючих на сьогоднішній день типів електрохімічних батарей (ЕХБ) не відповідає повністю таким вимогам: не зважаючи на велику поширеність, свинцево-кислотні акумулятори хоча і дозволяють використовувати їх в режимі великих струмових перевантажень та є досить дешевими, не допускають швидкісних режимів заряду/розряду, мають низьку енергоємність, є екологічно небезпечними, і вимагають спеціально обладнаних приміщень. NiCd та NiMH акумулятори допускають роботу при великих струмових перевантаженнях, швидкісний режим заряду/розряду, але мають ефект пам'яті (особливо, NiCd) і досить великий струм саморозряду. Батареї LiCoO₂ та LiMn₂O₄ мають високі енергетичні показники, великий термін служби, повністю позбавлені ефекту пам'яті, мають низький рівень саморозряду, допускають великі струмові перевантаження і швидкісні режими заряду/розряду, є екологічно безпечними, мають досить великий термін служби, але мають високу вартість і є вибухонебезпечними при неправильному режимі експлуатації. LiFePO₄ батареї мають всі позитивні якості літійових батарей (висока енергоємність, наявність режимів швидкого заряду/розряду, відсутність ефекту пам'яті, не вимагають періодичного обслуговування), але при цьому є вибухобезпечними, і мають набагато більший термін служби. Відносно недавня поява (2003 р.) акумуляторів цього типу пояснює їх високу вартість. У таблиці 3 наведено характеристики найбільш поширених типів ЕХБ, які можуть використовуватись в якості НЕ в СТЕ.

Експериментальні дослідження батареї LiFePO₄ відображають вплив паразитних елементів в еквівалентній схемі. Їх наявність суттєво впливає на частотні характеристики батареї.

Характеристики найбільш поширених типів ЕХБ

Тип батареї	Lead-acid	NiCad	NiMH	LiCoO ₂	LiMn ₂ O ₄	LiFePO ₄
Номінальна напруга, В	2	1,2	1,2	3,7	3,7	3,3
Відносна вартість	1	2	2,4	4	6	>10
Безпечність використання	Висока	Висока	Висока	Низька	Середня	Висока
Екологічність використання	Низька	Низька	Висока	Висока	Висока	Висока
Ефект пам'яті	-	+	+	-	-	-
Енергоефективність	60%	75%	70%	90%	90%	95%
Час життя (циклів)	400	500	500	>500	>500	>2000
Час зарядження, год	12	1.5	4	2-4	2-4	<2
Саморозрядження, % / міс.	20	30	35	10	10	8

На рис. 14 показано осцилограми перехідного процесу при стрибкоподібній зміні струму від нуля до 120 А.

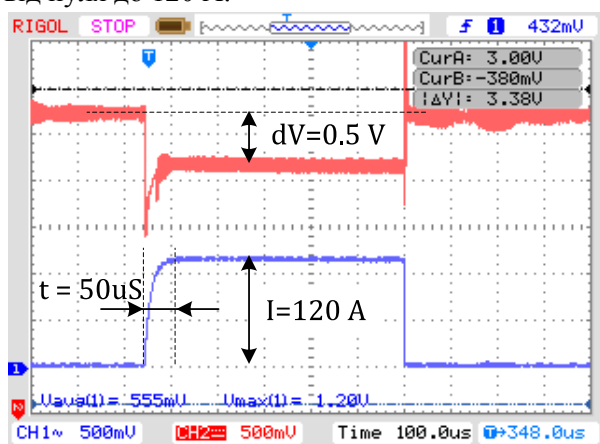


Рис. 14. Результат експериментального дослідження батареї

З результатів експерименту видно що постійна часу електрохімічних процесів в батареї складає близько 10 мкс (тривалість перехідного процесу $t = 4,6\tau = 50$ мкс). Для відносно низькочастотних процесів, що протікають у системі енергопостачання залізниці, даний тип батареї можна вважати ідеальним джерелом енергії.

На підставі проведеного авторами аналізу можливості застосування різних типів акумуляторних накопичувачів у складі BESS, перевагу слід віддати LiFePO₄ батареям: вони мають найкращі енергетичні характеристики при задовільних частотних характеристиках. Однак, їх використання накладає серйозні вимоги до системи керування батареєю. Для забезпечення нормальної роботи акумуляторної батареї, в процесі її експлуатації потрібно постійно відслідковувати рівень заряду кожного з елементів батареї, запобігаючи його виходу за допустимі межі. Крім того, необхідно вирівнювати значення напруги кожного з послідовно включених елементів між собою (балансувати рівень заряду).

Висновки

В результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що режими напруги в системі тягового електропостачання постійного струму не дозволяють в повній мірі забезпечити необхідні умови для впровадження швидкісного руху на існуючих лініях. Рівні напруги, як на шинах тягового навантаження, так і в тяговій мережі мають значний діапазон коливань, який визначається різними факторами: як впливом змін режимів роботи системи зовнішнього електропостачання, так і режимами роботи тягової мережі. При цьому, при наявності значного резерву встановленої потужності, на тягових підстанціях України відсутні засоби регулювання режимів напруги в тяговій мережі. Найбільш часто поліпшення режимів напруги виконується за рахунок тривіальних мало затратних заходів, що недостатньо при збільшенні тягових навантажень, виникаючих при збільшенні швидкостей руху. Однією з необхідних умов при цьому є необхідність звуження діапазону змін напруги на струмоприймачах е. р. с. та підвищення ефективності використання енергії.

Для вирішення поставленого завдання авторами пропонується використання схемотехнічних рішень системи тягового електропостачання на основі розподіленого живлення. Їх застосування дозволяє зменшити діапазон зміни напруги в тяговій мережі та підвищити економічні показники функціонування системи тягового електропостачання. Встановлення необхідного рівня звуження діапазону змін напруги для швидкісного руху потребує проведення додаткових досліджень.

На основі проведеного аналізу показано, що суттєвого покращення режиму напруги в тяговій мережі можна досягти використанням батарейних систем накопичення електричної енергії, дозволяючих зменшити коливання споживаної потужності і рознести в часі фази накопичення та віддачі електроенергії. При цьому необхідно вирішити питання розробки системи керування режимами роботи пропонованих накопичувачів електричної енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
2. Rojek A. Traction power supply in 3 kV DC system. / A. Rojek // Warszawa: KOW media&marketing Sp. Z o.o., 2012. – 250 s.
3. Shelag A. Influence of voltage in 3 kV DC cafenary on traction and energy paramers of the supplied vehieles / A. Shelag // Radom: Spatium, 2013. – 158 s.
4. Сиченко, В. Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць / В.Г. Сиченко, Ю.Л. Сасенко, Д.О. Босий; Дн-вськ. : «Стандарт-Сервіс», 2015. - 344 с.
5. Аржанников, Б. А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока : монография / Б. А. Аржанников. // – Екатеринбург : УрГУПС, 2010. – 176 с.
6. Косарев, С. М. Регулювання напруги в контактній мережі електрифікованих залізниць постійного струму / С. М. Косарев // Електрифікація транспорту. – 2015. – №9, с. 37-43.
7. V. Sychenko. Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current. / V. Sychenko, D. Bosiy, E. Kosarev // The archives of transport. Volume 35, Issue 3, 2015, p. 63-70.
8. Сиченко В. Г. Оптимізація керування режимом напруги в тяговій мережі постійного струму з пунктами підсилення. / В. Г. Сиченко, Д.О. Босий, С. М. Косарев// Вісник Вінницького політехнічного інституту. № 6 – 2015, - с. 95-103.
9. Гончаров Ю. П. Стабілізуючі тягові перетворювальні агрегати з системою активної фільтрації для електропостачання тягових мереж постійного струму швидкісних магістралей. / Ю.П. Гончаров, М. В. Панасенко, В. В. Замаруєв та ін.// Залізничний транспорт України, – № 6 – 2011, с. 26-31.
10. Добровольскис Т. П. Обеспечение стабильного напряжения в контактной сети при пропуске скоростных тяжеловесных поездов. / Добровольскис Т. П., Алексеев Е. Н.//Токосъем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении на постоянном токе.: Сб. научн. тр. ОАО ВНИИЖТ. – М.: Интекст, 2010. с. 184-187.
11. Заруцкая Т. А. Исследование эффективности применения сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии на тяговой подстанции постоянного тока. Специальность 05.22.07 - «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: автореф. дис. канд. техн. наук/ Заруцкая, - Ростов-на-Дону, 2004. – 21 с.
12. Пунынин, В.Н. Условия эффективного использования емкостного накопителя энергии в системах тягового электроснабжения железных дорог/ В.Н. Пунынин, В.Л.Никитин // Электричество, 1993, № 1, - С. 52-58.
13. Пунынин В.Н. Разработка энергосберегающих систем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока 3,3 кВ с использованием

REFERENCES

1. Markvardt K. G. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Electricity electric-infected railways]. Moscow, Transport Publ., 1982. 528 p.
2. Rojek A. Traction power supply in 3 kV DC system. / A. Rojek // Warszawa: KOW media&marketing Sp. Z o.o., 2012. – 250 p.
3. Shelag A. Influence of voltage in 3 kV DC cafenary on traction and energy paramers of the supplied vehieles / A. Shelag // Radom: Spatium, 2013. – 158 p.
4. Sychenko V.G. Quality of electric energy in the traction network of electrified railways / V.G. Sychenko, J.L. Saenko, D.O. Bosiy; Day-Su. : "Standard Service", 2015. - 344 p.
5. Arzhannikov B. A. *Sistema upravlyaemogo elektrosnabzheniya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog postoyannogo toka : monografiya* [Managed system DC power supply of electrified railways: monograph]. Ekaterinburg, UrGUPS Publ., 2010. 176 p.
6. Kosarjev, Je. M. *Reguljuvannja naprugi v kontaktnej mrezi elektrifikovanih zaliznits' postijnogo strumu* [Adjusting the voltage in the contact network of the electrified railways DC]. *Elektrifikatsija transport - Electrification of transport*, 2015. no. 9, pp. 37-43.
7. V. Sychenko. Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current. / V. Sychenko, D. Bosiy, E. Kosarev // The archives of transport. Volume 35, Issue 3, 2015, pp. 63-70.
8. Sychenko V. G., Bosy D.O., Kosarjev Je. M. *Optyimizacija keruvannja rezhymom naprugi v tjavovij mrezi postijnogo strumu z punktamy pidsylenija* [Management optimization mode voltage in the power network of DC gain points]. *Visnyk Vinnyc'kogo politehnicznego instytutu - Herald of Vinnitsa Polytechnic Institute*, 2015, no 6, pp. 95-103.
9. Goncharov Ju.P., Panasenko M. V., Zamarujev V. V. ect. *Stabilizujuchi tjavovi peretvorjuval'ni agregaty z systemoju aktyvnoi' fil'tracii' dlja elektropostachannja tjavovyh mrezh postijnogo strumu shvydkisnyh magistralej* [Stabilizing Traction converting units with active filtration system for traction power supply networks DC highways]. *Zaliznychnyj transport Ukrainy - Railway transport of Ukraine*, 2011, no 6, pp. 26–31.
10. Dobvol'skis T. P., Alekseev E. N. *Obespechenie stabil'nogo naprjazhenija v kontaktoej seti pri propuske skorostnyh tjazhelovesnyh poezdov* [Ensuring a stable voltage in the contact network when the pass-sko-speed heavy trains]. *Tokos'em i tjavovoe jelektrosnabzhenie pri vysokoskorostnom dvizhenii na postojannom toke.: Cb. nauchn. tr. OAO VNIIZhT* [Current collection and traction power supply during high-speed driving at a constant current]. Moscow Intekst, 2010, pp. 184-187.
11. Zaruckaja T. A. *Issledovanie jeffektivnosti primenenija sverhprovodnikovogo induktivnogo nako-pitelja jenerгии na tjavovoj podstancii postojannogo toka*. Avtoreferat Diss. [Study of the effectiveness of application sverhprovodnykovoho ynduktyvnoho Disk Drive energy to traction substations constantly current. Author`s abstract.]. Rostov-on-Don, 2004. 21 p.

накопителей энергии. Часть II Имитационная модель системы тягового электроснабжения с накопителями энергии/ В.Н. Пунынин, М.В. Шевлюгин // Сборник научных трудов «Фундаментальные и поисковые научно-исследовательские работы в области железнодорожного транспорта 1998 г.». Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ), Москва, 1999, вып. 921, с. 14-22.

14. Феоктистов В.П. Повышение тягово-энергетической эффективности транспортных систем при помощи накопителей энергии/ В.П. Феоктистов, М. Павелчик // Транспорт, 1999, № 12, с. 21-26.

15. Reiner K. Einsatzmöglichkeiten für Energiespeicher im elektrischen Bahnantrieb. // Elektrische Bahnen, vol. 91, 1993, iss. 10, pp. 331-335.

16. Update: Ionex Has a 1 MW Battery Ready for the Grid, EPRI issues ESS RFI // Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.greentechmedia.com/articles/read/ionex-has-a-1-mw-battery-ready-for-the-grid>

Надійшла до друку 06.04.2016.

12. Punynin V.N., Nikitin V.L. *Usloviya jefektivnogo ispol'zovanija emkostnogo nakopitelja jenerгии v sistemah t'jagovogo jelektrosnabzhenija zheleznyh dorog* [Terms of the effective use of capacitive energy storage systems to traction power supply of railways]. *Jel-ektrichestvo – Electricity*, 1993, no 1, pp. 52-58.

13. Punynin V.N., Shevlyuhyn M. V. *Razrabotka enerhosberehayushchykh system tyahovoho elektrosnabzheniya zheleznykh doroh postoyannoho toka 3,3 kV s yspol'zovanyem nakopyteley enerhyu. Chast' II Ymytatsyonnaya model' systemy tyahovoho elektrosnabzheniya s nakopytelyamy enerhyu* [Development of energy-saving traction systems railway power supply DC 3.3 kV using energy storage. Part II Simulation model of traction power supply system with energy storage] *Sbornyk nauchnykh trudov «Fundamental'nye y poyskovye nauchno-yssledovatel'skye raboty v oblasti zheleznodorozhnoho transporta 1998 h.»* [Collection of scientific works "Fundamental and search research work in the field of railway transport in 1998".] 1999, iss. 921, pp. 14-22.

14. Feoktistov V.P., Pavelchik M. *Povyshenie t'jago-voenergeticheskoy jefektivnosti transportnyh sistem pri pomoshhi nakopitelej jenerгии* [Increased traction and energy efficiency transport systems using energy storage]. *Transport – Transport*, 1999, no 12, pp. 21-26.

15. Reiner K. Einsatzmöglichkeiten für Energiespeicher im elektrischen Bahnantrieb. // Elektrische Bahnen, vol. 91, 1993, iss. 10, pp. 331-335.

16. Update: Ionex Has a 1 MW Battery Ready for the Grid, EPRI issues ESS RFI, Electronic resource. Access mode <http://www.greentechmedia.com/articles/read/ionex-has-a-1-mw-battery-ready-for-the-grid>

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Панасенко М. В.*

Режим напруги в тяговій мережі залежить від багатьох факторів та визначає експлуатаційні характеристики електрифікованої ділянки. Проведеними експериментальними дослідженнями встановлено, що рівні напруги, як на шинах тягових підстанцій, так і на струмоприймачах електровозів, коливаються в значних межах і перевищують нормовані показники, встановлені для швидкісного руху. Для підвищення енергетичної ефективності функціонування системи тягового електропостачання постійного струму при швидкісному русі та зменшення коливань напруги авторами запропоновано застосування у розподіленій системі живлення тягової мережі батарейних систем накопичення електричної енергії, побудованих на сучасних літєвих батареях.

Ключові слова: система тягового електропостачання, постійний струм, режим напруги, розподілена система живлення, накопичувач електричної енергії.

УДК 621.331.3

В. Г. СЫЧЕНКО, Е. Н. КОСАРЕВ, П. В. ГУБСКИЙ (ДНУЖТ),
В. В. ЗАМАРУЕВ, В. В. ИВАХНО, Б. А. СТЫСЛО (ХПИ)

Кафедра «Электроснабжение железных дорог» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени акад. В. Лазаряна, 49010 г. Днепропетровськ, ул. Лазаряна 2, тел. +38(056)373-15-25, e-mail: elpostz@i.ua, kosarev@e.dit.edu.ua, peter.qybskiy@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0002-9533-2897, orcid.org/0000-0003-3574-7414, orcid.org/0000-0002-0216-7256

Кафедра «Промышленная и биомедицинская электроника» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», 61002 г. Харьков, ул. Фрунзе 21, тел. +38(057) 707-60-44, e-mail: vvz1@ukr.net, v-ivakhno@ukr.net, bohdanstyslo@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Режим напряжения в тяговой сети зависит от многих факторов и определяет эксплуатационные характеристики электрифицированного участка. Проведенными экспериментальными исследованиями установлено, что уровни напряжения, как на шинах тяговых подстанций, так и на токоприемниках электровозов, колеблются в значительных пределах и превышают нормированные показатели, установленные для скоростного движения. Для повышения энергетической эффективности функционирования системы тягового электроснабжения постоянного тока при скоростном движении и уменьшения колебаний напряжения авторами предложено применение в распределенной системе питания тяговой сети батарейных систем накопления электрической энергии, построенных на современных литиевых батареях.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, постоянный ток, режим напряжения, распределенная система питания, накопитель электрической энергии.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Панасенко Н. В.*

UDC 621.331.3

V. G. SYCHENKO, YE. M. KOSARIEV, P. V. GUBSKIY (DNURT),
V. V. ZAMARUEV, V. V. IVAKHNO, B. A. STYSLO (KhPI)

Department "Railways power supply", Dnipropetrovsk national University of railway transport named after Acad. V. Lazaryan, 49010, Dnipropetrovsk, 2 Lazaryana str., tel. +38(056)373-15-25 e-mail: elpostz@i.ua, kosarev@e.diit.edu.ua, peter.gybskiy@gmail.com. ORCID: orcid.org/0000-0002-9533-2897, orcid.org/0000-0003-3574-7414, orcid.org/0000-0002-0216-7256

Department "Industrial and biomedical electronics», National technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 61002, Kharkiv, 21 Frunze str., tel. +38(057) 707-60-44 e-mail: vvz1@ukr.net, v-ivakhno@ukr.net, bohdanstyslo@gmail.com

RESEARCH THE VOLTAGE MODE OF SYSTEM DC TRACTION POWER SUPPLY

The voltage mode of traction network depends on many factors and determines the operating characteristics of electrified section. Experimental studies have established that the voltage levels as on buses of traction substations, and on the current collectors of electric locomotives, vary considerably and exceed the normalized indicators established for high-speed traffic. To improve the energy efficiency of the system, the traction power direct current at high-speed motion and reduce the voltage fluctuations, the authors propose the use in a distributed power supply system traction network battery systems store electrical energy built on the modern lithium batteries.

Keywords: traction power supply system, DC, voltage mode, distributed power supply system, electricity storage.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Panasenko M. V.*