

**В. В. ЗАМАРУЄВ**, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»;

**Б. О. СТИСЛО**, аспір., НТУ «ХПІ»;

**Є. М. КОСАРЕВ**, аспір., Дніпровський національний університет залізничного транспорту.

## **ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ**

**Вступ.** Залізничний транспорт є базовою галуззю національної економіки та основою її транспортної системи, забезпечує понад дві третини загального вантажо- та пасажирообігу [1] і є однією з найбільш енергоємних галузей. За природом споживання енергоносіїв в 2010-2015 роках транспортний сектор України посів друге місце після промисловості і в загальному енергетичному балансі має питому енергоємність близько 25...30 %. В загальнодержавному балансі електроспоживання залізниці України посідають 4 місце за енергоємністю виробництва. Більше 80 % енерговитрат електрифікованого транспорту припадає на електричну тягу. У собівартості таких перевезень енергетична складова сьогодні оцінюється на рівні 21...25 % і має тенденцію до зростання. Зниження цього показника потребує розвитку інноваційних енергозберігаючих технологій та безпосередньо пов'язано з реалізацією програми сталого розвитку «Україна – 2020» [2].

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 для цих потягів електричної енергії необхідної потужності і високої якості. 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 призводить до втраті їх механічної міцності. [3].

Підвищення енергоефективності та зниження енергоємності залізничної галузі згідно з [4] можливе за рахунок впровадження систем електричної тяги з використанням батарейних систем накопичення енергії (БСНЕ) (BESS – battery energy storage system) призначених для запасаєння енергії рекуперації та компенсації піків споживаного струму і провалів напруги при поверненні енергії з накопичувача в контактну мережу. Така система не є новою і експлуатується з 1988 р. Але поява нових типів акумуляторних батарей та двошарових конденсаторів створили основу для побудови вискоєфективних батарейних підстанцій (ABS – auxiliary battery substation), які широко використовуються для підвищення ефективності електрифікованого рейкового транспорту США та Японії. Дослідницька діяльність в області накопичувачів для залізничних систем спрямована в основному на метро та легкорейкові мережі [5-7]. Але в [8] представлено дослідження роботи ділянки постійного струму 3,0 кВ довжиною 15,8 км з консольним живленням контактної мережі та застосуванням ABS. В порівнянні з базовим розрахунком (без застосування ABS) при проходженні ділянкою поїзда ETR 1000 з встановленою швидкістю 125 км/год включення батарейної підстанції потужністю 2 та 4 МВт зменшило втрати напруги на 15 та 20,16 % і потужності на 3,75 та 4,89 % відповідно.

**Постановка задачі.** Нерівномірність споживання енергії протягом доби – одна з основних проблем систем тягового електропостачання залізничного транспорту та енергетики в цілому. Типовий графік споживання електроенергії в системі електропостачання залізниці має свої максимальні та мінімальні значення впродовж доби та на інтервалах проходження ділянки рухомим складом. У результаті, спостерігаються локальні надлишок і нестача енергії, що призводить до виходу за встановлені норми показників якості електроенергії в системі електропостачання рухомого складу. У тягових мережах постійного струму 3 кВ найважливішими показниками якості електроенергії є відхилення та коливання напруги. Згідно з основним документом, що регламентує роботу залізниць України [9], в системі тягового електропостачання (СТЕ) постійного струму відповідність електроенергії нормам якості визначають лише за двома термінами, що встановлюють рівні напруги: найбільший та найменший. Відхилення та коливання напруги в [10] визначають, відповідно, як тривалі зміни напруги, що призводять до зміни швидкості руху електрорухомого складу та короточасні, що до такої зміни не призводять.

Очевидним засобом утилізації надлишкової енергії з наступним поверненням її до мережі під час нестачі є застосування накопичувачів електричної енергії. Застосування керованих накопичувачів електричної енергії в системі електроживлення дає змогу вирішувати широкий спектр завдань, таких як: зниження витрат на виробництво електроенергії шляхом згладжування профілю завантаження мережі; збільшення терміну експлуатації обладнання мережі, зниження пікового навантаження на тягові підстанції (ТП); поліпшення якості електричної енергії; підвищення загальної надійності енергетичних систем; дозволяє інтегрувати альтернативні джерела електричної енергії в існуючу електромережу, утилізувати енергію рекуперації.

В свою чергу, використання накопичувачів електроенергії призведе до ускладнення розрахунку енергетичних показників СТЕ. Розрахунок керованої розподіленої СТЕ повинен передбачати розташування на міжпідстанційній зоні ряду підсилюючих пунктів (ПП) з можливістю регулювання їх вихідної потужності в режимі реального часу. Вочевидь зміна схеми електропостачання призведе до додаткових ускладнень при моделюван-

ні. Такі ускладнення будуть пов'язані з урахуванням впливу сусідніх фідерних зон та раціональним примусовим розподілом потужності паралельно працюючих тягових підстанцій і підсилюючих пунктів для забезпечення мінімуму втрат електричної енергії в тяговій мережі [11]. Априорі концепція розподіленого живлення з керованими (некерованими) тяговими підстанціями та керованими підсилюючими пунктами передбачає підсилення впливу явища вирівнюючих струмів і, як наслідок, ускладнення розрахунку цих струмів через наявність більшої кількості джерел з різною напругою на шинах.

### Матеріали досліджень.

На кафедрі «Інтелектуальні системи електропостачання» Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна розроблений програмний комплекс «iSET» [12] за допомогою якого проведені оціночні розрахунки показників системи тягового електропостачання дослідної ділянки з підсилюючими пунктами. Дослідна ділянка, яку покладено до основи програмного комплексу, знаходиться на Київському напрямку Придніпровської залізниці, має загальну протяжність 29,6 км, налічує три тягові підстанції (ТП) та характеризується наявністю рекуперативної зони між ТП-2 та ТП-3 (рис. 1).

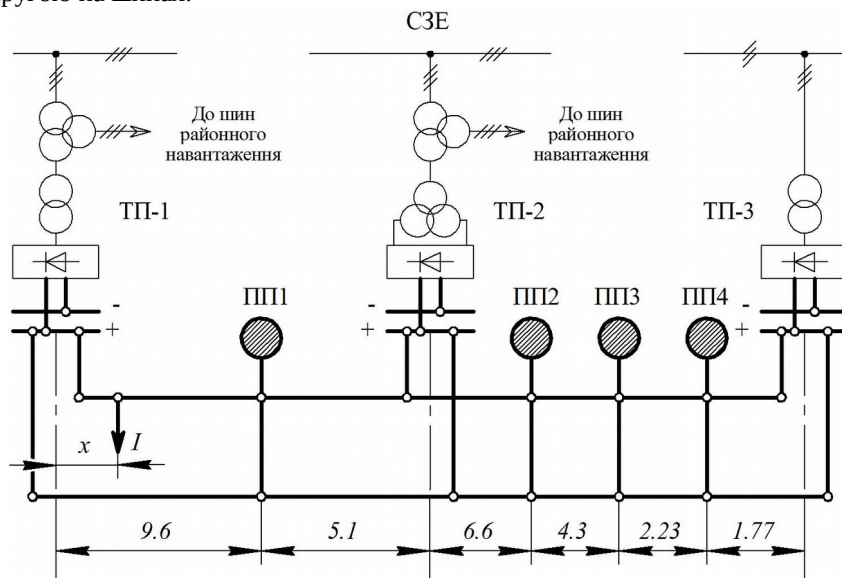


Рис. 1. Схема дослідної ділянки з підсилюючими пунктами

Слід відзначити, що тягові підстанції не обладнані інверторними агрегатами.

Живлення тягової мережі М120+2МФ100+А185+Р65 здійснюється за вузловою та паралельною схемами. В результаті експериментальних досліджень на даній ділянці було отримано напругу на струмоприймачі та струм споживання електрорухомим складом (ЕРС), який використовувався в подальших розрахунках (рис. 2). При проведенні експерименту на ділянці знаходився лише дослідний ЕРС.

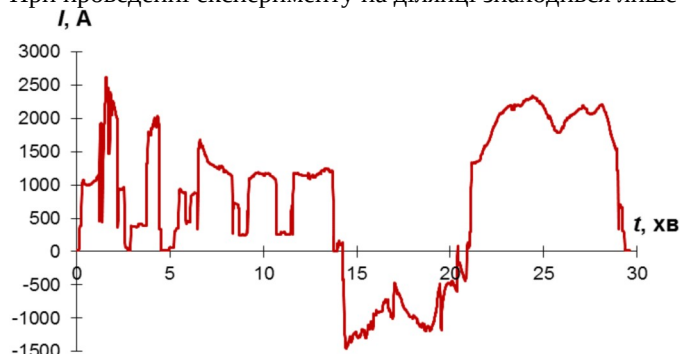


Рис. 2. Струм споживання електрорухомим складом

Розрахунок в програмному середовищі «iSET» передбачає побудову матриці схеми. Дана матриця визначає топологію розрахункової ділянки на координатній сітці, напругу холостого ходу тягових підстанцій, їх внутрішній опір, вузли підключення живлячих фідерів до контактної мережі та вузли з'єднання контактних підвісок. Столпчики матриці визначають координату кожного підключення, а рядки – тип підключення та параметр джерела живлення. Для ділянки рис. 1, матриця схеми матиме вигляд рис. 3.

|     |       |     |       |      |      |       |       |                                   |
|-----|-------|-----|-------|------|------|-------|-------|-----------------------------------|
| S = | 0     | 9,6 | 14,7  | 21,3 | 25,6 | 27,93 | 29,6  | Координата, км                    |
|     | 1     | 0   | 1     | 0    | 0    | 0     | 1     | Підключення ТП/ПП до першої колії |
|     | 0     | 1   | 0     | 1    | 1    | 1     | 0     | Підключення ПСК/ППЗ               |
|     | 1     | 0   | 1     | 0    | 0    | 0     | 1     | Підключення ТП/ПП до другої колії |
|     | 3388  | 0   | 3392  | 0    | 0    | 0     | 3381  | Напруга холостого ходу ТП, В      |
|     | 0,095 | 0   | 0,091 | 0    | 0    | 0     | 0,298 | Внутрішній опір ТП, Ом            |

Рисунок 3 – Матриця схеми

Напруги холостого ходу тягових підстанцій та їх внутрішній опір були визначені за формулою (1) та (2) відповідно [10].

$$U_0 = \frac{U_{ном}}{1 - A \cdot \left( \frac{u_k}{100} + \frac{n_0 \cdot S_{ном}}{S_{КЗ}} \right)}, \quad (1)$$

де  $U_{ном}$  – номінальна напруга на шинах тягової підстанції, В;

$A$  – коефіцієнт відносного нахилу зовнішньої характеристики випрямного агрегату, що залежить від схеми випрямлення; для шестипульсної  $A = 0,5$ , для дванадцятипульсової  $A = 0,26$ ;

$u_k$  – напруга короткого замикання трансформатора перетворювального агрегату, %;

$n_0$  – загальне число перетворювальних агрегатів на тяговій підстанції;

$S_{ном}$  – номінальна потужність первинної обмотки трансформатора одного перетворювального агрегату, кВА;

$S_{кз}$  – потужність короткого замикання на шинах від яких отримують живлення перетворювальні агрегати, кВА.

Внутрішній опір тягової підстанції:

$$\rho = \frac{U_0}{I_{ном}} \cdot A \cdot \left( \frac{u_k}{100 \cdot n} + \frac{S_{ном}}{S_{кз}} \right), \quad (2)$$

де  $I_{ном}$  – номінальний струм перетворювального агрегату, А;

$n$  – число працюючих агрегатів на тяговій підстанції.

При розрахунках приймалося, що на дослідній ділянці на пунктах секціонування та пункті паралельного з'єднання встановлено підсилюючі пункти з максимальним струмом генерації 1000 А кожен. В результаті проведення розрахункових досліджень отримані часові залежності зміни напруги на струмоприймачі ЕРС при роботі підсилюючих пунктів (рис. 4) та потужності втрат в тяговій мережі (рис. 5).

З аналізу графіків напруги видно, що підсилюючі пункти використовуються тяговою енергосистемою в якості буфера: генерують додаткову енергію під час знаходження ЕРС в режимі тяги, та накопичують її під час рекуперативного гальмування, тим самим зменшуючи відхилення напруги на струмоприймачі. Середнє значення відхилення напруги на струмоприймачі зменшилось з 7% до 2,75%. При цьому також зменшився розмах зміни напруги з 775 до 297 В. Як видно з рис. 4, потужність втрат в тяговій мережі також зменшилась. В цілому, потужність втрат електроенергії за час руху поїзда розрахунковою ділянкою при застосуванні підсилюючих пунктів зменшилась на 41,7 %.

### Особливості застосування накопичувачів електричної енергії в системі електроживлення залізниці.

Незважаючи на наявність великої кількості типів електрохімічних накопичувачів електричної енергії, вибір конкретного типу акумулятора для енергетичних задач обмежується певними вимогами [3]. При виборі конкретного типу накопичувача необхідно враховувати як технічні, так і економічні характеристики. До технічних характеристик можна віднести: ККД, кількість зарядно-розрядних циклів, час заряду, здатність до перевантажень (можливість віддачі імпульсних струмів), частотні характеристики (здатність швидко віддавати енергію). До факторів, що впливають на економічні показники, варто віднести загальну вартість батареї, її час життя. На залізниці БСНЕ може бути розміщено як на ТП і, бажано, між ними на ПП, так і безпосередньо на локомотиві. Оскільки застосування БСНЕ на залізниці забезпечує якість електричної енергії, визначальними факторами є перевантажувальна здатність, частотні характеристики і час заряду. При розміщенні БСНЕ безпосередньо на рухомому складі, визначальним фактором є питома маса накопичувача.

У випадку розміщення БСНЕ на ПП дослідної ділянки (рис. 1), в результаті моделювання було отримано струми споживання для кожного з чотирьох ПП ділянки (рис. 6).

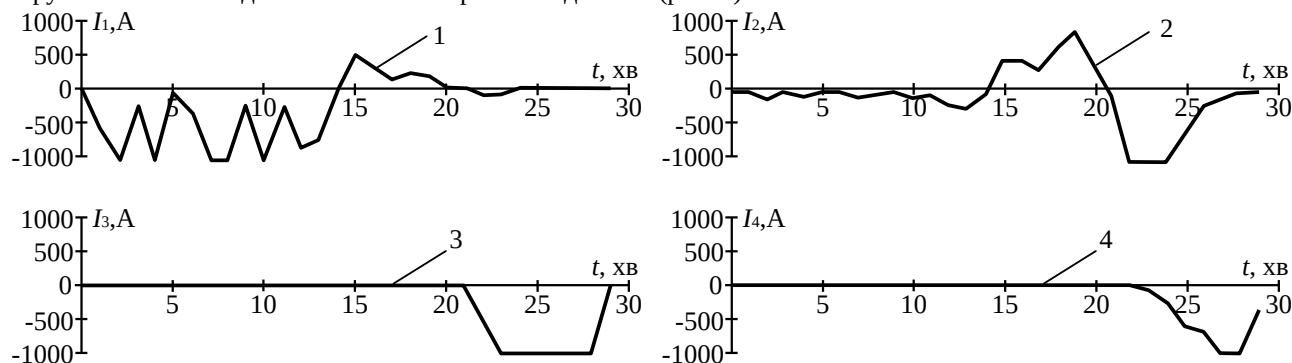


Рис. 6 – Струми споживання ПП

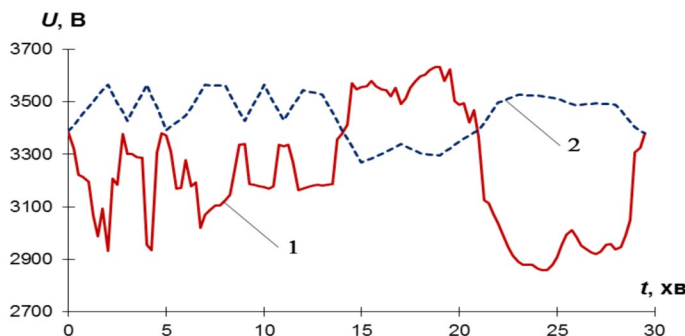


Рис. 4. Напруга на струмоприймачі ЕРС:

1 – експериментальні дослідження;

2 – розрахунок при роботі підсилюючих пунктів

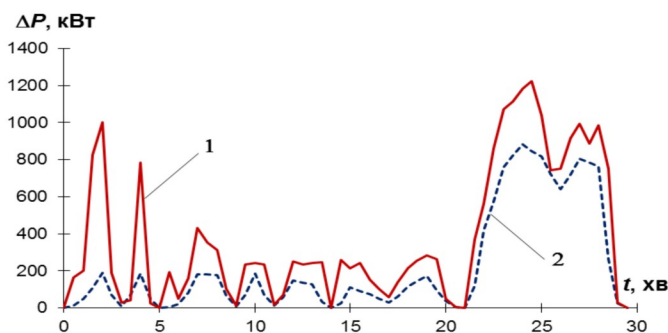


Рис. 5. Потужність втрат в тяговій мережі:

1 – розрахунок без підсилюючих пунктів;

2 – розрахунок при роботі підсилюючих пунктів

Для забезпечення підсилюючого струму на протязі всього часу проходження ЕРС через дослідну ділянку, необхідно визначити ємності БСНЕ кожного з чотирьох ПП. Знехтувавши величиною енергії рекуперації (припустивши що до БСНЕ не надходила енергія, а лише споживалася на протязі всього інтервалу руху, якщо  $i_n > 0$ , то вважаємо  $i_n = 0$ ), для дискретних вимірів струму споживання, ємність накопичувача визначається:

$$Q = \Delta t \sum_{n=0}^{n-1} |i_n|, \quad (3)$$

де  $Q$  – ємність БСНЕ, А·год;  
 $n$  – порядковий номер дискретного виміру;  
 $i$  – миттєве значення струму споживання БСНЕ, А;  
 $\Delta t$  – крок дискретизації вимірів струму споживання, год.

З (3) було отримано значення ємностей ПП1-ПП4 140 А·год, 79 А·год, 109 А·год, 60 А·год відповідно. Видно, що підсилюючі пункти мають досить незначні ємності накопичувачів. Як зазначалося в [3], найкращою сукупністю енергетичних та експлуатаційних характеристик на сьогоднішній день мають LiFePO<sub>4</sub> акумулятори. Окрім високої питомої енергоємності, вони мають високу переважувальну здатність (номінальний струм розряду складає ЗС, короткочасний імпульсний струм розряду – 8С) [13].

Для забезпечення необхідної ємності ПП1 (140 А·год) достатньо паралельно з'єднати п'ять акумуляторних батарей типу IFR117 3.2V 30Ah, проте, за умови максимального струму споживання 1 кА, кількість паралельно з'єднаних батарей має визначатися номінальним струмом споживання.

Номінальна напруга БСНЕ кожного з ПП має бути компромісом між технічними і економічними вимогами. В роботах авторів [14, 15] розглянуто топологію DC/DC перетворювача, який може виконувати функції узгоджуючого перетворювача між БСНЕ і контактною мережею 3,3 кВ. Перетворювач може здійснювати обмін енергією в двох напрямках, має властивість розділеної комутації. При виборі номінальної напруги низьковольтної частини перетворювача, що підключається до БСНЕ, перевагу надано силовим ключам з класом робочої напруги 1,2 кВ, що відповідає номінальній робочій напрузі БСНЕ 600 В.

**Частотні характеристики батарей.** Кожен з існуючих типів накопичувачів енергії має власні робочі режими, характерні конструктивні та енергетичні параметри. Комбінації цих характеристик визначають раціональні межі експлуатації. Однією з найважливіших енергетичних характеристик БСНЕ є частотний діапазон ефективної роботи накопичувача (частотні характеристики). Верхня межа діапазону зумовлена параметрами паразитних елементів в еквівалентній схемі накопичувача [16]. Частотні діапазони ефективної роботи накопичувачів є різними для існуючих типів накопичувачів електричної енергії і, зазвичай, не перекриваються між собою. Для розширення частотного діапазону в [17-19] запропоновано ідею гібридної БСНЕ, що складається з накопичувачів з різними частотними характеристиками. Очевидно, що якщо конкретний тип накопичувача не може компенсувати коливання потужності на високій частоті, то компенсувати їх повинен накопичувач іншого типу. Це рішення, в першу чергу, дозволяє розширити частотний діапазон ефективної роботи БСНЕ, забезпечуючи ефективний обмін енергією в кожній частотній області.

Для розробки гібридних БСНЕ пропонується спосіб, що визначає мінімальну встановлену потужність кожного з типів накопичувачів, що входять до гібридної БСНЕ. Спосіб заснований на аналізі статистичних даних вимірів струму та напруги в місці встановлення ПП. Проаналізувавши частотний спектр струму споживання ЕРС (Рис. 7), можна задатись мінімально значущою амплітудою струму пульсацій за енергетичним або іншим критерієм, що обумовлює значущі компоненти струму. На частотній осі відзначають області ефективної роботи кожного з типів накопичувачів ( $\Delta f_1$ ,  $\Delta f_2$  Рис. 7), що перекривають частотний діапазон значущих компонентів струму. Частотні компоненти струму, що не увійшли до області ефективної роботи накопичувачів не будуть компенсуватись БСНЕ. Значущі компоненти струму визначають мінімальну ємність кожного з типів накопичувачів, але для визначення номінальної ємності накопичувача до уваги мають прийматись і компоненти струму, що не перевищують мінімально значущої величини, але увійшли до області ефективної роботи накопичувачів. Ємності накопичувачів отримуються в процентному співвідношенні до повної ємності БСНЕ.

## Висновки.

– актуальним варіантом підсилення системи 3,0 кВ постійного струму є установка підсилюючих пунктів на міжпідстанційній зоні. Економічний ефект досягається за рахунок зменшення перетину проводів контактної мережі, зменшення енергії втрат, підтримки необхідного рівня напруги в контактній мережі і збільшення коефіцієнта використання потужності основного енергетичного обладнання при зниженні його встановленої потужності.

– ефективність системи розподіленого типу, особливо при застосуванні альтернативних джерел живлення, буде значно вищою при застосуванні батарейних систем накопичення енергії. Використання БСНЕ 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.

– керування кожною БСНЕ в режимі реального часу надає можливість перерозподіляти споживану потужність вздовж тягової мережі.

– використання гібридних БСНЕ дозволить експлуатувати накопичувачі електричної енергії в оптимальних частотних діапазонах.

– використання статистичних даних вимірів струму та напруги в місці встановлення ПП дозволяє визначити як потрібну ємність БСНЕ, так і потрібну кількість типів накопичувачів і процентне співвідношення їх ємностей.

**Список літератури:** 1. Гончаров Ю.П. Повышение эффективности функционирования тягового электроснабжения при применении возобновляемых источников электрической энергии. / Ю. П. Гончаров, В. Г. Сыченко, Д. А. Босый, М. С. Пастушенко, Е. Н. Косарев // *Problemy Kolejnictwa, czasopismo naukowe wydawane / Instytut Kolejnictwa*. – Warszawa, 2014. – Zeszyt 162. – С. 65-82. 2. Указ Президента України Про Стратегію сталого розвитку "Україна - 2020" м. Київ 12 січня 2015 року № 5/2015. 3. Сиченко В. Г. Дослідження режимів напруги в системі тягового електропостачання постійного струму / В. Г. Сиченко, Є. М. Косарев, П. В. Губський, В. В. Замаруєв, В. В. Івахно, Б. О. Стысло // *Електрифікація транспорту* – 2016. – № 11. – С. 61-70. 4. Энергетична стратегія України на період до 2030 року. 5. Lee Hanmin, Kim Gildong, Lee Changmu, Joung Euijin Failed Test of DC 1500 V Stationary Energy Storage System // *International Journal of Railway*, Vol. 5, No. 3 – September 2012, pp. 124 – 128. 6. Z. Li, S. Hoshina, N. Satake, M. Nogi, "DC/DC converter development for battery energy storage supporting railway DC feeder system" in 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia, IEEE 2015, pp. 1655-1660. 7. T. Konishi, M. Tobita Fixed Energy Storage Technology Applied for DC Electrified Railway (Traction Power Substation) in Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, IEEE 2012, pp.1-6. 8. Vincenzo Galdi; Giuseppe Graber; Antonio Piccolo; Alfonso Capasso; Regina Lamedica; Alessandro Ruvio Energy management of Auxiliary Battery Substation supporting high-speed train on 3 kV DC systems Vito Calderaro; Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2015 International Conference on 22-25 Nov. 2015. 9. Правила технічної експлуатації залізниць України. 10. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с. 11. Аржанишников Б.А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока: монография / Б. А. Аржанишников, 2010 – 176 с. 12. Свідоство про реєстрацію авторського права на твір №60711: комп'ютерна програма «Інтелектуальна система електропостачання «iSET» Босий Д. О., Косарев Є. М., дата реєстрації 20.07.15. 13. <http://a123.com.ua>. 14. В.В. Івахно, В.В. Замаруєв, Б.А. Стысло и др. О «критической» частоте преобразования двухзвенных преобразователей постоянного напряжения со звеном на основе инвертора тока / *Електротехніка і електромеханіка* – Харків: 2016. Спец. випуск №4(1) Том 1. с. 31-36. 15. Івахно В.В., Замаруєв В.В., Стысло Б.А. О возможности снижения динамических потерь в двухзвенном преобразователе постоянного напряжения с разделенной коммутацией/Проблемы современной электротехники – 2014, XIII Міжнародна науково-технічна конференція, 2-6 червня, 2014 Київ, Україна: Технічна електродинаміка. Інститут електродинаміки Національної академії наук України № 4, 2014 (июль/август) С. 84 – 86. 16. [http://egdk.ttu.ee/files/parnu2015/Parnu\\_2015\\_055-057.pdf](http://egdk.ttu.ee/files/parnu2015/Parnu_2015_055-057.pdf) 17. V. Zamaruev, "Battery energy storage system for use in smart power systems" *Energy saving, energetics, energy audit. Special edition*, 2013. pp. 77-84. 18. Damith B. "Single-Phase Grid-Connected LiFePO4 Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System with Interleaved Boost Inverter" DOI 10.1109/TPEL.2014.2372774. 19. A. Kuperman and I. Aharon, "Battery-ultracapacitor hybrids for pulsed current loads: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 981-992, 2011.

**Bibliography (transliterated):** 1. Honcharov Y.P. Povyshenie effektivnosti funktsionirovaniya tyagovogo elektrosnabzheniya pri primenenii vozobnovlyayemykh istochnikov elektricheskoy energii. / Yu.P. Goncharov, V. G. Syichenko, D. A. Bosyiy, M. S. Pastushenko, E. N. Kosarev // *Problemy Kolejnictwa, czasopismo naukowe wydawane / Instytut Kolejnictwa*. – Warszawa, 2014. – Zeszyt 162. – С. 65-82. 2. Ukaz Prezidenta Ukrayiny Pro Strategiyu stalogo rozvytku "Ukraine - 2020" m. Kyiv January, 12 2015 № 5/2015. 3. Sychenko V. G. Doslidzhennya rezhymiv naprugi v systemi tyagovogo elektropostachannya postijnogo strumu / V. G. Sychenko, Ye. M. Kosaryev, P. V. Gubskiy, V. V. Zamaruev, V. V. Ivakhno, B. O. Styslo // *Elektryfikaciya transportu* – 2016. – № 11. – С. 61-70. 4. Energetychna strategiya Ukrayiny na period do 2030 roku. 5. Lee Hanmin, Kim Gildong, Lee Changmu, Joung Euijin Failed Test of DC 1500 V Stationary Energy Storage System // *International Journal of Railway*, Vol. 5, No. 3 – September 2012, pp. 124 – 128. 6. Z. Li, S. Hoshina, N. Satake, M. Nogi, "DC/DC converter development for battery energy storage supporting railway DC feeder system" in 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia, IEEE 2015, pp. 1655-1660. 7. T. Konishi, M. Tobita Fixed Energy Storage Technology Applied for DC Electrified Railway (Traction Power Substation) in Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, IEEE 2012, pp.1-6. 8. Vincenzo Galdi; Giuseppe Graber; Antonio Piccolo; Alfonso Capasso; Regina Lamedica; Alessandro Ruvio Energy management of Auxiliary Battery Substation supporting high-speed train on 3 kV DC systems Vito Calderaro; Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2015 International Conference on 22-25 Nov. 2015. 9. Правила технічної експлуатації залізниць України. 10. Markvardt K. G. Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog / K. G. Markvardt. – М.: Transport, 1982. – 528 s. 11. Arzhaniikov B.A. Sistema upravlyаемого elektrosnabzheniya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog postoyannogo toka: monografiya / B. A. Arzhannikov, 2010 – 176 p. 12. Svidoctvo pro reyestraciyu avtorskogo prava na tvir #60711: Kompyuterna programa «Inetelektualna systema elektropostachannya «iSET» Bosy D. O., Kosaryev Ye. M., data reyestratsiyi 20.07.15. 13. <http://a123.com.ua>. 14. V.V. Ivakhno, V.V. Zamaruev, B.A. Styslo, A.S. Yasko. O «kriticheskoy» chastote preobrazovaniya dvuhzvennykh preobrazovateley postoyannogo napryazheniya so zvenom na osnove invertora toka / *Elektrotehnika i elektromehaniika* – Kharkiv: 2016. Spets. vipusk №4(1) Tom 1. p. 31-36. 15. V.V. Ivakhno, V.V. Zamaruev, B.A. Styslo O vozmozhnosti snizheniya dinamicheskikh poter v dvuhzvennom preobrazovatele postoyannogo napryazheniya s razdelennoy kommutatsiey / *Problemy suchasnoy elektrotehniki* – 2014, Kyiv, Ukraine: № 4, 2014 (July/August) p. 84 – 86. 16. [http://egdk.ttu.ee/files/parnu2015/Parnu\\_2015\\_055-057.pdf](http://egdk.ttu.ee/files/parnu2015/Parnu_2015_055-057.pdf) 17. V. Zamaruev, "Battery energy storage system for use in smart power systems" *Energy saving, energetics, energy audit. Special edition*, 2013. pp. 77-84. 18. Damith B. "Single-Phase Grid-Connected LiFePO4 Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System with Interleaved Boost Inverter" DOI 10.1109/TPEL.2014.2372774. 19. A. Kuperman and I. Aharon, "Battery-ultracapacitor hybrids for pulsed current loads: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 981-992, 2011.

Надійшла 29.05.2017