

РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В КОНТАКТНІЙ МЕРЕЖІ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Вступ

На електрифікованому залізничному транспорті від значення напруги в тяговій мережі в першу чергу залежить швидкість руху електро-возів, пропускна та провізна спроможність ділянки. Правилами улаштування системи тягового електропостачання залізниць України [1] встановлені діючі значення напруги на шинах тягових підстанцій і струмоприймачах електро-рухомого складу (ЕРС) у нормальному і вимушеному режимах системи електричної тяги. Очевидно, що напруга на струмоприймачах електро-возів, які знаходяться на фідерній зоні, не може бути постійною і рівною 3,0 кВ навіть за наявності на зоні пристроїв регулювання. Однак прагнення до звуження діапазону відхилення напруги є основною умовою забезпечення номінального режиму роботи тягових і допоміжних машин електро-воза. При цьому необхідно враховувати, що підвищення рівня напруги на струмоприймачі електро-воза сприяє підвищенню технічної швидкості руху поїзда, а при збереженні споживаної потужності веде до зниження струму електро-воза. Тому для досягнення більш високих енергетичних показників системи тягового електропостачання постійного струму та підвищення енергоефективності ЕРС при високих швидкостях руху необхідно впроваджувати системи для звуження діапазону відхилення напруги на струмоприймачах швидкісного ЕРС.

Мета роботи – визначення рівня напруги в контактній мережі для забезпечення мінімальних втрат електроенергії в залежності від напруги на шинах тягових підстанцій та потужності підсилюючого пункту.

Вплив зміни напруги на роботу електро-рухомого складу

Основними вимогами, що висувуються з боку електрорухомого складу до системи тягового електропостачання є забезпечення рівня напруги на струмоприймачі, який би гарантував досягнення заданої швидкості, обумовленої

графіком руху, та забезпечував надійну та справну роботу всіх елементів ЕРС.

Вплив зміни напруги на зміну швидкості руху електро-возів постійного струму з двигунами послідовного збудження з врахуванням схеми з'єднання тягових двигунів, приведенного ухилу, коефіцієнту послаблення збудження та ваги поїзда змінюється в межах [2]:

$$\frac{dv}{dU} = 0,01 \dots 0,03 \frac{\text{км/год}}{\text{В}}. \quad (1)$$

Як видно з (1), в усталеному режимі роботи ЕРС залежність зміни швидкості від зміни напруги невелика, що обумовлено значною інерційністю поїзда. Але при зниженій напрузі збільшується час розгону поїзда для досягнення встановленої швидкості та час ходу електро-воза під струмом для її збереження. Таким чином, збільшується загальний час ходу електро-возу під струмом, що призводить до додаткових витрат електроенергії.

При слідуванні поїзда розрахунковим підйомом зниження напруги на струмоприймачі призводить до зростання температури обмоток електродвигунів та зниження пропускної спроможності ділянки через збільшення часу ходу поїзда. Також зниження напруги зменшує продуктивність роботи допоміжного обладнання, а саме мотор-вентиляторів та мотор-компресорів. Внаслідок цього погіршуються умови охолодження тягових двигунів та іншого електрообладнання, збільшується час відпуску пневматичних гальм поїзда.

За умовами надійності роботи ЕРС, з одного боку, повинен забезпечуватись рівень напруги, не нижчий за мінімально допустимий з умов нагрівання тягових двигунів та двигунів допоміжного обладнання. З іншого – не перевищувати максимально допустимого значення за потенційними умовами на колекторі для запобігання виникнення кругового вогню. На ділянках з можливістю рекуперації напруга в тяговій мережі повинна забезпечувати мінімально допустиме значення на струмоприймачах електро-возів, що знаходяться в режимі тяги і не пе-

ревищувати значення на струмоприймачі рекупуючого електровозу.

Таким чином, напруга в тяговій мережі повинна задовольняти вимогам (2) для забезпечення сталої швидкості поїзда та умов для режиму рекуперації. Також значення напруги в контактній мережі повинне забезпечувати мінімальні втрати електроенергії при реалізації графіка руху поїздів.

$$U_{\min} < U_{\text{етяг}} \leq U_{\text{тм}} < U_{\text{ерекуп}} \leq U_{\max}, \quad (2)$$

де $U_{\min}$ – мінімально допустиме значення напруги в контактній мережі, В;

$U_{\text{етяг}}$ – значення напруги на струмоприймачі електровозу, якій знаходиться в режимі тяги, В;

$U_{\text{тм}}$ – напруга в тяговій мережі, В;

$U_{\text{ерекуп}}$ – значення напруги на струмоприймачі електровозу, якій знаходиться в режимі рекуперації, В;

$U_{\max}$ – максимальне значення напруги в контактній мережі, В.

Але чітке дотримання поставлених вимог неможливе, оскільки на величину розмаху і тривалість змін напруги діє багато чинників, тому даний процес можна розглядати як стохастичний. Серед впливаючих факторів, можна відзначити рівень напруги на шинах тягових підстанцій, який характеризується досить великим розкидом значень, викликаних коливаннями напруги в живлячій енергосистемі та змінами тягового навантаження. Не менш важливими є втрати напруги в тяговій мережі, які, в свою чергу, залежать від струму електровозу, його місцезнаходження та взаємного розташування інших потягів на фідерній зоні та їх режимів роботи. Очевидно, доцільним було б забезпечення такого режиму напруги в тяговій мережі, який би найбільшою мірою задовольняв поставлених умові (2).

Застосування на тягових підстанціях пристроїв автоматичного регулювання та керування перетворювальних агрегатів зі стабілізацією вихідної напруги дозволяє ліквідувати лише вплив коливань живлячої енергосистеми та падіння напруги на внутрішньому опорі тягових підстанцій. Вплив втрат напруги в опорі проводів контактної мережі міжпідстанційної зони від тягового навантаження зберігається. Тому, в окремих випадках, при жорстких вимогах до якості напруги, наприклад, на ділянках зі швидкісним рухом, впровадження стабілізації лише на шинах тягових підстанцій буде недостатнім.

Для вирішення даної проблеми додатково стабілізують напругу в контактній мережі.

Досягнення і стабілізація заданого рівня напруги на міжпідстанційній зоні потребує побудови розподіленої системи вимірювань та на її основі системи керування у реальному часі. Однак, як зазначалось в [3] створення такої слідкуючої системи при наявності декількох потягів в зоні, коли втрата напруги до кожного з них буде відрізнятися, дуже важке та не доцільне. Тому широкого застосування набули системи стабілізації на посту секціонування, які довели свою ефективність значно знизивши коефіцієнт варіації напруги на струмоприймачах електрорухомого складу.

На сучасному етапі розвитку техніки та технологій стає можливим створення слідкуючої системи автоматичного керування та побудова на її базі системи для забезпечення заданого рівня напруги на струмоприймачах електровозів, що дозволить досягти енергооптимальних режимів роботи СТЕ.

Забезпечення заданого рівня напруги в контактній мережі

На кафедрі «Електропостачання залізниць» ДНУЗТ розроблено спосіб [4] за допомогою якого, незалежно від кількості поїздів на міжпідстанційній зоні та їх навантаження, обмежується нижній рівень напруги на струмоприймачах ЕРС (рис. 1). Такий спосіб передбачає побудову розподіленої системи вимірювань для визначення розподілу напруги уздовж міжпідстанційної зони та встановлення підсилюючого пункту на посту секціонування для зменшення втрат напруги до струмоприймачів електровозів.

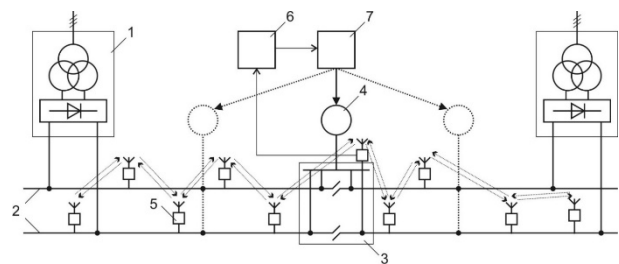


Рис. 1. Схема електропостачання ділянки електрифікованої залізниці. 1 – тягова підстанція; 2 – контактна мережа; 3 – пост секціонування; 4 – підсилюючий пункт тягової мережі; 5 – пристрій вимірювання напруги з бездротовою передачею даних; 6 – блок декодування даних; 7 – система управління

Для визначення необхідного струму підсилюючого пункту для забезпечення заданого рівня напруги запишемо рівняння балансу

виконується в кожен момент часу по обох коліях ділянки. До розрахунку автоматично приймається колія з більшою втратою напруги. У випадку невиконання поставленої умови підси-

люючий пункт в роботу не вмикається. Детальний алгоритм роботи системи зображено на рис. 3.

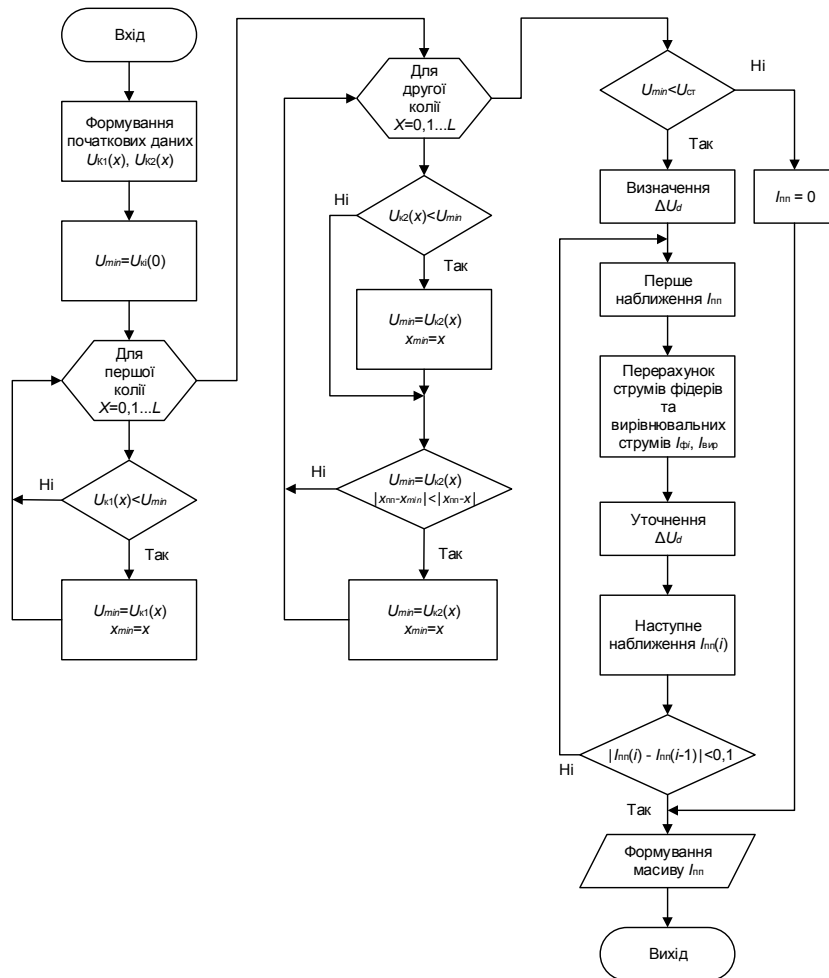


Рис. 3. Алгоритм роботи системи з обмеження нижнього рівня напруги на струмоприймачах ЕРС

Результат роботи системи при русі чотирьох поїздів розрахунковою ділянкою з напругою на шинах суміжних тягових підстанцій 3500 В та стабілізацією на рівні 3100 В зображено на рис. 5. При цьому необхідна потужність підсилюючого пункту становить близько 2 МВт, а втрати електроенергії в тяговій мережі за час виконання графіка руху зменшились на 32 %.

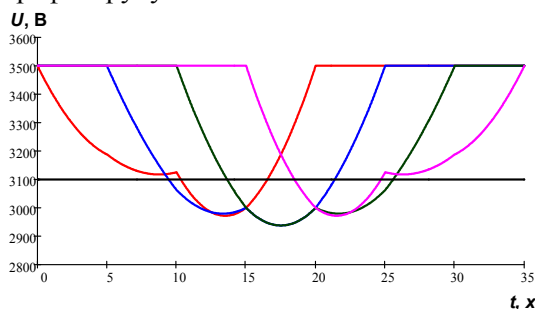


Рис. 4. Напруга на струмоприймачах електровозів без підсилюючого пункту

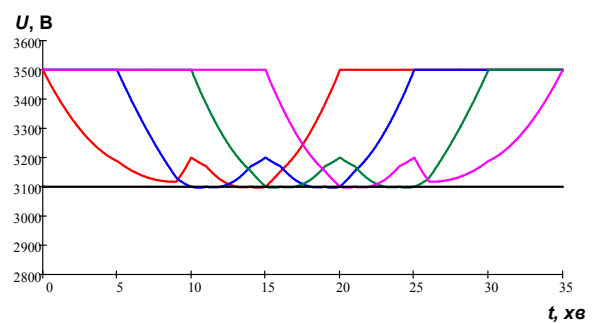


Рис. 5. Напруга на струмоприймачах електровозів при роботі підсилюючого пункту

Як видно з рис. 5 за допомогою запропонованої системи стає можливим обмеження нижнього рівня напруги, але залишається не вирішеним питання про оптимальне значення напруги для забезпечення найбільш раціонального енергетичного режиму роботи СТЕ.

Для дослідження даного питання проводились розрахунки на математичній моделі при реалізації графіка руху чотирьох поїздів з міні-

© Косарев Є. М., 2015

мальним міжпоїзним інтервалом. Дослідна ділянка довжиною 20 км отримувала живлення за вузловою схемою, тип тягової мережі М120+2МФ100+А185+Р65 (рис. 6). Підсилюючий пункт встановлено на посту секціонування. Розрахунки проводились по чергово для різних рівнів напруг на шинах суміжних тягових підстанцій від 2700 до 4000 В. При цьому змінювалась задана межа мінімального значення напруги на струмоприймачах ЕРС в діапазоні від 2700 В до значення напруги на шинах тягових підстанцій. Час реалізації графіка руху становив 35 хв.

В розрахунках приймалися наступні спрощення: електровози споживали однаковий і незмінний струм $I_e = 2000 \text{ А}$, пост секціонування знаходився в середині міжпідстанційної зони, напруга на шинах суміжних тягових підстанціях приймалася рівною та незмінною в часі, внутрішні опори тягових підстанцій мали однакове значення.

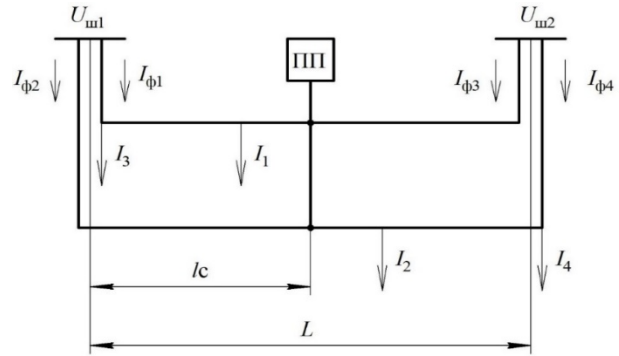


Рис. 6. Миттєва схема розрахункової ділянки

Для ряду напруг на шинах тягових підстанцій отримано зміну втрат електроенергії в тяговій мережі в залежності від рівня напруги стабілізації. Розраховано потужності підсилюючого пункту в залежності від напруги на шинах тягових підстанцій і рівня стабілізації та побудовані відповідні номограми (рис. 7).

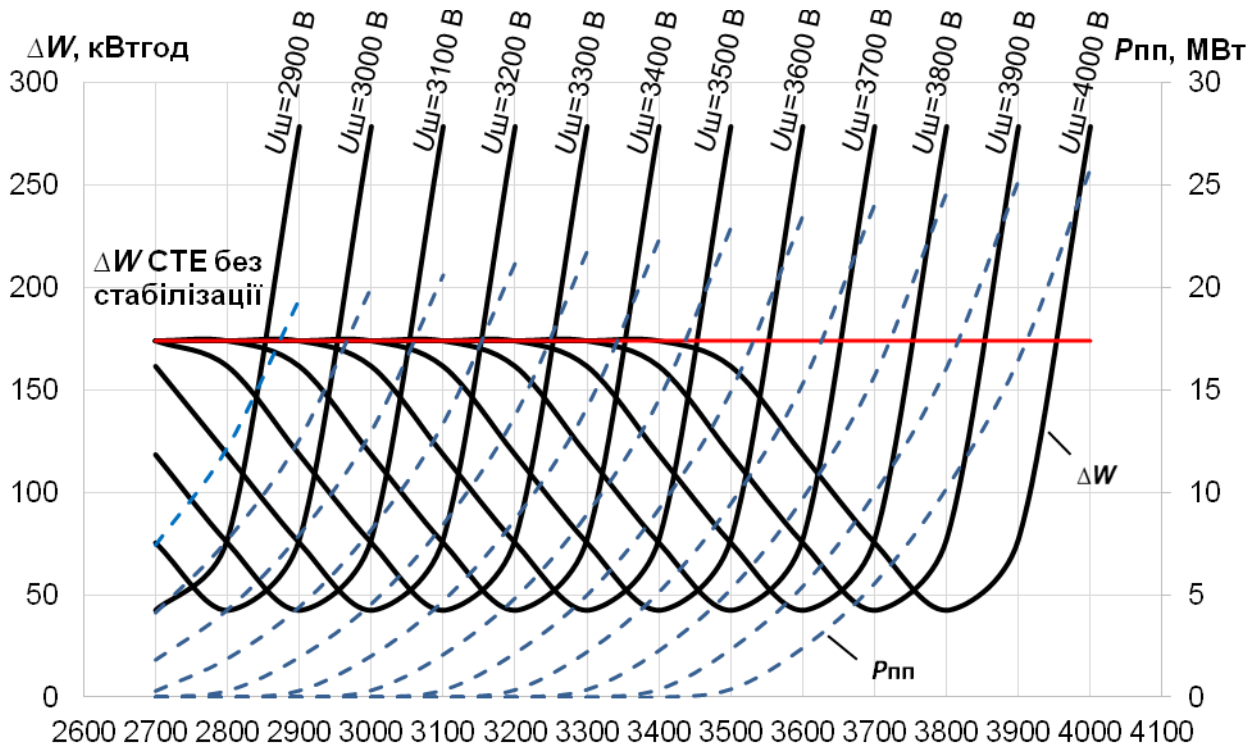


Рис. 7. Номограми потужності підсилюючого пункту та втрат електроенергії від напруги стабілізації; ΔW – втрати електроенергії в контактній мережі, $P_{пп}$ – потужність підсилюючого пункту

Проаналізувавши отримані залежності можна відзначити, що доцільно підтримувати напругу на струмоприймачах на рівні, що відповідає інтервалу спаду кривої втрат електроенергії від вихідного до мінімального значення. Забезпечення рівня напруги близького до значення на шинах ТП недоцільне через зростання

втрат енергії в результаті надлишкового регулювання та значного збільшення встановленої потужності підсилюючого пункту.

Енергооптимальний рівень напруги в контактній мережі можна визначити із співставлення величини втрат електроенергії та потужності підсилюючого пункту. Однак раціональний рі-

вень напруги в контактній мережі буде також залежати від строку окупності підсилюючого пункту, розрахованого на необхідну потужність. Остаточне визначення заданого рівня напруги повинно також враховувати потреби локомотивного господарства в неперервному та енергоефективному виконанні експлуатаційної роботи.

Висновки

Електрифікований залізничний транспорт в своїй експлуатаційній роботі залежить від режимів напруги в тяговій мережі. Рівень напруги впливає як на технічні характеристики ЕРС так і на пропускну та провізну здатність ділянки. Для досягнення високих енергетичних показників системи тягового електропостачання постійного струму та підвищення енергоефективності ЕРС при високих швидкостях руху необхідно мінімізувати відхилення напруги від за-

даних значень. Високих енергетичних показників СТЕ можливо досягти за рахунок використання способу забезпечення заданого рівня напруги в контактній мережі електрифікованої ділянки постійного струму. Такий спосіб забезпечує рівномірний розподіл втрат напруги вздовж міжпідстанційної зони за рахунок примусового струморозподілу в тяговій мережі в результаті генерації підсилюючим пунктом додаткової потужності.

При застосуванні запропонованого способу підвищення енергоефективності СТЕ раціональний рівень напруги в контактній мережі буде обумовлений напругою на шинах суміжних тягових підстанцій і визначатися за критерієм мінімуму втрат електроенергії в тяговій мережі та потребами локомотивного господарства для виконання встановленого графіка руху та нормальної роботи ЕРС.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Інструкція ЦЕ0009. Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України. – Введено в дію 2005-02-01. – Київ: Швидкий рух, 2005. – 80 с.
2. Добровольскис Т. П., Точность стабилизации напряжения на токоприемнике электровоза., / Т. П. Добровольскис // Сборник научных трудов ВНИИЖТа. – Москва, 1979. – Вып. 618. – С.
3. Мирошніченко Р. И. Система телеавтоматического регулирования напряжения в контактной сети (СТАРНК – ПС2-73) / Р. И. Мирошніченко, Е. А. Колодчевский, Б. Н. Свищев, Ю. А. Шипарев, Л. А. Большаков // Сборник научных трудов ВНИИЖТа. – Москва, 1977. – Вып. 580. – С 13-29.
4. Пат. 98483 Україна, МПК H02J 1/00 H02J 13/00. Спосіб стабілізації напруги в контактній мережі електрифікованої ділянки постійного струму / Д. О. Босий, В. Г. Сиченко, Є. М. Косарев; заявник та власник патенту Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. ак. В.Лазаряна. – u 201412905; заявл. 02.12.14; опубл. 27.04.15, Бюл. № 8. – 3 с.
5. Сыченко, В. Г. Усовершенствование методологии расчета распределенной системы тягового электроснабжения с усиливающим пунктом / В. Г. Сыченко, Д. А. Босый, Е. Н. Косарев // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2014. – Сп. вип. – Т. 2. – С. 8-18.
6. Босий, Д. О. Методика розрахунку миттєвих схем системи тягового електропостачання для споживання постійної потужності. // Електрифікація транспорту. – 2014. – № 8. – С.15-25.
7. 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

REFERENCES

1. Instrukcija CE0009. Pravyla ulashtuvannja systemy tjavogovo elektropostachannja zaliznyc' Ukraïny. [Instructions CE0009. Rules arrangement traction power supply system of Ukrainian railways] – Vvedeno v diju 2005-02-01. – Kyi'v: Shvydkyj ruh, 2005. – 80 s.
2. Dobrovolskis T. P., Tochnost' stabilizatsii napryazheniya na tokopriemnike elektrovoza [Accuracy of voltage regulation in the electric current collector]. Sbornik nauchnykh trudov VNIIZhTa [Collection of the scientific works VNIIZhT], 1979, Vol. 618, pp.
3. Miroshnichenko R. I. Sistema teleavtomaticheskogo regulirovaniya napryazheniya v kontaktnoy seti (STARNK – PS2-73)[Telecontrol system of voltage controlling in the contact network (STARNK - PS2-73)] Sbornik nauchnykh trudov VNIIZhTa. [Collection of the scientific works VNIIZhT], 1977, Vol. 580. – pp 13-29.
4. D. O. Bosiy, V. G. Sichenko, E. M. Kosarev Sposib stabilizatsii naprugi v kontaktnyy mrezhi elektrifikovanoj dilyanki postiy-nogo strumu [The method of stabilization the voltage in the contact network of electrified section DC] Patent no u 201412905
5. Sychenko, V. G. Usovershenstvovanie metodologii rascheta raspredelennoy sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya s usilivayushchim punktom [The improvement of calculation methodology of distribution electric power traction system with boost point] Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit [Energy saving. Power engineering Energy audit.], 2014, Spec. Vol. 2, pp 8-18.
6. Bosiy, D. O. Metodika rozrakhunku mittevykh skhem sistemi tyagovogo elektropostachannya dlya spozhivannya postiynoï potuzhnosti. [The method of calculation schemes instant traction system of power consumption constant power.] Elektrifikatsiya transportu [Electrification of transport], 2014, No 8, pp. 15-25.
7. Goncharov Yu. P. Povyshenie effektivnosti

© Косарев Є. М., 2015

Kolejnictwa. – 2014. – Вып. 162. – С. 65-82.

Надійшла до друку 12.06.2015.

funkcjonowania tyagowego elekt-roznabzheniya pri primenenii vozobnovlyаемых istochnikov elektricheskoy energii. [Increasing the efficiency of the traction power supply in the application of renewable electricity sources] Problemy Kolejnictwa, czasopismo naukowe wydawane / Instytut Kolejnictwa, 2014, Vol. 162, pp. 65-82.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Лежнюк П. Д.*

Проаналізовано вплив зміни рівня напруги на роботу електрорухомого складу. Встановлено необхідність забезпечення заданого рівня напруги в контактній мережі для виконання встановленого графіка руху і нормальної роботи всіх вузлів та елементів ЕРС. Запропоновано спосіб встановлення заданого рівня напруги на струмоприймачі електрорухомого складу. Представлено розрахунок для визначення струму підсилюючого пункту. Приведений алгоритм роботи системи обмеження нижнього рівня напруги на струмоприймачах ЕРС. Отримані залежності зміни втрат електроенергії в контактній мережі від заданого рівня напруги. За результатами розрахунків побудовані номограми для визначення енергооптимальних рівнів напруги в контактній мережі.

Ключові слова: електрична тяга; постійний струм; регулювання напруги; підсилюючий пункт.

УДК 621.331.3

Е. Н. КОСАРЕВ (ДНУЖТ)

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна 49010, Днепропетровск, ул. Лазаряна, 2, тел. +38 (056) 793-19-11, e-mail: kosarev@e.dit.edu.ua, ORCID: orcid.org/0000-0003-3574-7414

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Проанализировано влияние изменения уровня напряжения на работу электроподвижного состава. Установлена необходимость обеспечения заданного уровня напряжения в контактной сети для выполнения установленного графика движения и нормальной работы всех узлов и элементов ЭПС. Предложен способ установления заданного уровня напряжения на токоприемники электроподвижного состава. Представлены расчет для определения тока усиливающего пункта. Приведенный алгоритм работы системы ограничения нижнего уровня напряжения токоприемников ЭПС. Полученные зависимости изменения потерь электроэнергии в контактной сети от заданного уровня напряжения. По результатам расчетов построены номограммы для определения энергооптимальных уровней напряжения в контактной сети.

Ключевые слова: электрическая тяга; постоянный ток; регулирование напряжения; усиливающий пункт.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Лежнюк П. Д.*

UDC 621.331.3

Е. М. KOSAREV (DNURT)

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazarian 49010, Dnepropetrovsk, 2 Lazarian st., tel.: (056) 793-19-11; e-mail: kosarev@e.dit.edu.ua, ORCID: orcid.org/0000-0003-3574-7414

VOLTAGE CONTROL IN A CONTACT NETWORK OF DC ELECTRIFIED RAILWAYS

In this article was considered the changing of the voltage level on the work of electric motive power. The necessity of providing a predetermined level of voltage in the contact network to execute a defined schedule and normal operation of all components and elements of the EMP. The method of establishing a predetermined level of voltage on the electric rolling stock pantographs was established. The calculation for determination the current boost point and the algorithm of the lower limit system of the voltage level pantographs EMP were presented. The dependences of changing energy loss in the contact network from a predetermined voltage level were received. According to the results of calculations; the nomograms were constructed for determining energy-optimal dispatching levels of voltage in the contact network.

Keywords: electric traction; direct current; voltage regulation; boost point.

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

External reviewer *Lezhnyuk P. D.*

© Косарев Е. М., 2015