

СТАБІЛІЗАЦІЯ НАПРУГИ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Д.В. Тугай^{1*}, докт.техн.наук, Г.Г. Жемеров^{2**}, докт.техн.наук

¹ – Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002, Україна, e-mail: tugaydmytro@gmail.com

² – Національний технічний університет «ХПІ», вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна,

e-mail: zhemerov@gmail.com

Обґрунтовано можливість збільшення коефіцієнта корисної дії контактної мережі постійного струму за рахунок використання активних випрямлячів – джерел напруги (АВДН) у силовому обладнанні тягових підстанцій для стабілізації напруги на струмоприймачі електрорухомого складу. Одержано розрахункові формули, що дають можливість розраховувати траєкторії стабілізації напруги на струмоприймачі рухомого складу в залежності від положення електропоїзда на міжпідстанційній ділянці, для двох способів стабілізації – «синхронно-го» і «асинхронного». Бібл. 5, рис. 4, табл. 1.

Ключові слова: стабілізація напруги, контактна мережа, струмоприймач, коефіцієнт корисної дії.

Останнім часом споживання електроенергії на українських залізницях (близько 6.3 мільярдів кВт·год) перевищує 5% від загального річного обсягу споживання електроенергії в Україні [4]. Більша частина споживаної на залізницях електроенергії припадає на забезпечення функціонування систем електричної тяги. Тому навіть незначне зниження втрат енергії в системах електропостачання рухомого складу призводить до істотного економічного ефекту при організації залізничних перевезень [5].

Системи електричної тяги постійного струму, що з'явилися історично раніше, охоплюють сьогодні більше 40% електрифікованих ділянок залізниць України. Незважаючи на очевидний недолік систем тяги постійного струму, який полягає в низькій нарузі контактної мережі, що обумовлює значні втрати енергії в системі електропостачання при відносно невеликих (15–20 км) міжпідстанційних відстанях, потенціал використання постійного струму на залізницях ще не вичерпано [2].

Одним із можливих технічних рішень підвищення ефективності систем тяги постійного струму є перехід на сучасні напівпровідникові перетворювачі в пристроях тягових підстанцій та рухомого складу [3], що дають змогу не тільки забезпечувати необхідні якісні показники електроенергії, а й стабілізувати напругу на струмоприймачі або тягових електродвигунах (ТЕД).

Метою статті є оцінка енергетичної ефективності двох способів стабілізації напруги на струмоприймачі електрорухомого складу під час його руху міжпідстанційною ділянкою шляхом реалізації законів керування активними випрямлячами тягових підстанцій постійного струму. Представлений матеріал може бути корисний для обґрунтування техніко-економічних рішень при модернізації діючих та проектуванні нових тягових підстанцій.

Еквівалентна схема системи тягового електропостачання постійного струму. На рис. 1 показано еквівалентну електричну схему міжпідстанційної ділянки тягової мережі постійного струму, де прийнято наступні позначення: E_1 , E_2 – джерела постійної напруги, відповідні вихідним напругам двох тягових підстанцій; R_0 – опір навантаження, відповідний опору, на якому виділяється енергія, еквівалентна споживаній рухомих складом; $k = L/L_0$ – відношення відстані L між першою тяговою підстанцією та поточним положенням електропоїзда на міжпідстанційній ділянці до довжини міжпідстанційної ділянки L_0 ; R – приведений опір тягового кола, що враховує опір контактної мережі та опір рейкового кола. З огляду на конструкції типів контактної підвіски, що використовуються [1], приведений опір тягового кола може бути розрахований за співвідношенням

$$R = \rho_m L_0 / S, \quad (1)$$

де $\rho_m = \rho_{20m}(1 + \alpha_m(t - 20))$ – питомий опір міді,

$$S = \frac{S_{cm}(k_{al}S_m + S_{al})}{k_{al}S_{cm} + k_{cm}(k_{al}S_m + S_{al})} - \quad (2)$$

перетин тягового кола в мідному еквіваленті; S_m , S_{al} , S_{cm} – відповідно перетини мідних і алюмінієвих проводів контактної підвіски, а також перетин рейкового кола; $k_{al} = \rho_{al}/\rho_m = \rho_{20al}(1 + \alpha_{al}(t - 20))/\rho_{20m}(1 + \alpha_m(t - 20))$, $k_{cm} = \rho_{cm}/\rho_m = \rho_{20cm}(1 + \alpha_{cm}(t - 20))/\rho_{20m}(1 + \alpha_m(t - 20))$ – відношення питомих опорів алюмінію і сталі до питомого опору міді.

© Тугай Д.В., Жемеров Г.Г., 2018

ORCID ID: *<http://orcid.org/0000-0003-2617-0297>; **<http://orcid.org/0000-0002-3469-0121>

Для аналізу виберемо найпростіший випадок ненавантаженої ділянки, коли єдиний рухомий склад переміщується від першої до другої підстанції з постійною швидкістю. Для подальших розрахунків прийемо такі параметри елементів еквівалентної схеми: $L_0 = 20$ км, $\rho_m = 0.018$ Ом·мм²/м, $\rho_{ал} = 0.0295$ Ом·мм²/м, $\rho_{см} = 0.21$ Ом·мм²/м, $t = 20$ °С, тип контактної підвіски – М-95 + 2МФ-100 + А-185, $S_{см} = 9510$ мм², тип електровоза – ВЛ10К, годинна потужність тягових електродвигунів – 5360 кВт, швидкість годинного режиму $V = 48.7$ км/год, $R_0 = 1.68$ Ом, номінальна напруга контактної мережі $U_H = 3$ кВ.

Напруга на струмоприймачі електрорухомого складу на міжпідстанційній ділянці. Неважно довести, що за стабільних і рівних напруг на шини двох тягових підстанцій найбільші втрати напруги будуть відповідати середині міжпідстанційної ділянки, коли $L = L_0/2$.

Побудуємо криву, відповідну розподілу потенціалу в контактній мережі під час руху електропоїзда на міжпідстанційній ділянці для традиційної системи електропостачання постійного струму. Для еквівалентної схеми на рис. 1 складемо систему з трьох лінійних рівнянь за першим та другим законами Кірхгофа, рішенням якої є значення трьох струмів

$$I_2 = \left(E_2 - \frac{E_1 - E_2}{kR} R_0 \right) \cdot \left(R(1-k) + \frac{R_0}{k} \right)^{-1}, \quad I_1 = \frac{I_2(1-k)}{k} + \frac{E_1 - E_2}{kR}, \quad I_0 = I_1 + I_2. \quad (3)$$

Із співвідношень (1) і (3) напруга на струмоприймачі

$$U = \left(E_2 - \frac{(E_1 - E_2)R_0 S}{\rho_m L} \right) \cdot \left(\frac{\rho_m L}{R_0 S} \left(1 - \frac{L}{L_0} \right) + 1 \right)^{-1} + \frac{(E_1 - E_2)R_0 S}{\rho_m L}. \quad (4)$$

Для традиційної системи електропостачання рухомого складу напруги на шини постійного струму тягових підстанцій рівні $E_1 = E_2 = E = 3300$ В. На рис. 2 показано залежність напруги на струмоприймачі рухомого складу від положення поїзда на міжпідстанційній ділянці, побудовану за співвідношенням (4).

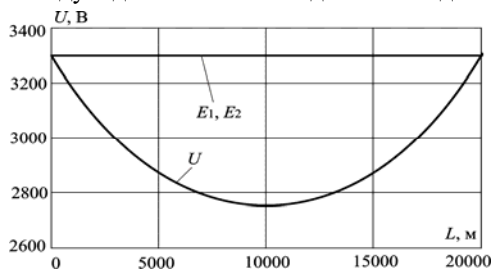


Рис. 2

Як видно з рисунка, за обраних розрахункових параметрів напруга на струмоприймачі в середній точці міжпідстанційної ділянки зменшується приблизно до 2750 В, що відповідає вимогам стандартів, які регламентують мінімальне значення напруги на рівні 2700 В [1]. Таке значне зменшення напруги в контактній мережі призводить до природного зниження швидкості руху електрорухомого складу, підтримка якої при збереженні сили тяги призведе до протікання значних струмів в якірному колі ТЕД і контактному проводі. Описаний режим, який є небажаним з точки зору експлуатації тягових електродвигунів, також призводить до додаткових втрат енергії в контактній мережі.

Способи стабілізації напруги в контактній мережі. Якщо рухомий склад забезпечений сучасним регульованим електроприводом, який дає змогу стабілізувати напругу на ТЕД, проблема протікання значних струмів при «просіданні» напруги в контактній мережі, що живиться від некерованих випрямлячів, залишається невирішеною. Одночасне вирішення двох зазначених раніше проблем можливе при стабілізації напруги на струмоприймачі рухомого складу за допомогою використання АВДН, що встановлюються на тягових підстанціях. На рис. 3 представлено залежність $E_1 = f(L)$ при фіксованому значенні $E_2 = 3300$ В, а також залежності $E_2 = f(L)$ при фіксованому значенні $E_1 = 3300$ В, побудовані відповідно до (4) при $U = U_H = \text{const} = 3000$ В.

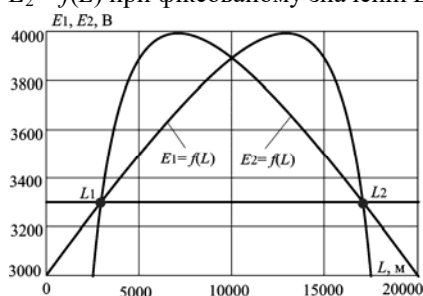


Рис. 3

Перетин кривих $E_1 = f(L)$ і $E_2 = f(L)$ при номінальній напрузі другої тягової підстанції з прямою $E = 3300$ В дає змогу визначити координати двох точок на міжпідстанційній ділянці (точки L_1 і L_2 на рис. 3), що утворюють відрізок шляху, на якому напруга на струмоприймачі електрорухомого складу буде меншою номінального значення (рис. 2 і рис. 3). Підставивши $U = \text{const} = 3000$ В у (4) за умови $E_1 = E_2 = E = 3300$ В (див. рис. 3), знайдемо корені квадратного рівняння

$$L_{1,2} = \frac{L_0}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 + \frac{4(U - E)SR_0}{\rho_m L_0 U}} \right). \quad (5)$$

Будемо здійснювати стабілізацію напруги в контактній мережі з підтримкою $U = \text{const} = 3000$ В, коли рухомий склад перебуває на ділянці $[L_1, L_2]$. Аналіз рис. 3 і співвідношення (5) дає змогу зробити висновок, що домогтися виконання умови $U = \text{const} = 3000$ В можна двома різними способами стабілізації напруги контактної мережі: «синхронним», що забезпечує однакові закони регулювання напруги двох підстанцій, і «асинхронним», що забезпечує різні закони регулювання.

Найбільш оптимальною траєкторією, яка синхронізує роботу двох тягових підстанцій на ділянці $[L_1, L_2]$, є параболічна крива, що проходить через три точки: $A(L_1, E)$, $B(L_2, E)$, $C(L_0/2, E_m)$, де E_m – вершина параболі, ордината якої відповідає максимально можливому значенню напруги на ділянці стабілізації $[L_1, L_2]$. Рівняння траєкторії регулювання

$$U(L) = aL^2 + bL + c, \quad (6)$$

коефіцієнти якого знаходяться розв'язуванням системи трьох лінійних рівнянь

$$b = (E_m - E) \cdot \frac{4L_0}{L_0^2 - 4L_1L_2}, \quad c = E - b \frac{L_1L_2}{L_0}, \quad a = \frac{E - bL_1 - c}{L_1^2}, \quad (7)$$

де
$$E_m = (U - E) \cdot \left(1 - L_0^2 / 4L_1L_2\right) + E. \quad (8)$$

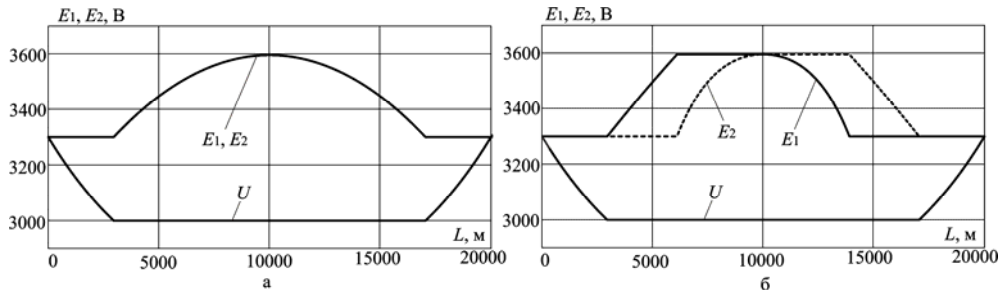


Рис. 4

На рис. 4, а показано траєкторію регулювання напруг на виході тягових підстанцій, побудовану за співвідношенням (6)–(8), і відповідну їй криву напруги на струмоприймачі рухомого складу. З рисунка видно, що розрахована траєкторія регулювання забезпечує

номінальне значення напруги на струмоприймачі на всьому інтервалі стабілізації $[L_1, L_2]$.

«Асинхронний» спосіб регулювання описується алгоритмом, що впливає з аналізу кривих на рис. 3: фіксуємо значення $E_1 = E_2 = 3300$ В на ділянці шляху, де $U > U_H$; у момент $U = U_H$ починаємо лінійно збільшувати напругу E_1 за співвідношенням (4), поки E_1 не досягне значення E_m ($E_1 = E_m$); в момент $E_1 = E_m$ фіксуємо E_1 і починаємо регулювати E_2 за траєкторією, що описується співвідношенням (4), до моменту виконання рівності $E_2 = E_m$. За умовою це станеться у середній точці міжпідстанційної ділянки $L = L_0/2$; фіксуємо $E_2 = E_m$ і регулюємо E_1 вниз за співвідношенням (4) до моменту виконання рівності $E_1 = 3300$ В; у момент $E_1 = 3300$ В фіксуємо E_1 і регулюємо E_2 за співвідношенням (4) до моменту виконання рівності $E_2 = 3300$ В; у момент $E_2 = 3300$ В фіксуємо E_2 .

Траєкторії регулювання напруги двох тягових підстанцій, що описуються представленим алгоритмом, і відповідну їм криву напруги на струмоприймачі рухомого складу показано на рис. 4, б.

Аналіз рис. 4, а і рис. 4, б доводить можливість забезпечення $U = U_H$ на струмоприймачі рухомого складу двома різними способами. Енергоефективність запропонованих способів стабілізації можна оцінити порівнянням енергетичних показників системи електропостачання рухомого складу, що відповідають кожному з них. У таблиці представлено результати розрахунку енергетичних показників трьох досліджуваних випадків роботи системи електричної тяги, відповідних прийнятим раніше характеристикам системи.

Показник	Спосіб стабілізації напруги		
	без стаб.	«синхр.»	«асинхр.»
Середня в інтервалі руху напруга на струмоприймачі, U_{AV} , В	2922	3040	3040
Середня в інтервалі руху напруга на шинах тягових підстанцій, U_{AV} , В	3300	3439	3422
Середнє в інтервалі руху значення струму в тяговій мережі, I_{AV} , А	942	905	905
Середнє в інтервалі руху значення струму ТЕД, I_{oAV} , А	1885	1810	1810
Середня в інтервалі руху потужність тягової мережі, P_{AV} , кВт	6304	6220	6232
Середня в інтервалі руху потужність втрат, ΔP_{AV} , кВт	789	714	726
Середній в інтервалі руху ККД, η_{AV}	0.873	0.885	0.884
Споживана в інтервалі руху енергія, W , кВт-год	2589	2554	2559
Втрати енергії в інтервалі руху, ΔW , кВт-год	328	293	298

Висновки. Аналіз отриманих у роботі результатів дає змогу оцінити межі підвищення ККД і зниження потужності втрат при використанні двох способів стабілізації напруги на струмоприймачі рухомого складу – «синхронного» і «асинхронного». Так, при русі з постійною швидкістю на двадцятикілометровій міжпідстанційній ділянці електровоза ВЛ10К, тягові двигуни якого працюють у годинному режимі, «синхронний» спосіб стабілізації напруги на струмоприймачі дає змогу збільшити ККД контактної мережі на 1.18 %. Слід зазначити, що загальний ККД системи електропостачання рухомого складу збільшиться ще на кілька відсотків за рахунок практичного виключення реактивної потужності та вищих гармонік мережевого струму, а також зменшення втрат в АВДН внаслідок зниження середнього в інтервалі руху значення струму в тяговій мережі. Основний техніко-економічний ефект при використанні запропонованих способів стабілізації напруги на струмоприймачі рухомого складу полягає у забезпеченні сприятливого теплового режиму роботи тягових і допоміжних електродвигунів, за яких не відбувається перегріву і зношення їхніх конструктивних елементів, а швидкість руху на міжпідстанційній ділянці та сила тяги, що розвивається тяговими електродвигунами, залишаються незмінними.

1. Інструкція ЦЕ0009. Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України. Київ: Швидкий рух, 2005, 80 с.
2. Косарев Є.М. Регулювання напруги в контактній мережі електрифікованих залізниць постійного струму. *Електрифікація транспорту*. 2015. № 9. С. 37-43.
3. Плахтий А.А. Обзор схем трехфазных активных выпрямителей с коррекцией коэффициента мощности для тяговых подстанций постоянного тока. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків: УкрДАЗТ. 2013. Вип. 142. С. 144-150.
4. Потребление электроэнергии в Украине за 11 мес. 2017 г. увеличилось на 0.8%. *Енергетика України*. URL : <http://uaenergy.com.ua> (дата звернення 16.01.2018).
5. Тер-Оганов Э.В., Пышкин А.А. Электроснабжение железных дорог. Екатеринбург: УрГУПС, 2014. 432 с.

УДК 621.314

СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Д.В. Тугай¹, докт.техн.наук, Г.Г. Жемеров², докт.техн.наук

¹ – Харьковський національний університет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова,
ул. Маршала Бажанова, 17, Харьков, 61002, Украина, e-mail: tugaydmytro@gmail.com

² – Национальный технический университет «ХПИ»,
ул. Кирпичова, 2, Харьков, 61002, Украина., e-mail: zhemerov@gmail.com

Обоснована возможность увеличения коэффициента полезного действия контактной сети постоянного тока за счет использования активных выпрямителей – источников напряжения в силовом оборудовании тяговых подстанций для стабилизации напряжения на токоприемнике электроподвижного состава. Получены расчетные формулы, позволяющие определять траектории стабилизации напряжения на токоприемнике подвижного состава в зависимости от положения электропоезда на межподстанционном участке, для двух способов стабилизации – «синхронного» и «асинхронного». Библи. 5, рис. 4, табл. 1.

Ключевые слова: стабилизация напряжения, контактная сеть, токоприемник, коэффициент полезного действия.

THE OVERHEAD LINE VOLTAGE STABILIZATION TO INCREASE THE EFFICIENCY OF THE DC ELECTRIC RAIL TRACTION SYSTEM

D.V. Tugay¹, G.G. Zhemerov²

¹ – O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv,
str. Marshal Bazhanov, 17, Kharkiv, 61002, Ukraine, e-mail: tugaydmytro@gmail.com

² – National Technical University Kharkov Polytechnic Institute,
str. Kirpichova, 2, Kharkiv, 61002, Ukraine, e-mail: zhemerov@gmail.com

The possibility of increasing the efficiency of the DC electric rail traction system due to the use of active rectifiers – voltage sources on traction substations for voltage stabilization on the electric rolling stock pantograph is substantiated. The calculation formulas allowing determining the trajectories of the voltage stabilization on the rolling stock pantograph depending on the position of the electric train are obtained. These formulas allow us to determine for the two stabilization methods – «synchronous» and «asynchronous». References 5, figures 4, table 1.

Key words: voltage stabilization, overhead line, pantograph, efficiency.

1. Instruction CE0009. Rules for the arrangement of the traction power supply system of the railways of Ukraine. Kyiv: Shvydkyi rukh, 2005. 80 p. (Ukr)
2. Kosaryev Ye.M. Voltage control in a contact network of DC electrified railways. *Elektryfikatsiia transportu*. 2015. No 9. Pp. 37-43. (Ukr)
3. Plakhtiy A.A. Three-phase active rectifiers with power factor correction for DC traction substation. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoi derzhavnoi akademii zaliznychnoho transportu*. 2013. Iss. 142. Pp. 144-150. (Rus)
4. Electricity consumption in Ukraine for 11 months 2017 increased by 0.8%. *Energetika Ukrainy*. URL : <http://uaenergy.com.ua> (date of the application 16.01.2018). (Rus)
5. Ter-Oganov E.V., Pyshkin A.A. Electricity supply of railways. Yekaterinburg: UrGUPS, 2014. 432 p. (Rus)

Надійшла 02.03.2018
Остаточний варіант 24.04.2018