

УДК 621.31

АНАЛІЗ СХЕМ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Канд. техн. наук Д. Л. Сушко, магістрант С. С. Хатнянський

АНАЛИЗ СХЕМ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Канд. техн. наук Д. Л. Сушко, магистрант С. С. Хатнянский
ANALYSIS OF SCHEME OF COMPENSATION OF REACTIVE POWER IN THE SYSTEM OF TRACTION POWER SUPPLY

PhD (Tech.) D. L. Sushko, master S. S. Khatnianskyi

У статті проаналізовано існуючі способи і системи компенсації реактивної потужності в системі тягового електропостачання. Проблема компенсації реактивної потужності завжди посідала важливе місце у формуванні енергетичної ефективності електричної тяги. Тому для підвищення ефективності роботи пристроїв компенсації їх потужність повинна бути регульована залежно від значення тягового навантаження. З появою потужних високовольтних повністю керованих приладів типу IGBT почалося впровадження нового типу пристроїв, які називають СТАТКОМ.

Ключові слова: компенсація реактивної потужності, енергозбереження, система тягового електропостачання, тиристорний компенсатор, СТАТКОМ.

В статье проведен анализ существующих способов и систем компенсации реактивной мощности в системе тягового электроснабжения. Проблема компенсации реактивной мощности всегда занимала важное место в формировании энергетической эффективности электрической тяги. Поэтому для повышения эффективности работы устройств компенсации их мощность должна быть регулируемой в зависимости от значения тяговой нагрузки. С появлением мощных высоковольтных полностью управляемых приборов типа IGBT началось внедрение нового типа устройств, которые называют СТАТКОМ.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, энергосбережения, система тягового электроснабжения, тиристорный компенсатор, СТАТКОМ.

The article analyzes the existing methods and systems of reactive power compensation in the traction power supply system. The problem of reactive power compensation has always occupied an important place in shaping the energy efficiency of electric traction. Therefore, to increase the efficiency of the compensation devices, their power should be adjustable depending on the value of the tractive load.

Depending on the methods of regulation, a step-by-step control scheme with several sections of a capacitor bank and a smooth control with a thyristor control unit, a static thyristor compensator (STK), is considered.

With the advent of powerful high-voltage fully controlled IGBT devices, the introduction of a new type of device began, which is called STATCOM (static synchronous reactive power compensator), whose task is to improve the quality of electricity and increase the efficiency of its transmission and distribution systems by compensating reactive power, regulating voltage and increasing stability of the power systems.

In the case of direct connection of STATCOM to networks of the middle class of voltage, multi-level converters are used. Each individual output voltage is generated using PWM modulation with a switching phase shift for each bridge. One of these converters is an H-bridge based converter. An important advantage of this configuration is its modularity, which makes it easy to scale STATCOM when switching to different voltage levels and facilitates the operation and maintenance of the electrical installation.

Keywords: reactive power compensation, energy saving, traction power supply system, thyristor compensator, STATCOM.

Вступ. Проблема компенсації реактивної потужності (КРП) завжди посідала важливе місце в загальному комплексі питань підвищення ефективності передачі, розподілу та споживання електричної енергії. Правильне вирішення таких завдань значною мірою приводить не тільки до підвищення якості електропостачання, а також і до економії грошових і матеріальних ресурсів. Питання про компенсацію реактивної потужності повинно розглядатися з огляду на сучасні погляди і новітні технічні розробки в галузі електропостачання.

Мінімізація втрат електроенергії в тяговій мережі є цільовим завданням участі системи тягового електропостачання (СТЕ) у формуванні енергетичної ефективності електричної тяги в цілому [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У тяговій мережі змінного струму магістральних залізниць реактивна потужність споживається електровозами

змінного струму, коефіцієнт потужності яких залежить від режиму роботи електровоза (у режимі тяги $\cos\varphi = 0,5-0,85$; у режимі рекуперативного гальмування $\cos\varphi = 0,25-0,55$). На міжпідстанційній зоні відповідно до графіка руху переміщуються декілька парних і непарних поїздів, що є причиною зміни споживання реактивної потужності в часі в різних точках ділянки [4, 5, 9].

Активним заходом підвищення $\cos\varphi$ є установлення в мережах батарей статичних конденсаторів, тобто компенсувальних пристроїв (КП) [2, 3, 5, 8].

На рис. 1 подана схема та векторна діаграма, які пояснюють принцип компенсації реактивної потужності.

При встановленні у споживача КП, який віддає в мережу реактивну потужність q_k , величина реактивної потужності, що передається по лінії, зменшується, завдяки чому $\cos\varphi$ зростає. У цьому легко переконатися з діаграми (рис. 1, б).

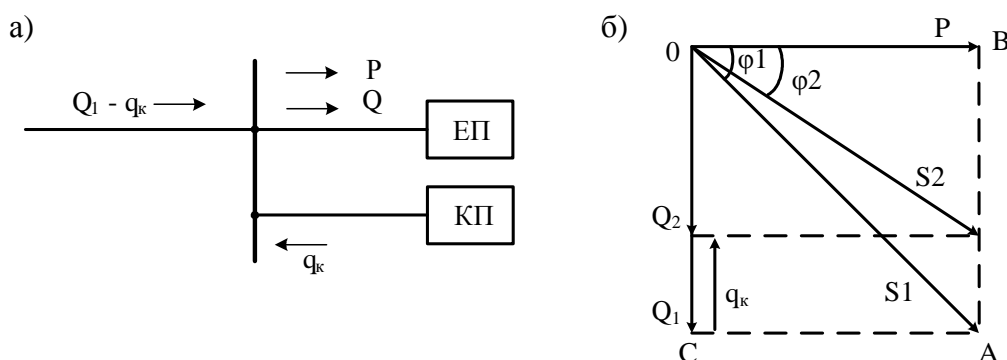


Рис. 1. Схема електропередачі (а) та векторна діаграма компенсації потужності (б)

До компенсації потужність зображається трикутником OAB, де вектор $OB = P$ означає задану активну потужність споживача, а вектор $AB = OC = Q_1$ відповідає реактивній потужності споживача. Потужність КП, потрібна для підвищення $\cos\varphi$ від його початкового значення $\cos\varphi_1$ до бажаного $\cos\varphi_2$, легко визначити з діаграми [3].

Реактивна потужність до штучної компенсації становить $Q_1 = P \operatorname{tg}\varphi_1$, де $\operatorname{tg}\varphi_1$ відповідає $\cos\varphi_1$. Після компенсації її величина буде

$$Q_2 = P \operatorname{tg}\varphi_2. \quad (1)$$

Отже, потужність компенсуючого пристрою

$$Q_k = Q_1 - Q_2 = P(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2). \quad (2)$$

За отриманою за цією формулою потужністю КП вибирають найближчу стандартну за каталогами [2, 3].

Визначення мети та задачі дослідження. Аналіз існуючих способів і систем компенсації реактивної потужності в системі тягового електропостачання, які дадуть змогу забезпечити енергозбереження та економічність процесу перевезень, а також ефективність застосування статичних регульованих компенсаторів реактивної потужності в системах тягового електропостачання залізниць.

Основна частина дослідження. Відомо [5, 7], що компенсація реактивної потужності спрямована переважно на економію (зменшення втрат) при експлуатації тягових мереж і одночасно на поліпшення якості напруги.

Для оцінки величини реактивної потужності зазвичай використовується один з двох коефіцієнтів:

– коефіцієнт потужності $\cos\varphi = P/S$;

– коефіцієнт реактивної потужності $\operatorname{tg}\varphi = Q/P$.

Зв'язок між цими коефіцієнтами:

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\varphi}}. \quad (3)$$

Споживання реактивної потужності (РП) призводить до таких негативних явищ:

– збільшення струму в мережі:

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{U} = \frac{P}{Q} \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\varphi}; \quad (4)$$

– збільшення втрат активної потужності:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R = \frac{P^2}{U^2} \cdot R \cdot (1 + \operatorname{tg}^2\varphi). \quad (5)$$

Крім низького значення коефіцієнта потужності, особливістю тягового електропостачання також є генерація ЕРС вищих гармонік струму в тяговій мережі. Гармоніки струму 150, 250, 350 Гц тягової мережі відповідно дорівнюють 25, 8, 3 % від основної гармоніки струму ЕРС, вони проникають у мережі 110 (220) кВ і створюють негативні наслідки.

Покращення режиму напруг і компенсації реактивної потужності можна досягти за допомогою використання установок поздовжньої (ПЄК) і поперечної (ПК) ємнісної компенсації [2, 3, 7].

Установки поздовжньої (ПЄК) і поперечної (ПК) компенсації в системі тягового електропостачання залізниць вирішують багато завдань: підвищують пропускну спроможність залізниць, забезпечуючи підвищення рівня напруги; знижують втрати електроенергії, забезпечуючи енергозбереження; підвищують ефективність роботи електрообладнання, покращуючи якість електроенергії, і в цілому покращують електромагнітну сумісність тягових мереж. Установки поперечної і поздовжньої ємнісної компенсації вмикаються на тягових підстанціях і на постах секціонування тягової мережі змінного струму.

Найбільший ефект у тяговій мережі дає вмикання ПК всередині міжпідстанційної зони на посту секціонування [4, 5, 9]. Для запобігання резонансним явищам послідовно з конденсаторною батареєю вмикають реактор, індуктивність якого вибирають так, щоб коло, яке утворилося, було налаштоване на частоту третьої гармоніки тягового струму (150 Гц). У цьому випадку установка буде мати ємнісний характер при основній частоті й індуктивний – для гармонік тягового струму вище третьої. Тому виключається можливість виникнення резонансних коливань не тільки на частоті третьої, але й гармонічних складових більш високого порядку [2, 3].

Специфікою тягового навантаження є його непостійність у зв'язку зі зміною режиму роботи ЕРС, його переміщенням і зміною величини ЕРС на міжпідстанційній зоні. Це приводить до зміни в часі графіка споживання реактивної потужності ЕРС. Для нормалізації режиму напруги і зниження втрат електроенергії потужність, яку генерує ПК, повинна відповідати споживаній.

Тому для підвищення ефективності роботи пристроїв поперечної ємнісної компенсації їх потужність повинна бути регульованою залежно від значення тягового навантаження [4–6].

Залежно від способів регулювання розглянемо такі групи перспективних регульованих КП для тягового електропостачання:

- ступінчастий регульований КП з декількома секціями конденсаторних батарей, які перемикаються;

- плавно регульована установка КП з нерегульованою конденсаторною батареєю і з паралельно увімкненим реактором, який регулюється тиристорним блоком.

Регульовані КП ступеневого типу складаються з декількох секцій. Залежно від регульованого параметра (напруга, струм, реактивна потужність тощо) в них вмикається і вимикається чергова секція

(рис. 2, а, КП1, КП2, КП3). У кожену секцію входять: конденсаторна батарея С, реактор LR і головний вимикач Q1 з демпфувальним ланцюгом Q2-R [5].

У схемах КП з регульованими реакторами (рис. 2, б) сумарна потужність КП при паралельному вмиканні регульованого реактора LRP і конденсаторної батареї С з реактором LR дорівнює різниці їх потужностей. Якщо зазначені потужності рівні, то КП практично не генерує реактивну потужність. При регулюванні LRP зі зменшенням його потужності КП збільшує генерацію реактивної (ємнісної) потужності в мережі [5].

Більший інтерес становить схема (рис. 2, в) з реактором, регульованим за допомогою тиристорів, так звані статичні тиристорні компенсатори (СТК). Збільшуючи кут регулювання тиристорів від 0 до $\pi/2$, змінюють величину струму, що протікає через реактор, від номінального значення до нуля [5, 7, 8, 10].

Замість реактора може застосовуватися реактор-трансформатор для зниження напруги на комутованих тиристорах (рис. 2, г). Також відомі схеми з вмиканням конденсаторної батареї і СТК через знижувальний трансформатор, що забезпечує можливість роботи тиристорів на зниженій напрузі.

Одна з основних характеристик СТК полягає в тому, що кількість реактивної потужності, яка взаємозамінюється з системою, залежить від прикладеної напруги. При номінальній напрузі СТК представляє лінійну характеристику, яка обмежена номінальною потужністю конденсатора і реактора відповідно. За цими межами характеристика не є лінійною, що є одним з основних недоліків цього типу компенсатора [8].

З появою потужних високовольтних приладів типу IGBT почалося впровадження нового типу пристроїв, які називають СТАТКОМ (статичний синхронний компенсатор реактивної потужності), завданням яких є поліпшення

якості електроенергії та підвищення ефективності систем її передачі і розподілу за рахунок компенсації реактивної

потужності, регулювання напруги та підвищення стійкості роботи енергосистем [7, 8, 10].

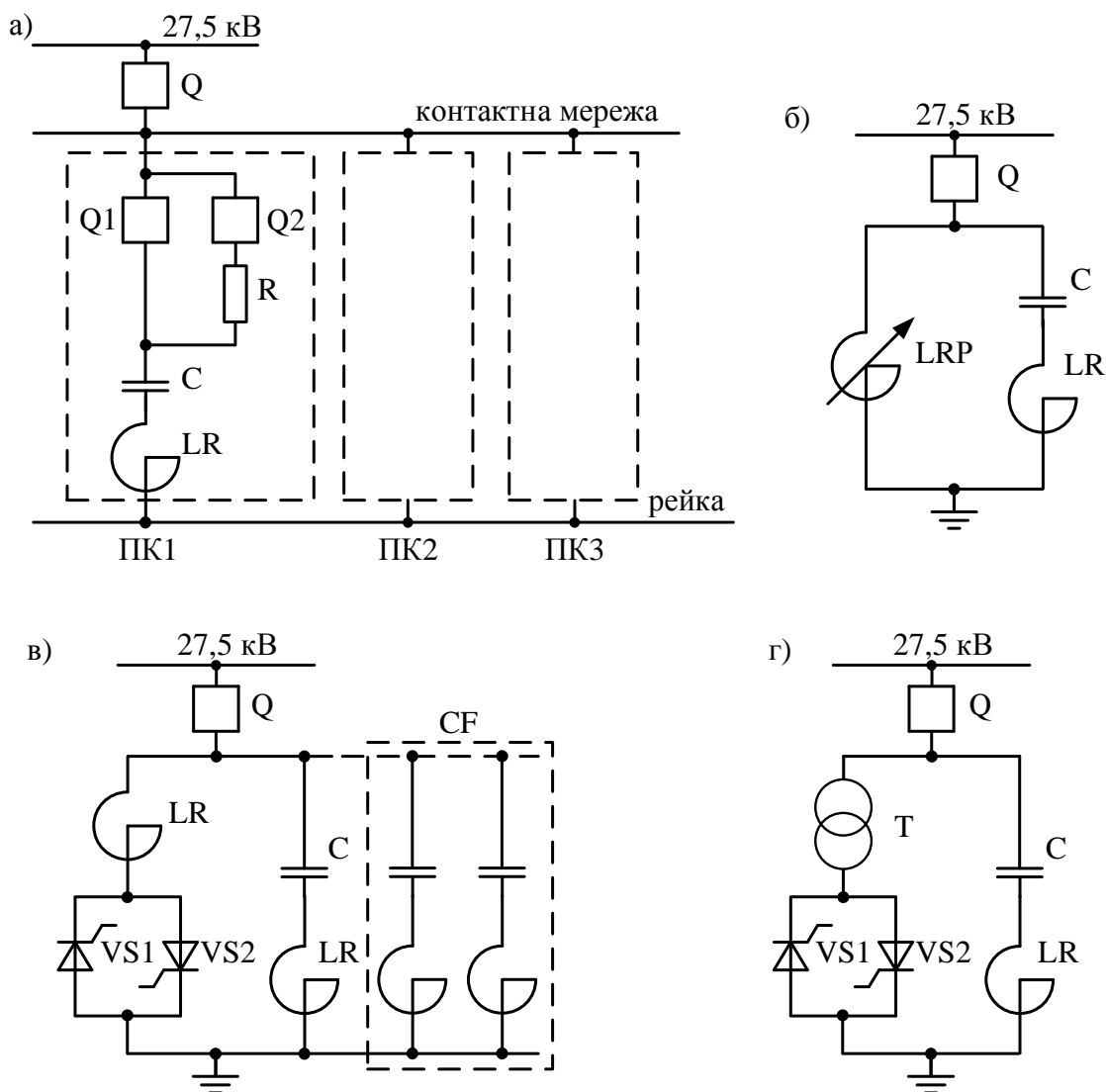


Рис. 2. Схеми регульованих КП з реактором

СТАТКОМ являє собою інвертор струму, підключений через індуктивний реактор до мережі (рис. 3) [8].

Рис. 3, б показує, яким повинен бути струм СТАТКОМ i_k , щоб при споживанні всіма електроприймачами (ЕП) несинусоїдального струму i_n з мережі споживався синусоїдальний струм $i_{n(1)}$, що передає ту ж активну потужність.

Струм компенсатора $i_k = i_{n(1)} - i_n$. Визначаючи споживану реактивну

потужність у системі, СТАТКОМ може видавати рівну і протилежну за знаком реактивну потужність, забезпечуючи тим самим динамічну компенсацію реактивної потужності.

У разі прямого (безтрансформаторного) підключення СТАТКОМ до мереж застосовують каскадні багаторівневі перетворювачі [7, 8, 10].

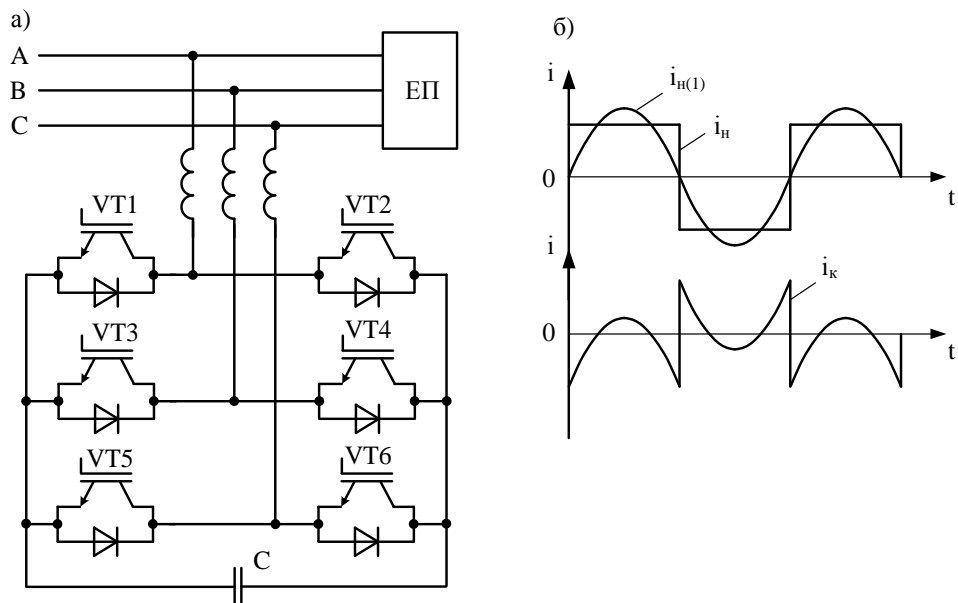


Рис. 3. Схема підключення СТАТКОМ до мережі (а) та діаграми струмів (б)

Цей перетворювач будується з послідовно з'єднаних силових модулів (рис. 4, а). Кожний модуль є інвертор, побудований за схемою Н-моста, і має власний конденсатор (рис. 4, б). Для каскадного багаторівневого інвертора повна вихідна напруга є сумою вихідних напруг окремих модулів Н-мостів. Кожна окрема вихідна напруга формується з

використанням широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) модуляції із зсувом фази комутації для кожного моста.

На рис. 4, в наведено графік вихідної напруги в одному колі, що складається з 6 блоків. Навіть при такій кількості модулів форма напруги близька до синусоїди, а зі збільшенням їх числа кількість сторонніх гармонік у сигналі різко скорочується.

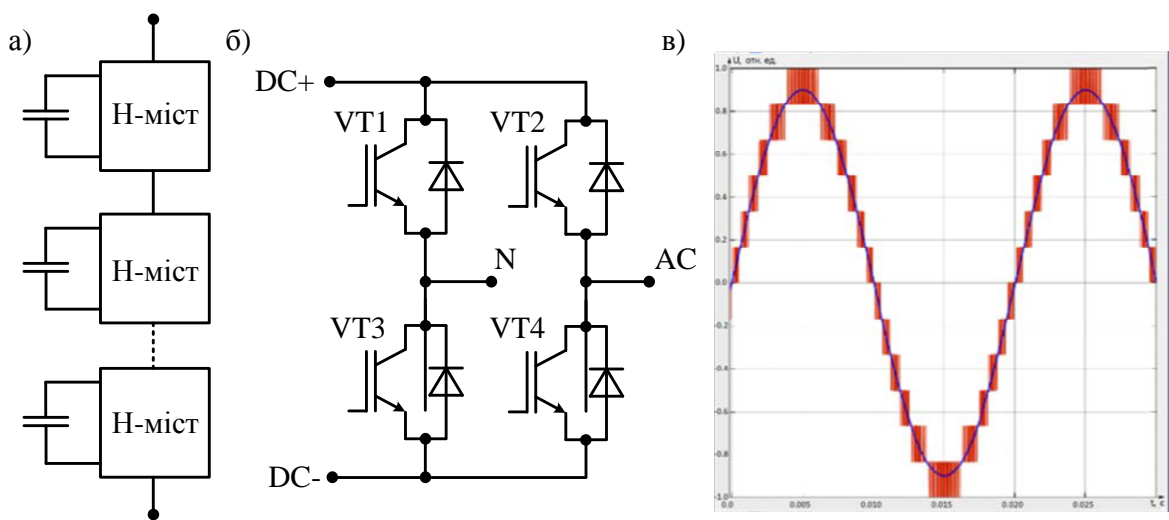


Рис. 4. Схема багаторівневого перетворювача (а), силового модуля (б) та діаграма вихідної напруги СТАТКОМ

Висновки. Проведений аналіз способів і систем компенсації реактивної потужності в системі тягового електропостачання показує, що подальше підвищення якості електроенергії та енергоефективності можливе завдяки переходу від нерегульованих КП до регульованих залежно від значення тягового навантаження, які дадуть змогу забезпечити енергозбереження та економічність процесу перевезень.

Порівняно з СТК й іншими традиційними пристроями компенсації

реактивної потужності СТАТКОМ має ряд переваг: кращі динамічні характеристики; можливість підтримки номінального емнісного вихідного струму при низькій напрузі системи, що у свою чергу забезпечує більш високу динамічну стійкість передачі порівняно з СТК; завдяки високій частоті перемикання приладів СТАТКОМ може здійснювати активну фільтрацію гармонічних струмів навантаження; вимагає менше місця для установки (приблизно у два рази порівняно з СТК).

Список використаних джерел

1. Енергетична стратегія Укрзалізниці на період до 2015 р. і на перспективу до 2020 р. [Текст] : затв. державною адміністрацією залізничного транспорту України 26.11.2013 р. – К. : Укрзалізниця, 2013. – 104 с.
2. Марквард, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквард. – М. : Транспорт, 1982. – 528 с.
3. Акімов, О. І. Електричні мережі електрифікованих залізниць [Текст] : навч. посібник / О. І. Акімов, Д. Л. Сушко. – Харків : УкрДАЗТ, 2012. – 229 с.
4. Доманский, И. В. Режимы работы системы тягового электроснабжения переменного тока с устройствами компенсации реактивной мощности [Текст] / И. В. Доманский // Электротехника і електромеханіка. – 2015. – № 3. – С. 59-66.
5. Герман, Л. А. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог [Текст] : учеб. пособие / Л. А. Герман, А. С. Серебряков. – М. : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. – 316 с.
6. Солонина, Н. Н. Новые технологии компенсации реактивной мощности [Текст] / Н. Н. Солонина, К. В. Суслов, З. В. Солонина // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2016. – № 5. – С. 135-143.
7. Dixon, J.W. A Full Compensating System for General Loads, Based on a Combination of Thyristor Binary Compensator, and a PWM-IGBT Active Power Filter [Text] / J.W. Dixon, Valle Y. Del, M. Orchard, M. Ortu'zar, L. Mora' n, C. Maffrand // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2003. – V. 50. – № 5. – P. 982–989.
8. Dixon, J. Reactive Power Compensation Technologies: State of the Art Review [Text] / J. Dixon, L. Morán, J. Rodríguez, R. Domke // Proceedings of the IEEE. – 2003. –V. 93. № 12. – P. 2144 – 2164.
9. Москалев, Ю. В. Определение места размещения и мощности компенсирующего устройства в системе тягового электроснабжения переменного тока двухпутного участка по минимуму потерь активной мощности [Текст] / Ю. В. Москалев, Г. Г. Ахмедзянов // Известия Транссиба. – 2016. – №2(26). – С. 100-107.
10. Shahnian, F. Static Compensators (STATCOMs) in Power Systems [Text] / F. Shahnian, S.Rajakaruna, A. Ghosh. – Singapore: Spring, 2014. – 600 p.

Сушко Дмитро Леонідович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (066) 121-60-10. E-mail: dimals80@i.ua.

Хатнянський Сергій Сергійович, магістрант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (050) 026-98-47.
E-mail: sergej.hatniansky@yandex.ru.

Сушко Дмитрий Леонидович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (066) 121-60-10. E-mail: dimals80@i.ua.

Хатнянский Сергей Сергеевич, магистрант кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел. (050) 026-98-47.
E-mail: sergej.hatniansky@yandex.ru.

Sushko Dmitriy Leonidovich, PhD (Tech.), associate professor, Department of Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (066) 121-60-10.
E-mail: dimals80@i.ua.

Khatnianskyi Serhii Serhiiiovych, master, Department of Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (050) 026-98-47.
E-mail: sergej.hatniansky@yandex.ru.

Статтю прийнято 13.11.2018 р.