

УДК 629.4.027

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.173.2017.118423>

ПЕРСПЕКТИВА РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПІДВИЩЕНОЇ НАПРУГИ

Канд. техн. наук П. О. Харламов, магістрант А. В. Федоров,
старш. викл. О. М. Харламова, викл. О. А. Дзюба

ПЕРСПЕКТИВА РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОВЫШЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Канд. техн. наук П. А. Харламов, магистрант А. В. Федоров,
старш. препод. Е. Н. Харламова, препод. Е. А. Дзюба

THE PROSPECT OF THE DEVELOPMENT OF THE ELECTRIC TRACTION SYSTEM OF DC HIGH VOLTAGE

Cand. of techn. sciences P. Kharlamov, master student A. Fedorov,
senior lecturer O. Kharlamova, lecturer O Dziuba

Залізниці країн СНД здебільшого електрифіковані на постійному струмі при напрузі в контактній мережі 3 кВ. Однак така напруга не є оптимальною ані для обладнання електропостачання, ані для електрорухомого складу. Вона є компромісною та обумовлена вартістю втрат енергії в такій системі й вартістю її обладнання. Підвищення ж напруги в контактній мережі постійного струму в кілька разів дасть змогу суттєво поліпшити техніко-економічні показники системи тяги постійного струму. Нові можливості щодо цього відкриває застосування систем імпульсного перетворення енергії, що усувають безпосередній зв'язок між напругами контактної мережі й тягових двигунів.

Ключові слова: електрифікація, тяга, струм, напруга.

Большинство железных дорог СНГ электрифицировано на постоянном токе при напряжении в контактной сети 3 кВ. Однако такое напряжение не является оптимальным ни для устройств электроснабжения, ни для электроподвижного состава. Оно представляет собой компромиссное решение, определяемое стоимостью потерь энергии в такой системе и стоимостью ее устройств. Повышение же напряжения в контактной сети постоянного тока позволит повысить напряжение в контактной сети в несколько раз, т. е. существенно улучшить технико-экономические показатели системы тяги постоянного тока. Новые возможности в этом отношении открывает применение систем импульсного преобразования энергии, устраняющих непосредственную связь между напряжениями контактной сети и тяговых двигателей.

Ключевые слова: электрификация, тяга, ток, напряжение.

The majority of CIS railways are electrified on DC with a voltage in the contact network of 3 kV. However, such a voltage is not optimal either for power supply devices or for electric rolling stock. It is a compromise solution, determined by the cost of energy losses in such a system and the cost of its devices. An increase in the voltage in the contact network of a direct current, for example, up to 6 or 12 kV or more, in order to reduce the energy losses in the system under the existing principles of regulating the operating conditions of the emitter. p.s. leads to a significant increase in the cost of electrical equipment and traction engines. It is characteristic that the noted shortcomings of the DC traction system of 3 kV are due to the fact that there is a direct electrical connection between the voltage of the contact network and the voltage of the traction electrical equipment. If this connection is eliminated and it is possible to regulate voltages on traction engines within wide limits, it will be possible to increase the voltage in the contact network several times to significantly improve the technical and economic performance of the DC traction system. New possibilities in this respect are opened by the use of pulsed energy conversion systems, which eliminate the direct connection between the voltages of the contact network and traction motor. The use of thyristor control of the operating modes of traction motors allows smoothly adjusting in a wide range the voltage applied to the traction motors, regardless of the voltage in the contact network. Perspective are systems in which brushless motors are used as traction motors - asynchronous or synchronous (gate valves). If the DC link traction system raises the voltage in the contact network by 2-3 times, then when using the thyristor control of the traction engine operation, in addition to saving energy during start-up, reducing the number of control equipment, the cost of construction and operation of the power supply system will decrease.

Keywords: electrification, traction, current, voltage.

Вступ. Удосконалені схеми силової електроніки забезпечують переваги для електричних мереж залізниць. Сьогодні у світі співіснують дві принципово різні системи електрифікації залізниць: системи постійної напруги (в основному на 3 кВ (DC) і 1,5 кВ (DC)) та однофазні системи змінної напруги (в основному 25 кВ при 50 або 60 Гц і 15 кВ при 16/2/3 Гц). Електричні локомотиви для систем живлення постійного струму демонструють більш просте електроустаткування з тяговою машиною постійного струму, а

також трифазними тяговими машинами змінного струму (найчастіше індукційними машинами, ніж синхронними), без проблем з асиметричним навантаженням трифазного живлення, але мають очевидні обмеження на потужність через низьку напругу в контактній мережі. Тому питання, пов'язані з можливістю використання підвищеної напруги в системах постійного струму, носять актуальний характер, особливо з погляду високошвидкісного руху.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У шістдесяті роки минулого століття

в Росії були проведені випробування тиристорно-конденсаторних систем для електрифікації [1, 2]. У сімдесяті роки випробування проводилися в Італії [3] з DC 6 кВ. Однак цей досвід не сприяв появі нової концепції електровозів постійного струму через тогочасний брак потужних ізольованих транзисторів з ізольованим затвором і біполярних транзисторів. Тому найбільш потужні електровози були розроблені для однофазних систем електропостачання змінного струму з номінальною напругою 25 кВ (RMS) відповідно 15 кВ (RMS). Подальше збільшення потужності обмежується ростом обсягу й маси однофазного трансформатора на такому електровозі. Наявність потужних високовольтих IGBT-Транзисторів дала змогу побудувати електроустаткування електровоза змінного струму без низькочастотного важкого трансформатора (50 або 16 2/3 Гц), замінивши його на трансформатори середньої частоти (400 Гц) [4] або (відносно) високої частоти (18 кГц) [5]. Тепер збільшення потужності майбутнього електровоза не обмежується вагою й габаритами трансформатора. Трансформатор, однак, був лише засобом забезпечення інтерфейсу між високою напругою передачі й значно меншою напругою навантаження та виконавчим механізмом для керування швидкістю й потужністю, дозволяючи прості зміни напруги навантаження за допомогою трансформаторних відгалужень, що використовувалися на старих локомотивах.

Сучасні конструкції без трансформатора можливі завдяки спеціальним силовим електронним схемам. Загальні вимоги – це висока вхідна напруга в широкому діапазоні й досить плавні струми, а також можливість рекуперації. Нові технічні рішення без трансформаторів для знижувальних або підвищувальних Dc-Dc-перетворювачів дають змогу збільшити потужність електровозів з використанням постійного струму завдяки зростанню

напруги в контактній мережі значно вище 3 кВ.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є визначення технічних аспектів використання систем постійного струму з підвищеним рівнем напруги в контактній мережі до 24 кВ, що дає принципову можливість забезпечити якісне струмознімання при високошвидкісному русі.

Основна частина дослідження. При швидкісному (200-250 км/год) і високошвидкісному (300 км/год і вище) русі потужність, реалізована тяговими двигунами поїзда, практично дорівнює потужності, що реалізується електровозами великовагового поїзда. При високошвидкісному русі поїздів значно підвищуються тягові навантаження у дротах контактної мережі, тому вважається, що для цього швидкісного режиму необхідна система змінного струму. Проте досвід експлуатації системи електропостачання змінного струму 25 кВ, 50 Гц, застосованої на 24,49 тис. км експлуатаційної довжини, показав, що електрична тяга на змінному струмі викликала нові проблеми: підвищений електромагнітний вплив через з'єднання змінного магнітного поля, асиметричне навантаження фаз живильної 3-фазної мережі, більш складна конструкція електрорухомого складу.

Перспективним напрямом слід вважати створення системи постійного струму високої напруги (до 6 МВт і вище) без істотного збільшення перерізу дротів контактної мережі й без зменшення відстаней між підстанціями. Це досягається завдяки підвищенню напруги мережі. У 1960-ті роки розроблялася система тяги напругою постійного струму 6 кВ [2]. Експериментальна експлуатація електровозів серії EP2 Ризького вагонобудівного заводу (Rīgas Vagonbūves Rūpnīca), модернізованих під цю систему, відбувалася на дослідній ділянці Горі — Цхінвалі. Однак ефективнішою була визнана система тяги на однофазній змінній

напрузі 25 кВ промислової частоти. Водночас на всіх типах вітчизняних електровозів застосовувалися, як правило, спеціалізовані тягові електродвигуни постійного (пульсуючого) струму (ТДП). У системі тяги змінної напруги вони живилися від ртутних, а потім і від напівпровідникових випрямлячів. На низці вітчизняних залізниць застосовується складніша схема електропостачання 2×25 кВ, з додатковим живленням контактної мережі перегонів зі стандартною напругою 25 кВ від автотрансформаторів, що розташовані поруч із залізничним полотном і підключені до мережі 50 кВ. Така схема дає можливість збільшити відстань між тяговими підстанціями удвічі й більше. У Європі створювалися системи тяги на постійному й змінному струмі, включаючи навіть системи тяги на трифазних АТД із трифазною схемою живлення й дводровою контактною мережею. Згодом у Німеччині, Австрії, Швеції й Швейцарії набула поширення система тяги однофазної змінної напруги 15 кВ зниженої частоти 16 2/3 Гц із контакторно-реостатним керуванням універсальними колекторними тяговими двигунами. У 1980-х роках у СРСР також розроблялася компромісна система тяги постійного струму підвищеної енергоефективності з модернізацією контактної мережі 3 кВ. У цьому проекті більшу частину енергії планувалося подавати до контактної мережі від паралельної до неї мережі постачання підвищеної постійної напруги (6 кВ) за допомогою додаткових перетворювачів, розташованих на перегонах поруч із залізничним полотном. Розроблення потужних високовольтних тиристорів і IGBT привело до того, що подальший розвиток електричної тяги багато фахівців почали зв'язувати з поверненням до системи з постійною напругою, але при його підвищенні до 12 кВ і навіть до 24 кВ. Такі напрацювання мають США, Італія,

Росія й інші країни. Зокрема італійські фахівці вважають, що система електричної тяги постійної напруги 12 кВ економічно вигідніша, ніж більшість наявних систем тяги на змінній напрузі. Одна з можливих силових схем електровоза з підвищеною постійною напругою живлення й АТД у спрощеному вигляді подана на рисунку.

На сучасних високовольтних тиристорах такий варіант схеми може бути реалізований для роботи при напрузі живлення до 12 кВ і вище. Можливе й створення схеми з універсальним живленням від постійної напруги 3-12 кВ. При впровадженні систем електричної тяги постійного струму підвищеної напруги основний приріст енергоефективності повинен досягатися завдяки застосуванню інверторного привода на електровозах і ефективних багатоімпульсних випрямлячів напруги на тягових підстанціях. За такої умови буде усунена низка відомих недоліків систем змінного струму, серед яких відзначимо такі: низький коефіцієнт потужності, наявність вищих гармонік, асиметричність навантаження фаз у живильній трифазній мережі, наявність нейтральних вставок (НВ) завдяки живленню перегонів, що прилягають до підстанції від різних фаз. Згадана обставина потребує підвищеної уваги машиніста при необхідному відімкненні живлення при під'їзді до НВ. Відімкнення, що відбудеться пізніше, загрожує появою електричної дуги з можливістю пошкодження контактної підвіски; раннє відімкнення здатне спричинити істотну втрату швидкості й навіть зупинку поїзда. Система тяги постійного струму підвищеної напруги дасть змогу застосувати високовольтні АТД, у яких зменшено пускові й номінальні струми й зменшено витрату міді. Такі потужні асинхронні електродвигуни з номінальними напругами до 6 кВ дуже поширені в гірничодобувній та інших галузях промисловості.

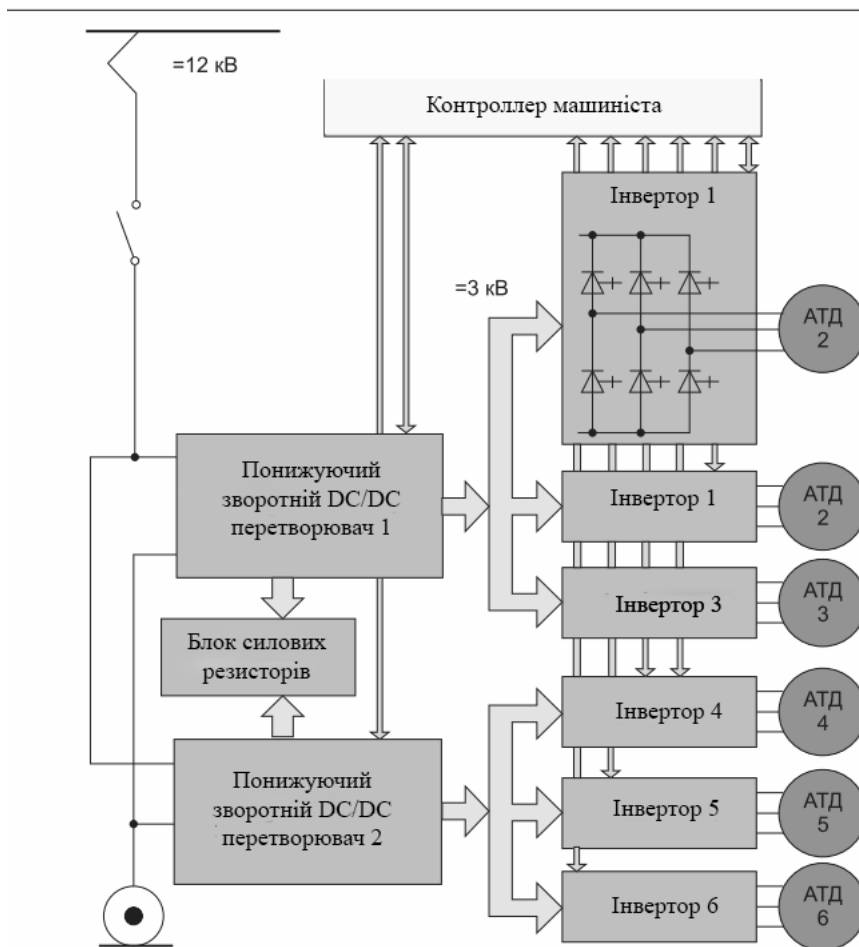


Рис. Можлива структурна схема перспективного електровоза з живленням підвищеною постійною напругою

Послідовне увімкнення високовольтних IGBT при використанні захисних ланцюгів дасть змогу живити інвертори безпосередньо напругою контактної мережі. У схемі такого привода не потрібні знижувальні DC/DC-перетворювачі. Наявність на сучасних залізницях Євросоюзу декількох стандартів напруги тягової мережі (1,5 і 3 кВ DC, а також 15 кВ, 16 2/3 Гц і 25 кВ, 50 Гц AC) призводить до того, що виробники електропоїздів, зокрема швидкісних, змушені випускати дво-, три- і навіть чотирисистемні поїзди на всі типи напруги, що застосовується. Автоматизоване переведення на ходу з однієї системи тяги на іншу забезпечується перекомутацією силового устаткування

електровоза з підняттям/опусканням відповідного пантографа (змінного або постійного струму). Одночасно здійснення високошвидкісного залізничного руху потребує будівництва спеціального виділеного полотна й створення високошвидкісних локомотивів. Природно, що для таких проектів більш придатна концепція системи тяги постійного струму підвищеної напруги. Слід також зазначити, що модернізація контактної мережі з переходом від одного виду струму до іншого на активній ділянці залізниці видається доволі складним завданням на перший погляд. Проте у 1995 році в Росії вперше у світовій практиці на ділянці Східно-Сибірської залізниці довжиною

400 км був зроблений перехід мережі з постійної напруги 3 кВ на змінну напругу 25 кВ без істотних перерв у русі поїздів. Аналогічні приклади є й у Євросоюзі.

Висновки. З розробленням і виробництвом системи електричної тяги постійного струму підвищеної напруги 12 кВ

почнеться новий етап у розвитку електричної тяги з підвищеними техніко-економічними показниками. Швидкісний рух зі швидкостями до 250-280 км/год може бути здійснено при наявній системі електропостачання постійного струму 3,0 кВ.

Список використаних джерел

1. Розенфельд, В. О. Применение постоянного тока высокого напряжения для электрической тяги [Текст] / В. О. Розенфельд, В. О. Шевченко, В. А. Майбога // Железнодорожный транспорт. – 1962. – № 7. – С. 35-39.
2. Система электрической тяги постоянного повышенного напряжения с тиристорными преобразователями на подвижном составе [Текст] / В. Е. Розенфельд, В. В. Шевченко, В. А. Майбога, Г. П. Долаберидзе // Электрическая и тепловозная тяга. – 1968. – № 3. – С. 4-6.
3. Kim J. Modeling, Control, and Design of Input-Series-Output-Parallel- Connected Converter for High-Speed-Train Power System [Text] / Jung-Won Kim, Jung- Sik You, B. H. Cho // IEEE transactions on power electronics. 2001, Vol. 48, № 3.
4. Hugo N., Stefanutti P., Pellerin M.: Power Electronics Traction Transformer [Text] // Proc. EPE07, Aalborg, 2007, CD; file 0715.pdf.
5. Steiner M., Reinold H.: Medium Frequency Topology in Railway Applications [Text] // Proc. EPE 07. Aalborg, 2007, CD, file 0585.pdf.

Харламов Павло Олександрович, канд. техн. наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-19-99.

E-mail: kharlamov.erps@gmail.com.

Федоров Артем Вікторович, магістрант ІППК (Проект ТЕМПУС IV) Українського державного університету залізничного транспорту. E-mail: artem_92@icloud.com.

Харламова Олена Миколаївна, старший викладач кафедри іноземних мов Українського державного університету залізничного транспорту. E-mail: elenazinchenko0406@gmail.com.

Дзюба Олена Анатоліївна, викладач кафедри іноземних мов Українського державного університету залізничного транспорту. E-mail: dziubaelena8@gmail.com.

Kharlamov Pavlo, Ph.D., lecturer of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-19-99. E-mail: kharlamov.erps@gmail.com.

Fedorov Artem, gs of ESIRAT (project TEMPUS IV) Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: artem_92@icloud.com.

Kharlamova Olena, Senior lecturer of foreign languages, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: elenazinchenko0406@gmail.com.

Dziuba Olena, lecturer of foreign languages, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: dziubaelena8@gmail.com.

Стаття прийнята 21.11.2017 р.