

УДК 629.4.027

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ
ПІДВИЩЕНОЇ НАПРУГИ**

Канд. техн. наук П. О. Харламов, магістрант К. Ю. Парпура,
старш. викл. О. М. Харламова

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ
ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОВЫШЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Канд. техн. наук П. А. Харламов, магістрант К. Ю. Парпура,
старш. препод. Е. Н. Харламова

**IMPROVING THE EFFICIENCY OF HIGH-SPEED RAILWAY THROUGH THE USE OF
THE DC OVERVOLTAGE**

PhD (Tech.) P. Kharlamov, master K. Parpura, Senior lecturer O. Kharlamova

Застосування в контактній мережі залізниць України постійного струму при напрузі 3 кВ не є оптимальним ані для обладнання електропостачання, ані для електрорухомого складу. Це був вимушений компроміс, що зумовлено вартістю втрат енергії в такій системі й вартістю її обладнання. Підвищення ж напруги в контактній мережі постійного струму в кілька разів дасть можливість застосувати системи імпульсного перетворення енергії, що усувають безпосередній зв'язок між напругами контактної мережі й тягових двигунів. Це суттєво поліпшить техніко-економічні показники системи тяги постійного струму та сприятиме розвитку високошвидкісного залізничного рухомого складу на постійному струмі.

Ключові слова: електрифікація, тяга, струм, напруга.

Применение в контактной сети железных дорог Украины постоянного тока при напряжении 3 кВ не является оптимальным ни для оборудования электроснабжения, ни для электроподвижного состава. Это был вынужденный компромисс, который обусловлен стоимостью потерь энергии в такой системе и стоимостью ее оборудования. Повышение же напряжения в контактной сети постоянного тока в несколько раз даст возможность применить системы импульсного преобразования энергии, которые разрывают непосредственную связь между напряжением контактной сети и тяговых двигателей. Это существенно улучшит технико-экономические показатели системы тяги постоянного тока и будет содействовать развитию высокоскоростного железнодорожного подвижного состава на постоянном токе.

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. Сучасні схеми силової електроніки забезпечують переваги для електричних мереж залізниць. Сьогодні у світі співіснують дві принципово різні системи електрифікації залізниць: системи постійної напруги 3 кВ (1,5 кВ) і однофазні системи змінної напруги 25 кВ при 50 Гц. Електровози та електропоїзди для систем живлення постійного струму мають більш просте електроустаткування з тяговою машиною постійного струму. Рухомий склад з трифазними тяговими машинами змінного струму має істотні обмеження на потужність завдяки низькій напрузі в контактній мережі. Зважаючи на це, питання можливості використання підвищеної напруги в системах постійного струму є актуальними, особливо для розвитку високошвидкісного руху.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведені випробування тиристорно-конденсаторних систем для електрифікації у шістдесяті роки минулого століття в СРСР [1, 2] та у сімдесяті роки в Італії [3] із постійним струмом 6 кВ не сприяли появі нової концепції електровозів постійного струму насамперед через нестачу 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. Подальше збільшення потужності обмежувалося ростом габаритних розмірів і маси однофазного трансформатора на такому електровозі. Наявність потужних високовольтних 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]. Трансформатор, однак, був лише засобом забезпечення інтерфейсу між високою напругою передачі й значно меншою напругою навантаження та був виконавчим механізмом для керування швидкістю й потужністю, дозволяючи прості зміни напруги навантаження за допомогою трансформаторних відгалужень, що використовувались на старих локомотивах.

Сучасні конструкції без трансформатора можливі через спеціальні силові електронні схеми. Загальні вимоги – це висока вхідна напруга в широкому діапазоні й досить плавні струми, а також можливість рекуперації. Нові технічні розв'язки без трансформаторів для знижувальних або підвищувальних Дс-Дс-перетворювачів дають змогу збільшити

потужність електровозів з використанням постійного струму через збільшення напруги в контактній мережі значно вище 3 кВ.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є визначення особливостей 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. Відповідно до рівня технічного прогресу електрифікація проводилася на постійному струмі «низької» напруги (1,5 кВ; 3,3 кВ), тому що на локомотивах були встановлені двигуни саме постійного струму, електричні (технічні) характеристики яких не допускали подачу напруги живлення більшу, ніж 1,5 кВ. Електрична енергія доставляється до електрорухомого складу (ЕРС) за допомогою контактної мережі (КМ), контактна підвіска якої виконана товстими мідними проводами, найчастіше подвійними. Така марнотратність зумовлена тим, що передача необхідної потужності «низькою» напругою супроводжується протіканням у КМ більших струмів (близько 1000 А), тому переріз проводів збільшують для зниження активних втрат. Для подачі електроенергії в КМ використовуються тягові підстанції (ТП) постійного струму, які знижують напругу, що приходить із енергосистеми, випрямляють її й подають у КМ.

Однак наприкінці 1920-х років у СРСР фахівці дійшли висновку, що оптимальним варіантом є електрифікація на постійному або змінному (50 Гц) струмі напругою 20 кВ. В остаточному підсумку перевагу було віддано системі змінного струму частотою 50 Гц і напругою 27,5 кВ. Таке рішення зумовлене тим, що технічний розвиток тих років не давав змоги одержати високу постійну напругу, а потім перетворити її в 3,3 кВ усередині локомотива.

Сучасний рівень технічного прогресу дає змогу встановлювати на ЕРС змінного

струму асинхронний електродвигун, який одержує живлення від імпульсно-частотного перетворювача, здатного перетворити однофазну напругу, отриману із КМ, у трифазну напругу з регульованою частотою й амплітудою. Окрім того, нинішній рівень розвитку електроніки дає змогу здійснити раніше неможливе – провести електрифікацію по системі постійного струму високої напруги.

Відомо, що протікання струму по проводах супроводжується втратами енергії і, як наслідок, зменшенням напруги на навантаженні (пантограф локомотива). Для збільшення ефективності системи електропостачання необхідно звести ці втрати до мінімуму. З курсу теоретичних основ електротехніки відомо, що, крім активних втрат, властивих обом родам струму, змінний струм має ще й реактивний (індуктивний і ємнісний) опір. Очевидно, що при передачі однієї й тієї ж потужності тим самим рівнем напруги, втрати енергії на змінному струмі будуть більші, ніж на постійному. Це перший аргумент на користь використання постійного струму. Більше того, з вищесказаного випливає, що, при рівності рівнів струму й напруги на ТП системи змінного струму (СЗС) і системи постійного струму (СПС), використання СПС дає змогу підводити до ЕРС більшу потужність.

Слід також зазначити, що активний опір провідників у ланцюзі змінного струму завжди більший за їх опір у ланцюзі постійного струму через так зване явище поверхневого ефекту (скін-ефекту), суть якого полягає в тому, що змінний струм протікає по перерізу провідника не рівномірно, а витісняється до поверхні [6]. Це призводить до того, що переріз провідника використовується не повністю, тобто «корисний» переріз провідника зменшується, що призводить до збільшення активного опору. Це збільшення тим більше, чим більша частота струму, що протікає. Вплив скін-ефекту на проведення КМ практично незначний. Однак не варто

забувати про те, що як зворотна провідність використовується сталеве, а отже, феромагнітне, рейкове коло, що має набагато більшу, порівняно з контактною підвіскою, площу поперечного перерізу й більшу абсолютну магнітну проникність, що залежить від струму, що протікає по ньому. Відомо, що при змінному струмі значення активного опору рейкового кола в 5–10 раз перевищує значення активного опору при постійному струмі, а це вже необхідно враховувати [7]. Що б там не було, СПС позбавлена проблеми збільшення втрат, зумовлених скін-ефектом у КС і рейках, оскільки значення частоти постійного струму дорівнює нулю.

До мінусів використання СПС справедливо зараховують електрохімічну корозію підземних споруджень. Вплив цієї проблеми може бути зменшено декількома способами (в ідеалі використовуваними спільно), серед яких:

- використання станцій катодного захисту;

- зменшення струмів, споживаних ЕРС і відповідно тих, що протікають у землі.

Перший спосіб широко відомий і досить давно застосовується. А от зниження струмів може бути досягнуте практично тільки за рахунок збільшення живильної напруги, тому що для передачі деякої потужності високою напругою необхідні порівняно невеликі струми.

Саме через усі зазначені вище причини пропонується використовувати СПС з живильною напругою не менш 25 кВ. Адже при збільшенні напруги в 7,5 разу (відповідно до існуючих 3,3 кВ) відбувається зменшення струму в ті ж 7,5 разу. Втрати в провідниках за законом Джоуля-Ленца пропорційні квадрату струму, отже при зменшенні струму в 7,5 разу втрати зменшуються в 56, 25 разу.

Рівень живильної напруги не менш 25 кВ був обраний з таких міркувань:

- при зменшенні струму немає необхідності у використанні двох або більше контактних проводів;

- дія електрохімічної корозії підземних споруджень залежить від значення струму, що протікає, тому при зменшенні струму зменшується руйнівний вплив корозії;

- при збільшенні напруги СПС до 25 кВ і відповідно зменшенні струмів можна буде використовувати більш-менш відомі технічні рішення на вибір устаткування ТП, характеристик контактної підвіски (типу, перерізу й ін.), ізоляторів тощо.

Зниження втрат приводить до можливості збільшення відстані між ТП, а отже, до зменшення кількості ТП.

Важливо розглянути тему електромагнітної сумісності. Тут, безсумнівно, перевага віддається СПС, оскільки постійний струм і постійна напруга не створюють несприятливих змінних електромагнітних полів. Чого не можна сказати про СЗС, що створює небезпечний електромагнітний вплив.

Окрім того, постійна напруга в СПС отримана на ТП випрямленням змінної трифазної напруги, тому є пульсуючою і складається з постійної й змінної складових. Досить поширені на залізниці трифазні 6-пульсові випрямні агрегати, що використовують мостову схему Ларіонова або схему «дві вторинні зворотні зірки зі зрівнювальним реактором» [8].

Але досить очевидно, що більш ефективним буде застосування 12- і 24-пульсових схем, які підвищують якість випрямленої напруги, знижують втрати реактивної потужності, поліпшують зовнішню характеристику. Однак практичне використання будь-якої схеми випрямлення приводить до необхідності подальшого зниження пульсацій, зумовлених наприклад несиметричним режимом роботи. Для цього використовують різні фільтри, що згладжують (ЗФ). Варто також додати, що коефіцієнт корисної дії (ККД) багатьох сучасних перетворювачів досягає 97–99 %.

Застосування СПС високої напруги має на увазі використання відповідних релейних захистів і комутаційних апаратів.

Релейний захист (РЗ), природно, зазнає змін. По-перше, зміняться значення налаштувань різних видів захистів. По-друге, для підвищення ефективності необхідно встановлювати й використовувати РЗ, побудований на сучасній елементній базі – мікропроцесорах (МП). Використання мікропроцесорних інформаційно-керуючих систем (МІКС) у РЗ підвищує її надійність, швидкодію й чутливість, а отже, і ефективність усієї системи. Застосування МП також розширює функціональні можливості РЗ, а це у свою чергу дає змогу створювати захист нового покоління практично будь-якої складності.

Усі захисти, установлені на ТП, повинні бути об'єднані в єдину інформаційно-обчислювальну систему (ІОС) підстанції. За необхідності єдині ІОС окремих ТП можуть бути об'єднані між собою в ще більшу ІОС.

Після того, як якісна постійна напруга, наприклад рівна 27,5 кВ, отримана на ТП і з найменшими втратами за допомогою КМ доставлена до локомотива, виникає питання: а чи здатний ЕРС прийняти й використовувати цю напругу? Адже для живлення двигунів постійного струму або асинхронних двигунів напруга повинна бути знижена.

Якщо на ЕРС установлені асинхронні електродвигуни, необхідно використовувати імпульсний перетворювач (ІП) з регулюванням частоти й амплітуди. Такі перетворювачі здатні перетворювати постійну напругу в трифазну змінну напругу з регульованою частотою. Такі перетворювачі вже застосовуються в промисловості й на залізниці в СЗС-27,5, там, де використовуються асинхронні двигуни. Ці ІП можуть житися будь-яким родом струму: змінним трифазним, змінним однофазним або постійним,

оскільки всередині перетворювача однаково живильна напруга випрямлюється й за допомогою різних напівпровідникових обладнань імпульсно подається в потрібні моменти на ту або іншу фазу електродвигуна. Це може бути здійснено двома способами. Перший полягає в простій подачі імпульсів у потрібні фази. У цьому випадку ми одержуємо трифазну систему, але не синусоїдальну, а імпульсну. Другий, більш складний спосіб, полягає у створенні кривої напруги з набраних один за одним імпульсів різної амплітуди з наступним згладжуванням. Таким чином, виходить крива напруги, схожа на синусоїдальну криву. Імпульсний перетворювач створює три такі квазісинусоїдальні криві напруги, кожна з яких подається в потрібну фазу асинхронного двигуна.

Якщо ж на ЕРС розміщені двигуни постійного струму, необхідно просто знизити рівень напруги й регулювати його в деяких межах. Це перетворення (зниження напруги) може зробити ІП, що працює на напівпровідникових пристроях (зокрема транзисторах, симісторах і діодах) або із проміжним перетворенням на високій частоті.

Проте в ІП є принаймні один істотний недолік — імпульси різних частот викликають несприятливі електромагнітні впливи, з якими можливо й необхідно боротися застосуванням, наприклад устаткування, що екранує.

Висновки. З розробленням і виробництвом системи електричної тяги постійного струму підвищеної напруги 25 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 // Proc. EPE07, Aalborg, 2007, CD; file 0715.pdf.
5. Steiner M., Reinold H.: Medium Frequency Topology in Railway Applications // Proc. EPE 07. Aalborg, 2007, CD, file 0585.pdf.
6. Нейман, Л. Р. Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники [Текст] : учеб. для вузов в 2 т. – 3-е изд., перераб. и доп. — Л. : Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – Т. 2. – 416 с.
7. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М. : Транспорт, 1982. – 528 с.
8. Бурков, А. Т. Электронная техника и преобразователи [Текст] : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / А. Т. Бурков. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.

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.

Парпура Кирило Юрійович, магістрант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту, слухач за програмою ТЕМПУС.

E-mail: artem_92@icloud.com.

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

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

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

Парпура Кирило Юрійович, магістрант кафедри експлуатації та ремонту подвижного складу Українського державного університету залізничного транспорту, слухач за програмою ТЕМПУС.

E-mail: artem_92@icloud.com.

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

Kharlamov Pavlo, PhD (Tech.), associate professor, Department of Maintenance and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-19-99. E-mail: kharlamov.erps@gmail.com.

Parpura Kirilo, master (TEMPUS), Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: artem_92@icloud.com.

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

Статтю прийнято 13.11.2018 р.