

**В. Сиченко, д. т. н., професор, завідувач кафедри «Електропостачання залізниць»,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна**

ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ШВИДКІСНИХ ТА ВИСОКОШВИДКІСНИХ МАГІСТРАЛЕЙ

КЛЮЧОВІ СЛОВА: системи тягового електропостачання, швидкісний рух, підвищена напруга, силова електроніка.

УДК 621.311



**Проаналізовано
переваги та недоліки
різних СТЕ та визначено
найбільш перспективні
напрямки розвитку
тягової електромережі
залізниць України.**

Загальні вимоги до систем тягового електропостачання швидкісних магістралей (СТЕ) зводяться до такого: забезпечувати надійне струмознімання та задану якість електричної енергії при живленні швидкісного електрорухомого складу.

Максимальна швидкість руху на електрифікованих лініях змінного струму в останні роки зросла до 300 км/год; для деяких нових ділянок планується швидкість до 350 км/год. Максимальна швидкість на лініях постійного струму досягає 250 км/год. Потужність, необхідна для сучасного високошвидкісного рухомого складу, викликає підвищення розрахункових фідерних струмів як у СТЕ змінного струму, так і у СТЕ постійного струму.

Установлення максимальних швидкостей руху швидкісних потягів на окремих конкретних ділянках і перегонах існуючих магістралей здійснюється в результаті комплексної оцінки умов допустимих швидкостей руху за станом колії та згідно з нормативами взаємодії з нею рухомого складу. Пристрої тягового електропостачання не повинні обмежувати максимальні швидкості руху нижче прийнятого за цими умовами рівня. Усі компоненти системи передачі потужності мають відповідати встановленим вимогам і підлягають ретельній перевірці та випробуванням.

Відповідно до директиви ЄС 96/48 країни-члени Європейського Союзу погодилися гармонізувати технічні засоби своїх швидкісних залізничних ліній, щоб забезпечити їх експлуатаційну сумісність у міжнародних сполученнях. У розроблених відповідними інстанціями ЄС

Технічних специфікаціях інтероперабельності (Technical Specifications for Interoperability, TSI) визначено основні вимоги до інфраструктури й рухомого складу [1]. Країни-члени ЄС повинні ввести вимоги TSI у національне законодавство, щоб проєктовані й будовані високошвидкісні лінії відповідали цим вимогам. У числі інших, рішенням ЄС 2002/733 затверджено специфікації на системи тягового електропостачання (TSI Energy), у т. ч. і на контактну мережу.

Документ поширюється на проєктування нових ліній або модернізацію існуючих. TSI не нав'язує використання конкретних технологій або технічних рішень, за винятком випадків, коли це необхідно для сумісності транс'європейської високошвидкісної залізничної системи.

В Україні аналогічного TSI документа немає, оскільки проблеми інтероперабельності залізничного транспорту на пострадянському просторі через історичні причини розвитку в цілому не існувало. Проте існує міждержавний документ, який регламентує питання будівництва контактної мережі швидкісних і високошвидкісних залізничних ліній, — пам'ятка ОСЖД Р610-7 «Загальні технічні вимоги до систем тягового електропостачання постійного і змінного струму швидкісних і високошвидкісних ліній». Класифікацію електрифікованих магістралей ліній і ділянок залізниць швидкісного та високошвидкісного руху наведено в таблиці 1. В основу класифікації покладено дані щодо «Параметрів об'єктів інфраструктури на найбільш важливих з міжнародної точки зору залізничних ліній» (документ МСЖД

ЕСЕ/TRANS/63, стор. 85, Додаток II). Порівнюючи категорії швидкісних ліній у TSI «Енергія» і P-610/7, можна зробити висновок, що I категорії TSI відповідає категорія B1 ОСЖД, відповідно II — B2, III — A2. Відповідно, підхід в Україні для визначення високошвидкісних, швидкісних ліній у цілому відповідає TSI «Енергія».

При визначенні необхідних обсягів робіт щодо реконструкції діючої магістралі під швидкісний рух слід виходити з аналізу відповідності діючих пристроїв системи тягового електропостачання викладеним нижче вимогам. Необхідний обсяг перевлаштування системи електропостачання визначається в проекті на основі результатів електричних розрахунків для всіх видів руху, передбачених перспективою розвитку ділянки й загальних технічних вимог.

Пристрої систем тягового електропостачання діючих електрифікованих магістралей, що не відповідають цим вимогам, а також такі, що відпрацювали на момент пуску швидкісного руху більше 75% нормативного терміну служби (ресурсу) або що мають більш ніж на 25% меншу несучу здатність (допустимі навантаження), підлягають безумовній заміні. Заміні також підлягають пристрої, які при існуючих обсягах руху в інтенсивний період мають навантаження понад 90% номінального.

При цьому конструктивні параметри елементів швидкісної та ви-

сокошвидкісної контактної мережі повинні забезпечувати:

- надійне струмознімання з числом проходів струмоприймачів до 1,5 млн (постійний струм) і 3,0 млн (змінний струм);
- гарантовану експлуатаційну надійність (довговічність) підвіски в цілому — 50 років;
- термін служби опор і жорстких поперечин — 70 років;
- ізоляторів — 30 років;
- арматури — 50 років.

У TSI «Енергія» розглядаються контактні мережі всіх наявних класів напруги. Рівні напруги для контактної мережі відповідно до EN-50163 і P-610/7 наведено в таблицях 2 та 3.

В Україні застосовуються дві системи живлення AC 25 кВ 50 Гц і DC 3,0 кВ з рівнями напруги відповідно до 21–29 кВ, 2,7–4,0 кВ, у деяких випадках дозволяється напруга не менше 19 кВ на змінному і 2,4 кВ на постійному струмі. Тобто вимоги щодо рівня напруги в контактній мережі в Україні відповідають Європейським нормам.

У таблиці 4 наведено застосування систем електропостачання для категорій високошвидкісних залізничних ліній [1].

► Застосовувані системи тягового електропостачання

Відмінності в інфраструктурі країн Європи створюють значні проблеми

в розвитку єдиної європейської залізничної мережі, викликають великі затримки потягів, знижуючи швидкість доставки пасажирів і вантажів, чим і послаблюють позиції залізниць на ринку транспортних послуг. Уніфікація залізничного комплексу може бути досягнута або шляхом гармонізації систем, тобто приведенням їх до єдиного стандарту, або надмірним технічним оснащенням. Один лише перехід на єдині стандарти в галузі забезпечення безпеки руху на високошвидкісних лініях триватиме десятки років. Звідси випливає, що процес уніфікації підсистеми «Електропостачання» для залізничного транспорту Європи буде тривалим і непростим.

Слід також урахувувати той факт, що національні залізниці, які функціонували раніше незалежно, стали потенційними конкурентами в міжнародному масштабі. Тому створені в різний час технічні системи (зокрема тягового електропостачання) мали істотні відмінності, що викликало різноманіття залізничних систем у європейських країнах і використовуваних на континенті систем електропостачання. У Центральній і Північній Європі домінує система змінного струму напругою 15 кВ і частотою 16,7 Гц. У Португалії, Данії, Фінляндії, у більшості східноєвропейських країн, а також на півночі Великобританії та Франції застосовується система електропостачання змінного

Табл. 1. Класифікація електрифікованих магістралей ліній і ділянок залізниць швидкісного та високошвидкісного руху

Умови створення швидкісної лінії		Існуючі лінії, А		Нові лінії, В	
		А1	А2	В1	В2
		з обмеженими можливостями модернізації під швидкісний рух	з техніко-економічно обґрунтованою можливістю модернізації під швидкісний рух	призначені виключно для пасажирських перевезень	призначені для змішаних пасажирських і вантажних перевезень
Розрахункова (номінальна) швидкість, км/год		160	200	300	250
Максимальна швидкість руху (на окремих ділянках), км/год		180	220	350	280
Клас ліній		Швидкісна (ШМ)		Високошвидкісна (ВШМ)	
Рекомендована система тягового електропостачання	Діючі залізничні лінії:	Існуюча система (змінний, постійний струм) Змінний струм 25 кВ 50Гц		-	
	а) електрифіковані; б) що електрифікуються	-		Змінний струм 25 кВ 50 Гц, 2 × 25 кВ	
	Знову споруджувані				

Табл. 2. Європейські системи напруги електричних залізниць відповідно до EN-50163

Типи енергопостачання	Номинальна напруга, В	Найменша непостійна напруга, тривалістю до 10 хв, В	Найменша постійна напруга, В	Максимальна постійна напруга, В	Максимальна непостійна напруга, тривалістю до 5 хв, В	Короткочасне перенапруження, тривалістю понад 20 мс, В
*DC 600 В	600	–	400	720	770	1015
DC 750 В	750	–	500	900	950	1269
DC 1,5 кВ	1500	–	1000	1800	1950	2539
DC 3,0 кВ	3000	–	2000	3600	3900	5075
**AC 15 кВ 16,7 Гц	15 000	11 000	12 000	17 250	18 000	24 311
AC 25 кВ 50 Гц	25 000	17 500	19 000	27 500	29 000	38 746

*DC — постійний струм;

**AC — змінний струм

Табл. 3. Рівні напруги для контактної мережі згідно з Р-610/7

Система електрифікації	Найменша непостійна напруга, тривалістю до 10 хв, В	Найменша постійна напруга, В	Номинальна напруга, В	Максимальна непостійна напруга, тривалістю до 5 хв, В	Максимальна постійна напруга, В
Змінний струм	17 500	19 000	25 000	27 500	29 000
Постійний струм	–	2000	3000	3600	3900

Табл. 4. Застосування систем електропостачання для високошвидкісних магістралей

Номинальна напруга та частота	Категорія I	Категорія II	Категорія III
AC 25 кВ 50 Гц	X	X	X
AC 15 кВ 16,7 Гц	*	X	X
DC 3 кВ	**	X	X
DC 1,5 кВ	–	X	X

* У державах-членах ЄС, мережі яких електрифіковані на змінному струмі 15 кВ 16,7 Гц, допустимо для цієї системи, при електрифікації для нових ліній Категорії I.

** Допустимо для мережі постійного струму 3 кВ, які використовуватимуться в Італії, Іспанії і Польщі для існуючих і нових ділянок ліній.

струму напругою 25 кВ і частотою 50 Гц. Вона виникла пізніше за інші системи й тому отримала основне поширення на нових або раніше не електрифікованих залізницях. В Іспанії, Італії, Бельгії, Польщі, на півночі Чехії та Словаччини основною є система постійного струму напругою 3 кВ. Аналогічна їй система постійного струму напругою 1,5 кВ поширена в Нідерландах і на півдні Франції. На півдні Великобританії збереглися перші системи тягового електропостачання постійного струму напругою 650, 750 і 1200 В із контактною рейкою. Наявність такої великої кількості систем тягового електропостачання значною мірою ускладнює інтеграційні процеси, що відбуваються на залізничній мережі Європейського континенту. У таблиці 5 показано застосовувані системи тягового електропостачання на магістральних залізницях в Європі.

Спочатку в Європі електрифікація залізниць здійснювалась на постійному струмі. Причиною цього була відповідна крива тяги / швидкості серійних колекторних двигунів, що використовувались як провідні приводи на залізницях. І сьогодні майже половина всіх електричних тягових систем використовує постійний струм.

На початку ХХ ст. були зроблені спроби використовувати однофазні серійні двигуни на змінному струмі як приводи, які б живилися від однофазного змінного струму на частоті 50 Гц. У Німеччині вони привели до використання однофазного змінного струму з частотою 16,7 Гц, при цьому електроенергія генерується й розподіляється як одна фаза на окремій залізничній мережі. Цей тип тягового електропостачання застосовується з 1912–1913 рр. Система також була перейнята Австрією, Швейцарією,

Норвегією та Швецією. Система тягового електропостачання, що використовує однофазний змінний струм 16,7 Гц, довела свою спроможність та ефективність при електропостачанні високошвидкісного руху й руху з високою пропускнуною спроможністю. І, нарешті, первинний досвід тягових систем електропостачання зі змінним струмом 50 Гц був отриманий також у Німеччині в 1940 році.

До кінця 2010 року довжина електрифікованих магістральних тягових ліній складала близько 240 200 км по всьому світу і мала таку структуру:

- постійний струм 1,5 кВ — приблизно 18 760 км — 7,8% від загальної довжини;
- постійний струм 3 кВ — приблизно 78 000 км — 33% від загальної довжини;
- змінний струм 16,7 Гц 15 кВ — 35 000 км — 14,6% від загальної довжини;
- змінний струм 50 Гц 25 кВ — приблизно 98 000 км — 40,5% від загальної довжини.

Аналіз доступної науково-технічної літератури показує переважне зараз застосування тяги змінного струму для живлення швидкісних магістралей як у Європі, так і в Азії. Для компенсації незмінно виникаючої несиметрії від однофазного навантаження тягові підстанції змінного струму під'єднуються до трифазної

мережі циклічним способом. Для вдосконалення якості передачі енергії в швидкісному русі залізниць Франції, Японії та Росії використовується також система з автотрансформаторами 2 × 25 кВ. При цьому напруга між негативним фідером і рейками, а також між повітряною контактною лінією та рейками в обох випадках становить 25 кВ. Різниця напруги між повітряною контактною лінією і негативним фідером — 50 кВ. Порівняно з підсистемою 25 кВ, автотрансформаторна підсистема 2 × 25 кВ дозволяє підвищити пропускну спроможність ділянки в 1,8–1,9 разу. Подальше підвищення пропускну спроможності ділянок з автотрансформаторною системою може бути досягнуто при підвищенні напруги живлячого проводу.

Пошук шляхів комплексного усунення апіорі наявних недоліків системи електропостачання змінного струму має бути спрямований на забезпечення симетричного розподілу тягового навантаження по фазах трансформаторів підстанції і трифазної мережі, від якої вони отримують живлення [2].

Систему 2 × 25 кВ було використано при розробці системи розподіленого електропостачання з трифазними симетруючими та однофазними трансформаторами. Система містить опорні тягові підстанції на відстанях

200–240 км, від яких за двопровідними лініями на опорах контактної мережі отримують живлення проміжні підстанції з однофазними трансформаторами. На кожній опорній тяговій підстанції встановлюють два трифазні симетруючі трансформатори з ефектом Скотта. Також запропоновано застосування спеціальних симетруючих трансформаторів для системи розподіленого живлення, що розроблені науковцями МІІТ, та нові пристрої фільтрації й компенсації реактивної потужності з широкосмуговою фільтрацією гармонік струму.

На тягових підстанціях змінного струму електрифікованих залізниць країн Європи найбільш поширені трансформатори Скотта [3]. Симетруючий ефект такого трансформатора оцінюється зниженням коефіцієнта несиметрії струмів за зворотною послідовністю в трифазній живлячій мережі по відношенню до традиційної схеми з'єднання обмоток трансформатора. Недоліком безпосереднього застосування трансформаторів Скотта на залізницях України є неможливість живлення від них районного навантаження та необхідність установа додаткового районного трансформатора, що викликає істотне збільшення витрат на спорудження чи реконструкцію тягових підстанцій.

Науковцями МІІТ та ВНІІЖТ розроблено спеціальний тристрижневий трифазно-двофазний трансформатор. Для живлення тягового навантаження використовуються обмотки, з'єднані за схемою трикутника та неповної зірки. Перевагою такого трансформатора перед трансформатором Скотта є можливість розміщення в одному баку трифазної обмотки для живлення нетягових районних споживачів.

Заслужують на увагу також спеціальні трифазно-двофазні трансформатори Кюблера та Леблана, тягові обмотки яких з'єднані при відповідному виборі кількості витків таким чином, щоб досягти кута зсуву фаз між векторами напруг плечей живлення, що дорівнює 90° (ефект Скотта) [3]. Трифазно-двофазні трансформатори Кюблера та Леблана також забезпечуються додатковою трифазною обмоткою напругою 10 (35) кВ для живлення районних нетягових споживачів.

У Японії та Німеччині створені й знайшли практичне застосування тягові мережі змінного струму 27,5 кВ із коаксіальним кабелем, що використовується в ролі підсилючого й екрануючого дротів (ЕПП). Застосування коаксіального кабелю підвищує ефективність системи 27,5 кВ з ЕПП і дає можливість подовження міжпідстанційних зон [4]. Застосування трипровідного

Табл. 5. Електрифікація залізниць у деяких країнах Європи

Країна	Довжина мережі, км	Електрифіковані лінії		Рід струму	
		Довжина, км	Частка, %	Однофазний змінний струм, кВ / Гц	Постійний струм, кВ
Бельгія	13 410	2516	19	–	3
Данія	2833	440	16	15 / 16,7	–
Німеччина	44 214	20 463	46		–
Фінляндія	11 726	4389	37	25 / 50	–
Франція	31 939	14 176	44		1,5
Великобританія	16 596	4988	30		0,75
Нідерланди	2808	2061	73	–	1,5
Італія	19 502	11 668	60		1,5 / 3
Норвегія	4012	2530	63	15 / 16,7	–
Австрія	6257	3640	58		–
Польща	26 270	12 249	47	–	3
Швеція	11 599	7443	64	15 / 16,7	–
Швейцарія	4575	4575	100		–
Іспанія	15 171	7605	50	25 / 50	1,5 / 3

коаксіального кабелю дозволяє отримати тягову мережу змінного струму 2×25 кВ. Зовнішня оболонка трипровідного коаксіального кабелю використовується як живлячий провід, внутрішня оболонка підімкнена до рейок, а жила — до контактної мережі. При проходженні електрорухомого складу між двома автотрансформаторами транзитний тяговий струм від джерела до найближчого автотрансформатора протікає по зовнішній оболонці коаксіального кабелю і його жилі, тобто по симетричному ланцюгу, що має мінімальний індуктивний опір. Місцева складова тягового струму від автотрансформатора до навантаження протікає по внутрішній оболонці кабелю і його жилі, що також утворюють симетричний ланцюг. Отже, ця тягова мережа симетрична як для транзитної, так і для місцевої складових тягового струму. Це дозволяє знизити електромагнітний вплив тягової мережі на суміжні лінії, знизити індуктивний опір і поліпшити коефіцієнт потужності тягової мережі в цілому за рахунок значної зарядної потужності коаксіального кабелю.

Такий спосіб підсилення тягової мережі перевершує за своїми технічними характеристиками підсилюючі, екрануючі проводи та ємнісну компенсацію, разом узяті. Проте через низку складних технічних проблем цей метод не знайшов нині широкого застосування. Для впровадження на залізничному транспорті системи тяги з коаксіальним кабелем, що виконує функції ЕПП, і подовженими міжпідстанційними зонами слід виконати експериментальні дослідження для обґрунтування раціональних параметрів тягової мережі, умов електробезпеки рейкового ланцюга та оцінити вплив на суміжні лінії та споруди. Виконання такої роботи доцільне як з точки зору підвищення ефективності роботи електрифікованих залізниць, так і з точки зору загальнодержавного завдання з економії електричної енергії та зниження витрат на електрифікацію залізниць.

► Зміна системи тяги

Застосування системи електричної тяги на однофазному змінному

струмі супроводжується значними складнощами, пов'язаними із забезпеченням якісного відбору електроенергії від живлячих енергосистем (несиметрія навантажень і живлячої напруги, завантаження мережі реактивними струмами, спотворення форми струму мережі), сильними електромагнітними впливами на всі суміжні пристрої, низькою якістю випрямлення однофазного змінного струму на електрорухомому складі і його відносно низьким ККД [5]. Досвід експлуатації системи електропостачання змінного струму 25 кВ у Російській Федерації (57% полігону електрифікованих залізниць РФ) показав, що електрична тяга на змінному струмі породила нові проблеми, які досі остаточно не вирішені, і має такі основні недоліки:

- несиметричність (однофазного або двофазного) навантаження, що підключається до симетричної системи зовнішнього електропостачання, призводить до погіршення якості електричної енергії та збільшення втрат у живлячій мережі, а отже, до збільшення втрат у силових трансформаторах підстанції на 25–100%;
- потужність силових трансформаторів тягових підстанцій використовується на 68%;
- неоднакові кути зсуву між векторами струму й напруги.

Окрім зазначених основних недоліків системи змінного струму, проблемними питаннями залишаються забезпечення електромагнітної сумісності й дотримання екологічних вимог у межах мегаполісів і найближчих передмість [5].

Тому напрямок переведення електрифікованих ділянок постійного струму при впровадженні швидкісного руху на змінний струм із живленням фідерних зон від різних фаз викликає великі проблеми як для тягового споживача, так і для системи трифазного струму, живлячої тягові підстанції. Це насамперед стрибки потужності, неминучі при збільшенні швидкості, яка необхідна поїзду для проходження на вибігу нейтральних вставок [6]. Згідно з результатами дослідження, проведеного в Європі, майже всі залізничні компанії, які

експлуатують мережі, електрифіковані на постійному струмі, задаються питанням про те, яким чином можна перейти з постійного струму на змінний і якою мірою на сьогодні це доцільно. При цьому Франція, Італія та Нідерланди вивчають можливість спільного переведення своїх ліній постійного струму на змінний. При цьому розрахунки очікуваного співвідношення витрат і корисного ефекту дали досить песимістичний результат [6].

Конкретно планувати можна лише точковий перехід із постійного струму на змінний, причому це доцільно в місцях, де є реальна виробнича необхідність. Мова йде, наприклад, про лінії або станції, де такий захід дозволяє відмовитися від використання багатосистемного тягового рухомого складу. Приклади локального переходу на змінний струм відомі в Бельгії, Люксембурзі, Чехії, Словаччині. У Нідерландах усі нові проекти виконуються з урахуванням того, що перехід із постійного струму на змінний до 2017 року неможливий. При цьому фахівці вважають, що використання тягового струму частотою 50 Гц відсувається на віддалений період, причому навіть не в середньостроковій перспективі [6].

Таким чином, перехід із системи постійного струму на змінний повинен бути виважено технологічним та доцільно обґрунтованим. При впровадженні швидкісного руху на ділянці Москва – Санкт-Петербург також розглядалася ситуація зі зміною системи тяги. Справа в тому, що генеральною лінією електрифікації залізниць Росії з кінця 1950-х рр. прийняте застосування системи тяги змінного струму. Із цих позицій прибічники переведення лінії Санкт-Петербург – Москва на змінний струм на перший погляд мали досить переконливі аргументи (наприклад, переведення ділянки Зима – Слюдянка) [7].

Проте умови роботи ділянок постійного струму на Транссибірській магістралі та лінії Санкт-Петербург – Москва глибоко різні. Ділянка Зима – Слюдянка була «острівною» на електрифікованій на змінному струмі магістралі й обмежувала пропускну спроможність Транссибу за ваговими

нормами потягів і плечами обороту локомотивів. Переведення, що відбулося, дозволило істотно зменшити експлуатаційні витрати залізниць й усієї магістралі в цілому саме за цими показниками, тобто домінуючий ефект був досягнутий за показниками перевізного процесу і його організації. Цей факт і його технологічність дозволили зміцнити думку МШС, залізниць та фахівців про доступність цього заходу, якщо необхідність у ньому буде виправдана. Саме це, а також «важковаговість» реконструкції системи тягового електропостачання постійного струму лінії Санкт-Петербург – Москва під швидкісний рух давали підстави поставити питання про її переведення в ході реконструкції повністю або частково на змінний струм.

Слід підкреслити, що мотивація такого розгляду була викликана причинами, пов'язаними із спрощенням реконструкції системи тягового електропостачання лінії, а не показниками перевізного процесу (у цьому істотна відмінність постановки задачі від цілей переведення ділянки Зима – Слюдянка). При реалізації переведення на змінний струм лінія Санкт-Петербург – Москва стала б «острівною» у розвинених системах постійного струму двох залізничних вузлів — Москви та Санкт-Петербурга.

При створенні систем швидкісного руху в Європі траси ліній обиралися тільки виходячи з наявності пасажиропотоку, а не роду струму, тобто при швидкості руху до 200 км/год обмежень по роду струму ніде у світі не приймали, і за кордоном немає прикладів переведення на змінний струм при підготовці раніше електрифікованих ділянок постійного струму до швидкісного руху [7]. Географія швидкісних магістралей визначається потребою перевезень, а застосування багатосистемного електрорухомого складу пояснюється наявністю на цих лініях різних систем електропостачання (1,5 і 3,0 кВ постійного струму, 15 кВ, 16 2/3 Гц, 25 кВ, 50 Гц змінного струму). Як правило, швидкісна магістраль у Європі формується з непротяжних ділянок, які раніше по тязі працювали автономно. Звідси — багатосистемність тягового рухомого складу на цих лініях.

У світі є позитивний досвід руху пасажирських поїздів на постійному струмі 3 кВ зі швидкістю до 250 км/год (Японія, Італія). Виходячи з усього викладеного, у 1996 році ВНІЖТ і Транселектропроект за завданням МШС РФ була підготовлена техніко-економічна доповідь із розглядом можливих варіантів реконструкції системи тягового електропостачання зазначеної лінії. За результатами техніко-економічної оцінки порівнюваних матеріалів було зроблено висновок про те, що перехід від системи постійного струму на систему постійно-змінного струму (як, наприклад, на лінії Севілья – Мадрид), який ініціюється міркуваннями скорочення витрат на реконструкцію системи тягового електропостачання лінії, є недоцільним через виникаючі у зв'язку з переведенням непорівнянно великих витрат по заміні електрорухомого складу, головним чином, за рахунок електровозів для звичайного пасажирського руху, і додатково виникаючих труднощів у структурі, що склалася, та організації приміського руху [7].

Проведені ВНІЖТ дослідження також показали можливість забезпечення надійного струмознімання при швидкості руху вище 250 км/год на лініях, електрифікованих на постійному струмі напругою 3 кВ.

Черговий виток науково-технічного прогресу зумовлений бурхливим розвитком силової електроніки і комп'ютерних технологій. Удосконалення системи електричної тяги та перспективи її розвитку зумовлені безповоротним процесом оновлення всієї системи перетворення енергії, що витрачається на перевізний процес. Застосування перетворювачів постійного струму в трифазний змінний струм, тиристорних перетворювачів рівня напруги постійного струму, створення високоекономічних алгоритмів комп'ютерного управління перетворенням електроенергії, заміна колекторних двигунів постійного струму на безколекторні асинхронні трифазного струму — усе це становить основний напрям технічного переозброєння систем електричної тяги й нині широко використовується в низці промислово розвинених країн [4].

► Перспективні напрямки розвитку тягового електропостачання

На сьогодні сформовано дві системи живлення електрифікованого транспорту: постійного та змінного струму. Розвиток і становлення кожної з цих систем зумовлювалися станом розвитку науково-технічного прогресу на певний період часу. При цьому необхідно зазначити, що система постійного струму з моменту своєї появи фактично не змінювалася структурно, а змінювалися, в основному, елементна база та устаткування. Система змінного струму, навпаки, із самого початку свого застосування постійно піддається різного роду вдосконаленням. Можна констатувати, що, незважаючи на задекларовані переваги та впровадження системи змінного струму, яка переважає нині, досвід її експлуатації доводить, що, у цілому, система змінного струму вже не відповідає сучасним вимогам. За всі роки експлуатації та постійної модернізації так і не були усунені основні недоліки цієї системи: небезпечний електромагнітний вплив, несиметричне завантаження фаз, значні обсяги транзиту реактивної енергії тощо [5]. Звичайно, наукові дискусії щодо того, яка система електрифікації краща, ведуться давно, але детального й комплексного порівняльного аналізу донині не виконано.

Необхідно також звернути увагу на те, що передбачувані переваги впровадження системи змінного струму — зниження витрати електроенергії за рахунок зменшення втрат у контактній мережі, скорочення капітальних витрат за рахунок зменшення числа тягових підстанцій, зниження витрати міді за рахунок зменшення перерізу контактної підвіски — не виправдалися в умовах Росії [8]. Питома витрата електроенергії на змінному струмі на практиці виявилася на 5–6% вищою, ніж на постійному, через зниження експлуатаційного ККД електровозів змінного струму. Це пов'язане з бортовим перетворювальним устаткуванням, яке при однофазному випрямленні має більші втрати, ніж стаціонарне, установлене на тягових підстанціях. Крім того, на електровозах змінного струму

рекуперативний режим менш ефективний за віддачу електроенергії, ніж на електровозах постійного струму.

Система тягового електропостачання на змінному струмі за рахунок зменшення числа тягових підстанцій і перерізу контактної підвіски виявилася в сукупності на 12–15% дешевшою за систему постійного струму, але електровози змінного струму в 1,5 разу дорожчі за електровози постійного. При існуючій насиченості електровозами електрифікованих ділянок загальний баланс за капітальними витратами виявився не на користь змінного струму. Витрата міді в контактній мережі при змінному струмі в 2 рази менше, ніж при постійному, але в кожному електровозі змінного струму міді на 5,5 т більше, ніж в електровозі постійного струму. І тут загальний баланс не на користь змінного струму [8].

У той же час освоєння зростаючого обсягу вантажних і пасажирських перевезень, упровадження швидкісного руху на лініях, електрифікованих на постійному струмі, неможливе без підсилення системи тягового електропостачання [6], тоді як система змінного струму має достатні резерви. У зв'язку з цим і з розвитком силової керованої напівпровідникової техніки залишається актуальним пошук рішень подальшого підвищення рівня напруги в мережі електротяги постійного струму до 12, 18, 24 кВ, тобто створення більш ефективної системи електропостачання постійного струму [4; 5; 8].

Нині в електровозобудівній промисловості вже є приклади використання в тяговому приводі асинхронних електродвигунів, переваги яких підтверджені досвідом експлуатації на залізницях Європи. Сучасні розробки в галузі силової електроніки дозволяють виконати основну ланку перетворювального блока у вигляді інвертора з широтно-імпульсною модуляцією напруги (АІН-ШІМ), у якій вихідна трифазна напруга регулюється й за частотою, і за амплітудою. Необхідно зазначити, що схемні рішення для перетворювачів високої напруги електровозів і тягових підстанцій також опрацьовані достатньою мірою.

”

Іван Лагута, головний інженер Департаменту електрифікації та електропостачання Укрзалізниці:

«Полігон електрифікації залізничного транспорту України на сьогодні складає 10 267 км, або 47,4% від експлуатаційної довжини. Із них 5506 км електрифіковані на однофазному змінному струмі 25 кВ 50 Гц, решта на постійному струмі 3,0 кВ. Основні магістральні напрямки залізниць у нашій державі електрифіковані. Рівні напруги в тяговій мережі з номінальною напругою нижче 3,0 кВ у нас не застосовуються. Тобто в першому наближенні можна було б сказати, що обмежень із боку систем тягового електропостачання для впровадження швидкісного та високошвидкісного руху немає. Але це не відповідає дійсності. Проблеми є, і вони значні. Найголовніші з них це: неготовність інфраструктури (колії, електропостачання та СЦБ); відсутність необхідного рухомого складу; відсутність нормативних документів і найголовніше — відсутність достатніх обсягів фінансування на вирішення перших трьох проблем».

”

Значно підсилити тягове електропостачання може не лише впровадження новітніх технологій і сучасного устаткування, а й застосування систем розподіленого живлення. Принципи побудови цих систем були сформульовані проф. К. Марквардтом ще в середині минулого століття. Саме ця ідеологія має бути покладена в розробку нової системи електропостачання та використовується при побудові систем змінного (2 × 25 кВ, 94 кВ) та постійного струму (6 кВ). При її застосуванні живлення контактної мережі здійснюється за допомогою перетворювальних пунктів, що підключаються до поздовжньої лінії електропередачі підвищеної напруги. Економічний ефект досягається за рахунок зменшення перерізу проводів контактної мережі, зменшення втрат енергії, підтримки необхідного рівня напруги в контактній мережі та збільшення коефіцієнта використання потужності основного енергетичного устаткування при зниженні його встановленої потужності. На сьогодні опрацьовано декілька варіантів побудови систем розподіленого живлення, у т. ч. із застосуванням змінного струму підвищеної частоти з напівхвильовим налаштуванням.

Найбільш перспективним способом підвищення енергетичної ефективності електричної тяги постійного струму для забезпечення швидкісно-

го руху є підсилення системи тягового електропостачання постійного струму 3 кВ за допомогою фідера постійного струму підвищеної напруги 24 кВ і пунктів живлення контактної мережі на перегоні 24/3 кВ. При цьому на тяговій підстанції встановлюється додаткова випрямна установка 24 кВ. На пункті живлення встановлюється перетворювальний модуль 24/3 кВ постійного струму, що складається з автономного інвертора й перетворювального агрегату 3 кВ, а живляча лінія прокладається по опорах контактної мережі. Цей спосіб можна застосовувати як на ділянках, що знову електрифікуються, так і на вже існуючих ділянках постійного струму, оскільки він дозволяє використовувати існуючий електрорухомий склад, розрахований на напругу 3 кВ. Необхідно зазначити, що схемні рішення електронних трансформаторів також опрацьовані достатньою мірою для впровадження.

Та все ж прийнятнішим видається спосіб із безпосереднім підвищенням напруги в контактній мережі та на електрорухомому складі. Підвищення рівня напруги в тяговій мережі стає можливим за рахунок застосування й широкого впровадження перспективних видів електрорухомого складу з імпульсними та тиристорними перетворювачами, що дозволяють виключити жорсткий зв'язок між напругою в тяговій

мережі постійного струму й на тяговому двигуні. При цьому електрорухомий склад розробляється на основі безколекторних тягових двигунів трифазного струму з живленням від контактної мережі постійного струму за допомогою автономних інверторів. На вході інвертора включається тиристорний перетворювач, що забезпечує узгодження з контактною мережею за рівнем напруги.

Різко підвищити пропускну спроможність та ефективність електричної тяги постійного струму дозволяє рівень напруги в контактній мережі постійного струму 24 кВ, у т. ч. значно збільшити відстань між підстанціями, зменшити переріз дротів тягової мережі, зменшити втрати електроенергії в пристроях електропостачання, повністю усунути несиметрію живлячої напруги. Усе це та відсутність індуктивних втрат на постійному струмі може перевищити за ефективністю всі системи змінного струму. Саме тому відбувається поступова еволюція підходів до електрифікації швидкісних магістралей на змінному струмі до переходу на більш досконалу систему постійного струму 24 кВ [9]. Насамкінець зазначимо, що впровадження нових, сучасних систем електропостачання дозволить реалізувати завдання створення високошвидкісної транспортної системи зі швидкістю руху 400 км/год.

► Висновки

Підбиваючи підсумки, можна зазначити таке:

- вибір технічних рішень при створенні або реконструкції системи тягового електропостачання для швидкісного та високошвидкісного руху повинен базуватися на параметрах проєктованої (реконструйованої) лінії: максимальна допустима та експлуатаційна швидкість руху, тип застосованого електрорухомого складу і його характеристики, принципи організації перевезень і графіки руху поїздів, ступінь розвитку інфраструктури залізниць та наявність структурних обмежень;
- для забезпечення швидкісного руху до 250 км/год застосовують-

ся різноманітні системи тягового електропостачання як постійного, так і змінного струму без будь-яких обмежень;

- вирішення питання про переведення електрифікованих ділянок постійного струму на змінний має ґрунтуватися на критеріях технологічності, доцільності й економічності та відсувається у провідних країнах на віддалений час;
- незважаючи на всі модернізації та вдосконалення системи електричної тяги змінного струму, до цього часу не вдалось усунути її основні недоліки: небезпечний електромагнітний вплив, несиметричне завантаження фаз, значні обсяги транзиту реактивної енергії тощо. Тому в деяких країнах для збереження існуючого рухомого складу змінного струму розглядаються варіанти використання проміжної ланки постійного струму для зменшення негативного впливу електричної тяги змінного струму на суміжні системи;
- розвиток силової електроніки та комп'ютерних технологій є основним напрямком технічної перебудови систем тягового електропостачання та електрорухомого складу.

Для побудови високошвидкісних магістралей зі швидкістю руху 400 км/год найбільш перспективною є система електропостачання постійного струму 24 кВ розподіленого типу. Її застосування, окрім указаних переваг, дозволить реалізувати концепцію розподіленого керування активним інтелектуальним обладнанням, здатним адаптивно змінювати характеристики передачі, перетворення та споживання електроенергії й оптимізувати режим функціонування системи тягового електропостачання в загальній енергосистемі держави. ☞

*Надійшло до редакції
17.03.2015 р.*

► Список літератури:

1. Яндович В. Н. Сравнительный анализ контактных подвесок в странах Евросоюза и Украины: орга-

низация надежного токосъема / В. Н. Яндович, В. Г. Сыченко, А. В. Антонов // Электрификация транспорту. — № 7. — 2014. — С. 67–77.

2. Мамошин Р. Р. О модернизации системы тягового электроснабжения на переменном токе напряжением 27,5 кВ / Р. Р. Мамошин // Железные дороги мира. — 2009. — № 7. — С. 67–70.
3. Шалимов М. Г. Современное состояние и пути совершенствования систем электроснабжения электрических железных дорог / М. Г. Шалимов, Г. П. Маслов, Г. С. Магай. — Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2002. — 49 с.
4. Бадер М. П. Концепция обновления и перспективы технического развития систем тягового электроснабжения / М. П. Бадер, В. Г. Сыченко // Технічна електродинаміка, Темат. вип. Силова електроніка та енергоефективність. — Ч. 2. — 2009. — С. 88–93.
5. Перспектива разработки системы электрической тяги постоянного тока повышенного напряжения 24 кВ для скоростной магистрали Москва – Екатеринбург / Б. А. Аржанников [и др.] // Тренды. События. Рынки. — 2012. — № 7. — С. 48–50.
6. О переходе с постоянного тока на переменный // Железные дороги мира. — 2013. — № 6. — С. 68–71.
7. Котельников А. В. К вопросу о выборе системы тягового электроснабжения при организации регулярного скоростного сообщения на линии Санкт-Петербург – Москва / А. В. Котельников // Токосъем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении на постоянном токе : сб. научн. тр. ОАО ВНИИЖТ. — М. : Интекст, 2010. — С. 5–12.
8. Курбасов А. С. Система электрической тяги XXI века / А. С. Курбасов // Железные дороги мира. — 1999. — № 4. — С. 19–22.
9. Хананов В. В. Нововведения и инновационные процессы в тяговом электроснабжении / В. В. Хананов, А. Т. Бурков, Д. В. Барч // Транспорт Российской Федерации. — 2012. — № 6. — С. 34–39.