

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: TSI, системи тягового електропостачання, струмознімання.

УДК 621.311

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, вимагає підвищення тягових струмів до **2000 А** на змінному струмі і до 4000 А на постійному.

Установлення максимальних швидкостей руху швидкісних потягів на окремих конкретних ділянках і регіонах 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, 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 і високошвидкісного руху наведено в таблиці 1. В основу класифікації покладено дані щодо «Параметрів об'єктів інфраструктури на найбільш важливих з міжнародної точки зору залізничних лініях» (документ МСЖД ECE/TRANS/63, стор. 85, Додаток II). Порівнюючи категорії швидкісних

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

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 високошвидкісної 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 швид-

кість 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 урахувати той факт, що національні залізниці, які функціонували раніше незалежно, стали потенційними конкурентами в міжнародному масштабі. Тому створені в різний час технічні системи (зокрема, і тягового електропостачання) мали істотні відмінності, що викликало різноманіття залізничних систем в 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 і Франції застосовується система електропостачання змінного струму напругою 25 кВ і частотою 50 Гц. Вона виникла пізніше за інші системи й тому отримала основне поширення на

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

Умови створення швидкісної лінії		Існуючі лінії, А		Нові лінії, В	
		A1	A2	B1	B2
		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 50 Гц		—	
	а) електрифіковані; б) що електрифікуються				
	Знову споруджувані	—		Змінний струм 25 кВ 50 Гц, 2 × 25 кВ	

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

Типи енергопостачання	Номінальна 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	Номінальна 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. Рівні напруги для контактної мережі згідно з Р-610/7

Номінальна 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.

нових або раніше не електрифікованих залізницях. В Іспанії, Італії, Бельгії, Польщі, на півночі Чехії і 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 більше половини всіх електричних тягових систем використовують постійний струм.

На початку XX 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 ефек-

тивність при електропостачанні високошвидкісного руху й руху з високою пропускною 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 удосконалення якості передачі енергії в швидкісному русі залізниць Франції, Японії і Росії використо-

ується також система з автотрансформаторами 2×25 кВ. При цьому напруга між негативним фідером і рейками, а також між повітряною контактною лінією і 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 досягнуте 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 авторами [3] 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 жив-

лення проміжні підстанції з однофазними трансформаторами. На кожній опорній тяговій підстанції встановлюють два трифазні симетруючі трансформатори з ефектом Скотта.

Авторами [4] 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 найбільшого розповсюдження здобули трансформатори Скотта [5]. 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 [4] 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 та трифазної обмотки для живлення нетягових районних споживачів.

Заслужують на увагу також спеціальні трифазно-двофазні трансформатори Кюблера і 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) [5]. 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. Застосування трипроводного коаксіального кабелю дозволяє отримати тягову мережу змінного струму 2×25 кВ. Зовнішня оболонка

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

Для редакції нашого журналу головний інженер Департаменту електрифікації та електропостачання Укрзалізниці І. Лагута дав коментар щодо готовності інфраструктури електропостачання до збільшення швидкості руху понад 160 км/год.

”

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.

Велику увагу слід також приділяти питанням функціонування елементу тягової мережі, що безпосередньо взаємодіє з рухомих складом, — контактної мережі. Існуюча контактна мережа будувалася за проектами 1950–60 рр., розрахована на швидкість руху до 140 км/год. Глибока модернізація контактної мережі із переведенням на компенсацію з поліпшеним регулюванням дозволить застосовувати її до швидкості не більше 160 км/год.

Подальше підвищення швидкості на зазначеному типі контактної мережі навіть теоретично не можна обґрунтувати, оскільки для надійного струмознімання швидкість поширення поперечної хвилі в контактній мережі повинна бути не менше ніж на 30% вище максимальної швидкості руху електропоїзда. Тобто для швидкості руху 200 км/год швидкість поширення поперечної хвилі повинна бути не менше 260 км/год, що для існуючих на Україні типів підвіски не витримується. Для досягнення цього контактна мережа має бути запроектована й споруджена на інших принципах із збільшенням натягу контактного проводу удвічі, зменшенням довжини анкерних дільниць до 1400 м, застосуванням горизонтальних консолей, рознесенням перехідних опор та анкетування проводів тощо. Усе це вимагає нових підходів у проектуванні, будівництві та застосуванні бронзових проводів, нових матеріалів несучих та інших конструкцій.

Якщо говорити про нормативні документи, то за останні роки на замовлення Департаменту електрифікації та електропостачання Державним науково-дослідним центром Укрзалізниці було розроблено три основні альбоми типових технічних рішень схем, спряжень та вузлів контактної мережі з ізолюваними горизонтальними консолями для швидкості руху 200 км/год для контактної мережі змінного струму. Роботи повністю не заверше-

ні через відсутність фінансування, їх необхідно продовжити. Але це лише одна сторона медалі. Також за даними технічними рішеннями не менш важливим є організація та освоєння вітчизняними підприємствами виробництва необхідних типів вузлів, деталей та арматури контактної мережі, для того щоб не залежати від імпорتنих виробників. Робота вже розпочалася, але навіть при достатньому фінансуванні та зацікавленості виробників, що напряму залежить від планів впровадження зазначеного типу контактної мережі на Укрзалізниці, на це піде не один рік. Можна рухатися й по іншому шляху, а саме — замовити контактну мережу «під ключ» імпортним виробникам, але це знову ж таки вимагатиме відповідного фінансування та стримуватиме розвиток вітчизняної економіки.

У цьому коментарі не порушується питання готовності до впровадження швидкісного руху іншої інфраструктури — колії та пристроїв СЦБ, а також рухомого складу, проблеми там аналогічні, і вирішувати їх потрібно в комплексі.

Упевнений, що при фаховому планомірному підході до вказаної проблеми, належній увазі з боку держави, достатньому фінансуванні Укрзалізниці в недалекій перспективі зможе забезпечити збільшення швидкостей перевезення пасажирів до 200 км/год.

”

трипроводного 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 симетрич-

ному 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 су-

міжні 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 і 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.

► 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 навантаження фаз, значні обсяги транзиту реактивної енергії тощо. Звичайно, наукові дискусії щодо того, яка система електрифікації краща, ведуться давно, але детальний й комплексний порівняльний аналіз 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. 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 віддачею 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.

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.

Нині в електровозобудівній промисловості вже є приклади використання в тяговому приводі асинхронних електродвигунів, переваги яких підтверджені досвідом експлуатації на залізницях Європи. Склалася парадоксальна ситуація, коли технічно досконалий електрорухомий склад, побудований на базі останніх досягнень у галузі силової електроніки, поєднується з дуже недосконалими, застарілими пристроями електропостачання. 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.

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

рювального 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 використувати існуючий електрорухомий склад, розрахований на напругу 3 кВ. Необхідно зазначити, що схемні рішення електронних трансформаторів також опрацьовані достатньою мірою для впровадження [6].

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. Насамкінець зазначимо, що впровадження нових, сучасних систем електропостачання дозволить реа-

лізувати 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 проекрованої (реконструйованої) лінії: максимальна допустима та експлуатаційна швидкість руху, тип застосовуваного 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 застосовуються 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: организация надежного токосъема / В. Н. Яндович, В. Г. Сыченко, А. В. Антонов // Электрификация транспорта. — № 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. А. с. 2258994 RU, МКИ H02J3/00, 3/04. Система распределенного электроснабжения переменного тока железной дороги трехфазными симметрирующими трансформаторами и однофазными трансформаторами / Р. Р. Мамошин (RU), А. М. Василянский. — № 2258994/C2; Заявл. 20.12.2001 ; Опубл. 20.08.2005, Бюл. № 23, 5 с.
4. Бородулин Б. М. Симметрирование токов и напряжений на действующих тяговых подстанциях переменного тока / Б. М. Бородулин // Вестник ВНИИЖТ. — 2003. — № 2. — С. 14–17.
5. 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.