

УДК 621.314.57

*Канд. техн. наук О.І. Семененко
С.М. Мараховець, С.В. Бірюков*

**ВХІДНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПІДВИЩЕНОЇ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ**

Представив д-р техн. наук, професор Я.В. Щербак

Система тягового електропостачання постійного струму має відносно низький рівень напруги -3,3 кВ, що не дозволяє суттєво збільшувати навантаження на діючу контактну мережу. Навіть підсилена тягова мережа постійного струму при значних навантаженнях, а особливо при швидкісному русі, залишається критичною з умов втрат енергії, нагріву контактних проводів та якісного струмозняття. Радикальним рішенням цієї проблеми є підвищення напруги в мережі, і технічна реалізація такої системи тягового

електропостачання постійного струму на сьогодні не викликає особливих труднощів. Невирішеним залишається питання створення електрорухомого складу (ЕРС) постійного струму на підвищену напругу живлення.

У 60-ті роки минулого сторіччя співробітники Московсь

кого енергетичного інституту та Тбіліського електровозобудівного заводу розробили систему електричної тяги постійного струму з номінальною

напругою контактної мережі 6 кВ. Ця система не вимагала суттєвої реконструкції пристроїв електропостачання, бо для підвищення напруги в контактній мережі на тяговій підстанції було поєднано послідовно два мостових випрямних агрегати по 3,3 кВ кожний. Підсилення ізоляції контактної мережі ділянки взагалі не було потрібне, адже в мережах постійного струму 3 кВ вона розрахована на мокророзрядну напругу 50 кВ, тому легко витримувала напругу 6 кВ.

Побудований у 1970 році на Тбіліському електровозобудівному заводі дослідний електровоз постійного струму на 6 кВ ВЛ10^В з тяговими електродвигунами (ТЕД) пульсуючого струму замість однократного перетворення, яке звичайно реалізується за допомогою контакторно-реостатних пристроїв, мав потрібне перетворення енергії живлення ТЕД. Вибір такої структури тягового електропривода був обумовлений неможливістю виготовлення ТЕД у колісному габариті з напругою на колекторі більше 1500 В та труднощами використання послідовного з'єднання чотирьох ТЕД при живленні від тягової мережі 6 кВ.

Випробування, які проводились з 1970 по 1974 рік на Закавказькій залізниці, підтвердили працездатність та ефективність такої системи електричної тяги, а також підвищення навантажувальних можливостей контактної мережі та пропускної спроможності ділянки залізниці. Водночас було виявлено ряд суттєвих недоліків дослідного електровоза ВЛ10^В, що потребували доопрацювання:

- великі габаритні розміри та масу мало перетворювальне електрообладнання тягового електропривода, тому виникали проблеми з його розміщенням на електровозі;

- обмежена потужність елементів вхідного фільтра не дозволила повністю виключити негативний вплив електровоза на живлячу тягову мережу, що створювало значні завади для роботи засобів зв'язку та

автоблокувань і спричиняло зниження коефіцієнта потужності;

- система тягового електропривода мала знижений ККД, що пов'язано з потрібним перетворенням електроенергії, тому економія електроенергії в системі електропостачання за рахунок збільшення напруги до 6 кВ майже дорівнювала її втратам на електровозі.

Можна назвати ще декілька прикладів створення дослідних електровозів та електропоїздів постійного струму для системи тяги 6 кВ у радянські часи, які не вдалося успішно реалізувати. Відомо також, що спроби фахівців італійських залізниць створити систему електричної тяги 12÷18 кВ постійного струму також не мали успіху [1].

Сьогоднішній рівень розвитку силової електроніки дозволяє створювати надійні перетворювачі для тягового електропривода ЕРС постійного струму зі значно меншими масою та габаритними розмірами, ніж у згаданих вище дослідних зразків. Цього можна досягти в першу чергу застосуванням силових ключів на базі сучасних високовольтних біполярних транзисторів з ізолюваним затвором, з англійської скорочено IGBT [2]. Максимально допустимі значення напруги IGBT сьогодні досягли 10-12 кВ, для серійних зразків – 6,5 кВ при струмі близько 1 кА.

Щоб капітальні витрати на спорудження і втрати енергії були еквівалентними показникам тягової мережі змінного струму 25 кВ, значення напруги в мережі постійного струму повинно дорівнювати 12÷16 кВ [1]. Застосування сучасного ЕРС змінного струму з підвищеним коефіцієнтом потужності наближає еквівалентне значення напруги до максимального у вказаному діапазоні.

Для вхідного перетворювача ЕРС постійного струму на 16 кВ потрібно застосувати послідовне поєднання чотирьох високовольтних IGBT, а також потрібне перетворення енергії, що суттєво

збільшить розміри, масу і вартість електрообладнання та знизить ККД тягового електропривода. Пропонується прийняти дещо нижче указанного значення напруги тягової мережі постійного струму, але на рівні вищому, ніж у попередніх розробках радянських часів, – 9 кВ. Така напруга дозволяє суттєво покращити показники системи електропостачання в плані зниження витрат на спорудження і втрат енергії та при цьому не надто ускладниться структура вхідного перетворювача ЕРС постійного струму.

Вхідний перетворювач такого ЕРС постійного струму має знижувати рівень вхідної напруги до необхідного для живлення ТЕД в режимі тяги, а також підвищувати напругу від ТЕД в режимі рекуперативного гальмування для повернення електроенергії в тягову мережу. Для зменшення ступенів перетворення енергії на ЕРС при номінальній напрузі тягової мережі 9 кВ можна застосувати в якості вхідного широтно-імпульсний перетворювач (ШПІ) і обмежитись послідовним поєднанням у його ключах двох високовольтних IGBT. В якості навантаження вхідного перетворювача можуть бути безпосередньо підключені ТЕД постійного струму в модернізованому ЕРС або інвертор для живлення безколекторних ТЕД змінного струму на новому ЕРС.

Розвиток системи електричної тяги постійного струму підвищеної напруги суттєво стримується наявністю ще однієї проблеми, яка пов'язана з застосуванням імпульсних вхідних перетворювачів ЕРС. Ця проблема – широкий спектр гармонік струму, який споживається імпульсним вхідним перетворювачем із тягової мережі. Наявність гармонік струму, як вже було зазначено вище, ускладнює забезпечення електромагнітної сумісності ЕРС із засобами зв'язку, рейковими колами автоблокування та іншими засобами керування об'єктами залізничного транспорту. Часом при введенні ЕРС

нового покоління навіть на напругу тягової мережі постійного струму 3 кВ доводиться замінити на ділянках його обігу рейкові кола автоблокування (наприклад, на швидкісній лінії Санкт-Петербург – Москва). Із цією ж проблемою стикнулися в Росії при випробуваннях і доведенні двосистемного електровоза ЕП10 та електропоїзда ЕДб.

Якщо в якості вхідного перетворювача ЕРС постійного струму застосувати звичайний оборотний ШПІ із знакозмінним струмом [3], то навіть використання силових ключів на базі сучасних високовольтних IGBT, які мають досить високі частотні властивості, не забезпечить повного подолання указанного вище недоліку. Використання підвищеної частоти перетворення суттєво зменшує масу і габаритні розміри фільтрового обладнання та для придушення гармонік вхідного струму до необхідного рівня цього виявляється недостатньо.

При коефіцієнті заповнення $\tau = 1/3$, який забезпечує трикратне зниження напруги від 9 до 3 кВ при реалізації режиму тяги, амплітуда першої гармоніки струму I_{d1m} відносно постійної складової вихідного струму i_{B0} згідно з рівняння із роботи [3]

$$I_{d1m} = \frac{2}{T_n} \int_{-\pi_n/2}^{\pi_n/2} i_{B0} \cos \omega_n t dt = \frac{2}{\pi} i_{B0} \sin \pi \tau$$

буде складати $I_{d1m}^* = \frac{2}{\pi} \sin \frac{\pi}{3} \cong 0,55$.

Для придушення занадто вагомого значення першої гармоніки вхідного струму до необхідного рівня потрібно або суттєво підвищити частоту перетворення, або прийняти спеціальні заходи, які дозволять зменшити амплітуди гармонік. Один із варіантів вирішення завдання полягає у виконанні оборотного ШПІ із знакозмінним струмом за трифазною

схемою, яка заборонена на рис. 1. У режимі тяги повинні працювати транзисторні ключі $VT1-VT3$ і зворотні діоди $VD4-VD6$, у

режимі рекуперативного гальмування – транзисторні ключі $VT4-VT6$ і діоди $VD1-VD3$.

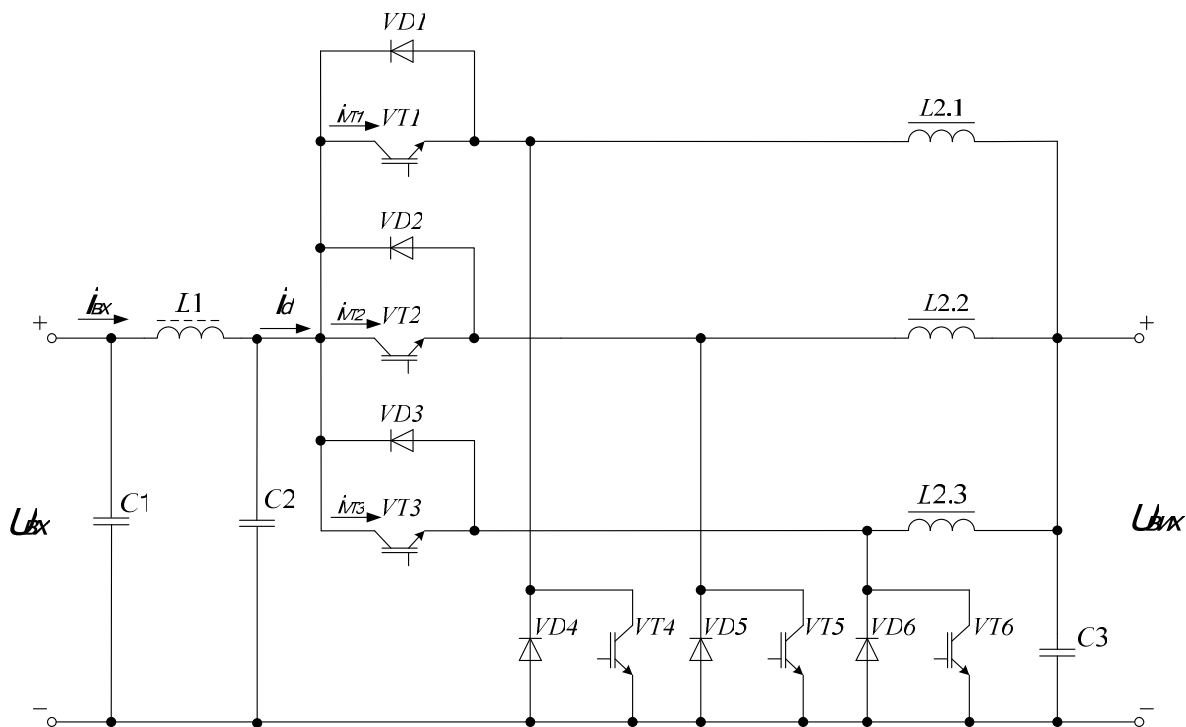


Рис. 1. Схема вхідного трифазного оборотного ШПІ

При $\tau=1/3$ тривалість імпульсів струму ключів $VT1-VT3$ різних фаз буде дорівнювати $T/3$, а їх часовий зсув має таке саме значення $T/3$, як показано на діаграмах (рис. 2, а-в). Майже прямокутна форма імпульсів струму ключів i_{VT} в сталому режимі є наслідком застосування зрівняльного реактора на загальному тристержневому осерді $L2$ [4-5]. Оскільки кожна з фаз перетворювача працює по чергову, створюється безперервний процес споживання струму від джерела енергії. У результаті сумарний струм i_d має пульсації, спричинені в основному комутаційними сплесками, частота їх зростає втричі. Застосування легкого LC -

фільтра забезпечує практично відсутність пульсацій вхідного струму i_{bx} (рис. 2, г) трифазного ШПІ, що підтверджено моделюванням [5].

У режимі рекуперативного гальмування транзисторні ключі $VT4-VT6$ працюють з τ близьким до $2/3$, а тривалість імпульсів струму через діоди $VD1-VD3$ буде дорівнювати $T/3$. За рахунок цього створюється практично безперервний сумарний вихідний струм рекуперації подібно тому, як показано на діаграмах (рис. 2, а-г) у режимі тяги. Відміна полягає в зміні на протилежний напрямку струму, а також напруги на $L2$ (рис. 2, д).

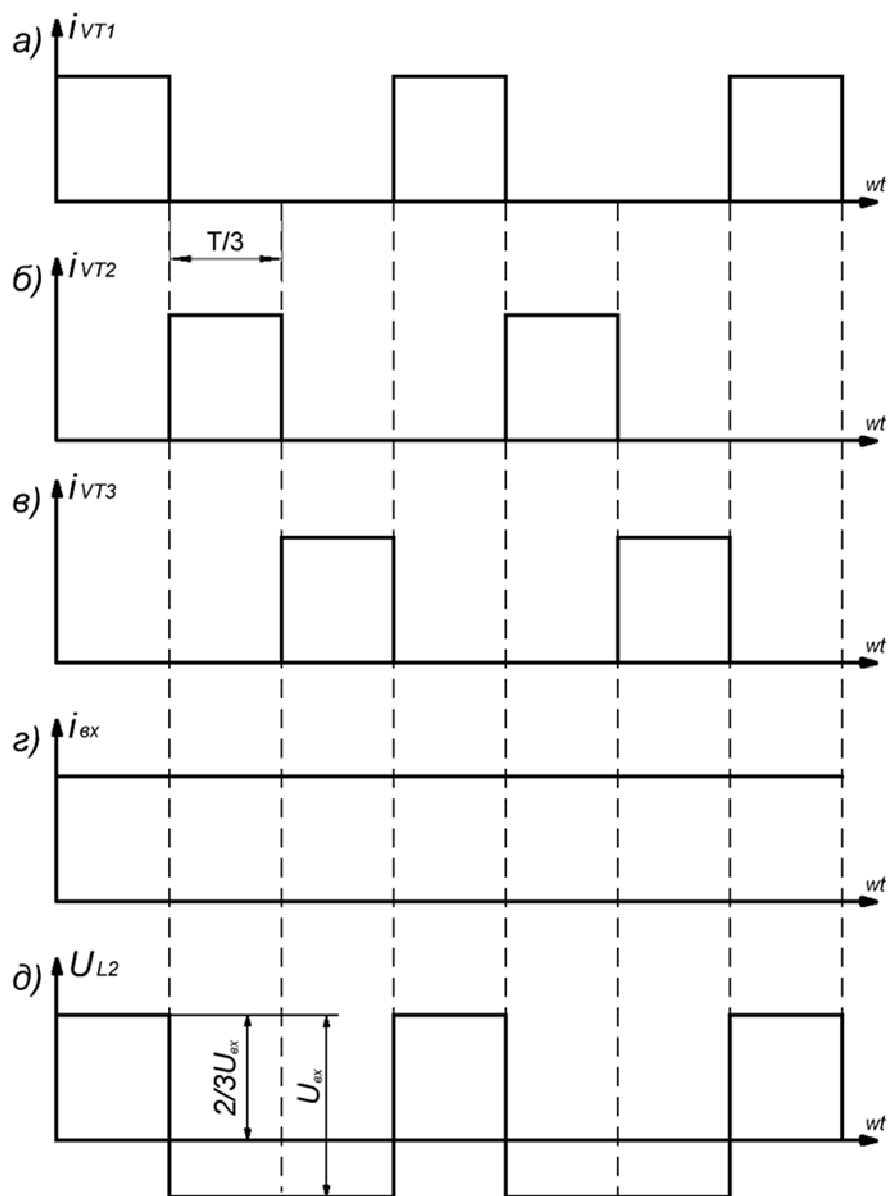


Рис. 2. Діаграми роботи трифазного ШП

Висновки:

1. Сучасний рівень розвитку силової електроніки дозволяє створювати вхідні перетворювачі з ключами на базі високовольтних IGBT для ЕРС постійного струму з підвищеною до 9 кВ напругою живлення.

2. Вирішення завдання забезпечення електромагнітної сумісності ЕРС постійного струму з напругою живлення 9 кВ із засобами зв'язку, рейковими колами автоблокування та іншими засобами полягає в застосуванні у якості вхідного трифазного оборотного ШП.

Список літератури

1. Корниенко, В.В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы (Аналитический обзор) [Текст]: монография / В.В. Корниенко, А.В. Котельников, В.Т. Доманский. – К.: Транспорт Украины, 2004. – 196 с.
2. Лувишис, А.Л. Применение силовых биполярных транзисторов с изолированным затвором в преобразователях зарубежного тягового подвижного состава [Текст] / А.Л. Лувишис // Ж.-д. транспорт. Сер. Локомотивы и локомотивное хозяйство. Ремонт локомотивов. ОИ/ЦНИИТЭИ МПС. – 1999. – Вып. 1-2. – С. 1-64.
3. Гончаров, Ю.П., Статичні перетворювачі тягового рухомого складу [Текст] / Ю.П. Гончаров, М.В. Панасенко та ін.; за ред. Ю.П. Гончарова. – Харків: НТУ «ХП», 2007. – 192 с.
4. Гончаров, Ю.П. Система електропостачання контактної мережі постійного струму з подовженою лінією підвищеного напруги [Текст] / Ю.П. Гончаров, Н.В. Панасенко, В.В. Замаруєв, В.В. Івахно, С.Ю. Кривошеєв, А.І. Семененко // Тез. І Міжнарод. науч.-практ. конференції «Електрифікація залізничного транспорту «Транселектро-2007» (3.10 – 06.10.07). – Дніпропетровськ, 2007. – 117 с.
5. Семененко, О.І. Трифазний ШПД для пункту підвищення напруги 10/3,3 кВ [Текст] / О.І. Семененко, Т.В. Ісакова, Є.А. Аветісов // зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 126 – С. 204-208.

Ключові слова: електрорухомий склад постійного струму, пульсації струму, транзисторні ключі, трифазний оборотний широтно-імпульсний перетворювач.

Анотації

Розглянуто питання створення високоефективної системи тяги постійного струму з підвищеною напругою живлення. Запропоновано для електрорухомого складу постійного струму з напругою живлення 9 кВ виконувати вхідні перетворювачі з ключами на базі високовольтних IGBT.

Для зменшення пульсацій струму в тяговій мережі вхідний широтно-імпульсний перетворювач такого електрорухомого складу слід виконувати як трифазний із загальним зрівняльним реактором на трестержневому осерді.

Рассмотрен вопрос создания высокоэффективной системы тяги постоянного тока с повышенным напряжением питания. Предложено для электроподвижного состава постоянного тока с напряжением питания 9 кВ выполнять входные преобразователи с ключами на базе высоковольтных IGBT.

Для уменьшения пульсаций тока в тяговой сети входной широтно-импульсный преобразователь такого электроподвижного состава следует выполнять как трехфазный с общим уравнительным реактором на трехстержневом сердечнике.

The question of a traction system vysokoeffektivnoy DC high voltage power supply. Proposed for electric rolling DC supply voltage 9 kV transformers to perform input with the keys on the basis of high-IGBT.

To reduce the ripple current in the power train input pulse width of the transducer electric rolling stock should be performed as a phase of general smoothing reactor on the trehsterzhnevom core.