

УДК 621.311

М. В. Панасенко, Ю. П. Гончаров, В. Г. Сиченко

## Проблеми електромагнітної сумісності підсистем електричної тяги постійного струму і використання засобів силової електроніки для їх вирішення

*Розглянуті проблеми електромагнітної сумісності підсистеми електричної тяги постійного струму (тягового електропостачання та електрорухомого складу) та їх вирішення засобами силової електроніки.*

### 1. Аналіз стану проблеми і постановка задачі дослідження

Електрична тяга постійного струму напругою 3 кВ має розповсюдження на залізницях світу та України на рівні з електричною тягою змінного струму промислової частоти напругою 25 кВ [1]. Її підсистеми: тягове електропостачання та електрорухомий склад, не зважаючи на використання порівняно низької величини напруги в тяговій мережі, мають кращі деякі енергетичні характеристики у порівнянні з підсистемами електричної тяги змінного струму. Так, в підсистемі тягового електропостачання постійного струму (ТЕПС) порівняно простіше вирішується задача симетричного навантаження фаз зовнішньої живлячої енергомережі, в той час як в підсистемі тягового електропостачання змінного струму промислової частоти (ТЕЗС) ця проблема ще чекає свого вирішення [2]. Щодо електрорухомого складу постійного струму, то, не зважаючи на порівняно низький рівень живлячої напруги, його коефіцієнт корисної дії є дещо вищим коефіцієнта корисної дії електрорухомого складу змінного струму [3]. Ці позитивні чинники, а також той факт, що електрорухомий склад постійного струму є дешевшим електрорухомого складу змінного струму, дають можливість говорити ще про довге «життя» електричної тяги постійного струму напругою 3 кВ на залізницях України (не зважаючи навіть на те, що підсистема ТЕПС є дещо дорожчою існуючої підсистеми ТЕЗС 25 кВ). Отже, ще на довготривалий час задача подальшого підвищення ефективності підсистем електричної тяги постійного струму буде вельми актуальною для залізниць України. Важливою складовою цієї задачі (поряд з енергетичними і надійнісними проблемами) є проблема електромагнітної сумісності. При цьому електромагнітну сумісність підсистем електричної тяги необхідно розглядати у більш широкому аспекті, а саме, як з боку виключення негативного впливу підсистем електричної тяги (тягового електропостачання та електрорухомого складу) на пристрої залізничної автоматики, зв'язку та інші суміжні пристрої, так і з боку виключення негативного впливу на якість споживаємої електроенергії та негативного впливу однієї підсистеми електричної тяги на іншу, а також на систему зовнішнього електропостачання. Це стосується роботи системи електричної тяги як в тяговому режимі, так і її гальмівного режиму. Відзначимо, що окремі питання покращення

електромагнітної сумісності підсистем електричної тяги постійного струму, щодо конкретного їх аспекту, були предметом досліджень фахівців в галузі електричного транспорту [4–12]. Однак, цілісного підходу до розробки заходів по підвищенню електромагнітної сумісності підсистем електричної тяги постійного струму залізниць України поки що не має. Одним із напрямків по вирішенню проблем електромагнітної сумісності підсистем електричної тяги постійного струму в рамках розширеного її аспекту є використання досягнень силової електроніки.

Метою даної статті є окреслення найбільш доцільних схемотехнічних рішень для вирішення проблем електромагнітної сумісності тягових підстанцій постійного струму з зовнішньою трифазною електромагнітною і тяговою мережею та тягової асинхронної електродопередачі електрорухомого складу постійного струму з тяговою мережею засобами силової електроніки.

### 2. Засоби силової електроніки для покращення електромагнітної сумісності тягових підстанцій постійного струму

Основною ланкою нового покоління тягових підстанцій постійного струму залізниць України, яка визначає на сьогоднішній день їх електромагнітну сумісність з зовнішньою живлячою електромережею трифазного струму і тяговою мережею постійного струму, є дванадцятипульсний тяговий перетворювальний агрегат на основі двох діодних трифазних мостів [13]. У порівнянні з шестипульсними діодними випрямлячами він має відносно низький рівень вищих гармонік в мережевому струмі і випрямленій напрузі та коефіцієнт потужності на стороні живлячої мережі на рівні  $0,95 \div 0,96$  [5]. Однак ці характеристики суттєво погіршуються при переході на тиристорні мости [7, 14] з метою надання перетворювальним агрегатам регульованих властивостей для забезпечення оптимального керування живленням тягової мережі [15].

З урахуванням жорстких вимог сучасних стандартів до електромагнітної сумісності тягових перетворювальних агрегатів підстанцій постійного струму з живлячою і тяговою мережами можна стверджувати, що тиристорні випрямлячі у своєму класичному виконанні, (які працюють в режимі стабілізації напруги на шинах тягової підстанції), не забезпечують потрібного рівня якості перетворення електроенергії трифазного

© М. В. Панасенко, Ю. П. Гончаров, В. Г. Сиченко 2009 р.

змінного струму в постійний струм. Це стосується як несинусоїдальності мережевих струмів і генерованої потужності, так і гармонічного складу випрямленої напруги і достатньо великої інерційності (до 10 мс) переходу агрегата із випрямного (тягового) в інверторний (рекуперативний) режими або режим нульової вихідної напруги (струмообмежувальний).

Компенсація реактивної потужності і близька до синусоїди форма мережевого струму в перетворювальних агрегатах, побудованих на дванадцятипульсних тиристорних випрямлячах (як некомпенсованих, так і компенсованих), забезпечуються при використанні силового активного фільтра (САФ) на основі автономного інвертора напруги (АІН) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ), тобто при використанні засобу силової електроніки [16] (рис. 1, а, б).

Однак, такий підхід до вирішення проблеми електромагнітної сумісності перетворювальних агрегатів із зовнішньою трифазною енергомережею приводить до значного збільшення встановленої потужності електрообладнання тягових підстанцій і не вирішує задачу забезпечення якісною електроенергією тягової мережі. Останнє потребує для забезпечення електромагнітної сумісності перетворювального агрегату з тяговою мережею установки на виході перетворювального агрегата вельми потужних багатоланкових резонансно-аперіодичних LC-фільтрів [17].

Принципово новий рівень електромагнітної сумісності тягового перетворювального агрегата з живлячою і тяговою мережами може бути реалізований при переході на випрямлячі напруги з широтно-імпульсним регулюванням (ШІР-випрямлячі) [18, 19].

Відмітимо, що сьогодні цей засіб силової електроніки ще не може бути ефективно реалізованим на потужностях перетворювальних агрегатів, задіяних на підсистемах тягового електропостачання постійного струму залізниць у зв'язку з відсутністю на ринку силової елек-

троніки достатньо потужних високовольтних повністю керованих напівпровідникових приладів з робочою частотою перемикачів 1 і більше кГц. Однак, такі ШІР-випрямлячі можуть ефективно використовуватися вже сьогодні для вирішення електромагнітної сумісності тягових перетворювальних агрегатів при використанні їх в якості реверсивного вольтододатка дванадцятипульсних випрямлячів вольтододаткового типу [6, 7].

Так, використання для дванадцятипульсного напівкерованого випрямляча вольтододаткового типу в якості реверсивного вольтододатка ШІР-випрямляча з двоквADRантними ключами знакозмінної напруги на основі запираємих напівпровідникових приладів (рис. 2), працюючого в режимі однополярної синусоїдальної ШІМ, дає можливість на сучасній елементній базі силової електроніки при збільшенні встановленої потужності перетворювача вольтододаткового типу на 20–25% у порівнянні з встановленою потужністю чисто діодного (або діодно-тиристорного чи тиристорного) дванадцятипульсного випрямляча реалізувати при прийнятних величинах встановленої потужності додаткового фільтро-компенсуючого електрообладнання практично повну електромагнітну сумісність тягової підстанції постійного струму з живлячою і тяговими мережами в робочих (сталих) і аварійних (перехідних) режимах роботи [7, 21–24].

Як показують розрахунки, за допомогою дванадцятипульсного напівкерованого випрямляча з реверсивним запираємим вольтододатком, виконаного на сучасній елементній базі силової електроніки, забезпечується необхідний рівень електромагнітної сумісності при приблизно на 30 % меншій масі Г-подібного вихідного LC-фільтру та без установки додаткових фільтрів-пробок. Подальше зниження маси Г-подібного LC-фільтру при збереженні рівня електромагнітної сумісності обмежується необхідністю придушення гармонік з частотою ШІМ вольтододатка, яка може ре-

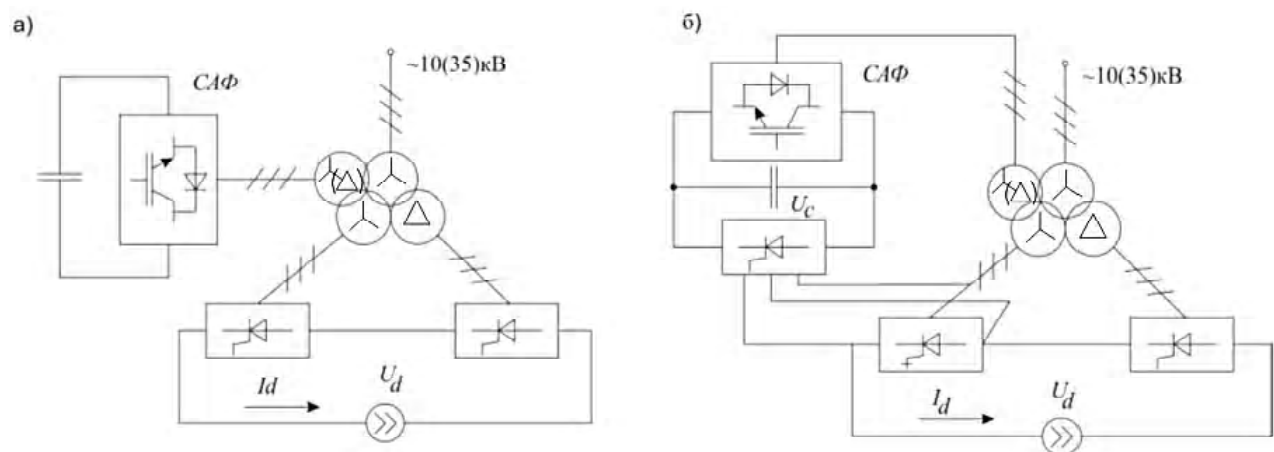


Рис. 1. Структурні схеми силових ланцюгів дванадцятипульсних тиристорних випрямлячів з коефіцієнтом потужності, близьким до одиниці і синусоїдальною формою мережевого струму: а) некомпенсованого; б) компенсованого

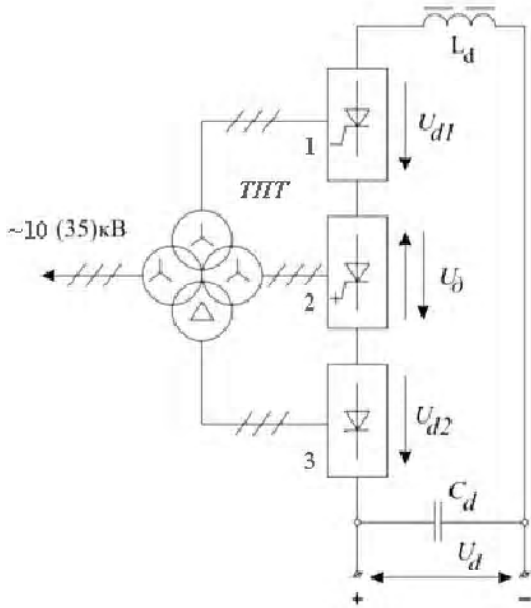


Рис. 2. Структурна схема силових ланцюгів дванадцятипульсного напівкерованого випрямляча вольтододаткового типу з реверсивним вольтододатком на основі ШІР-випрямляча: ТПТ – тяговий перетворювальний трансформатор; 1, 3 – трифазні мостові комутатори (1– тиристорний, 3– діодний) основного дванадцятипульсного випрямляча; 2 – трифазний комутатор запираємого вольтододатка;  $L_d-C_d$  – вихідний Г-подібний аперіодичний фільтр

ально реалізуватися в межах 1200–1800 Гц, а також комбінаційних гармонік більш низької частоти, генерованих вольтододатком при його роботі в якості активного фільтра. Всі ці гармоніки приходяться на пік

пософометричної кривої [17] і отже, повинні придушуватися. Ця перешкода на шляху подальшого зниження маси Г-подібного вихідного LC-фільтра усувається при використанні в якості вихідного фільтра гібридного фільтра на основі малопотужного активного фільтра паралельного типу [32]. Один з варіантів такого гібридного фільтра (ГФ) на базі автономного інвертора струму для використання на тягових підстанціях постійного струму з дванадцятипульсними випрямлячами вольтододаткового типу показаний на рис. 3.

### 3. Засоби силової електроніки для покращення електромагнітної сумісності електрорухомого складу постійного струму

Аналіз тягового струму електрорухомого складу постійного струму з асинхронними тяговими двигунами (АТД) показує, що такий електрорухомий склад є генератором дуже широкого спектру гармонійних складових цього струму, а саме: складових кратних частоті ШІМ напруги АН; складових кратних частоті живлячої напруги АТД, складових, кратних цим частотам [25], а також, низькочастотних складових, обумовлених коливаннями моменту на валах АТД [26]. Ці гармонійні складові тягового струму відіграють роль завад для пристроїв залізничної автоматики, телемеханіки і зв'язку, працюючих як у підтональному (0–300 Гц), так і у тональному (300–3400 Гц) та надтональному (3,5–6 кГц) діапазонах частот [27, 28].

Традиційним засобом забезпечення електромагнітної сумісності електрорухомого складу постійного струму з АТД є установка на вході тягової електропередачі пасивного вхідного LC-фільтра [29], параметри ємності  $C$  і індуктивності  $L$  якого визначаються із умови [30]:

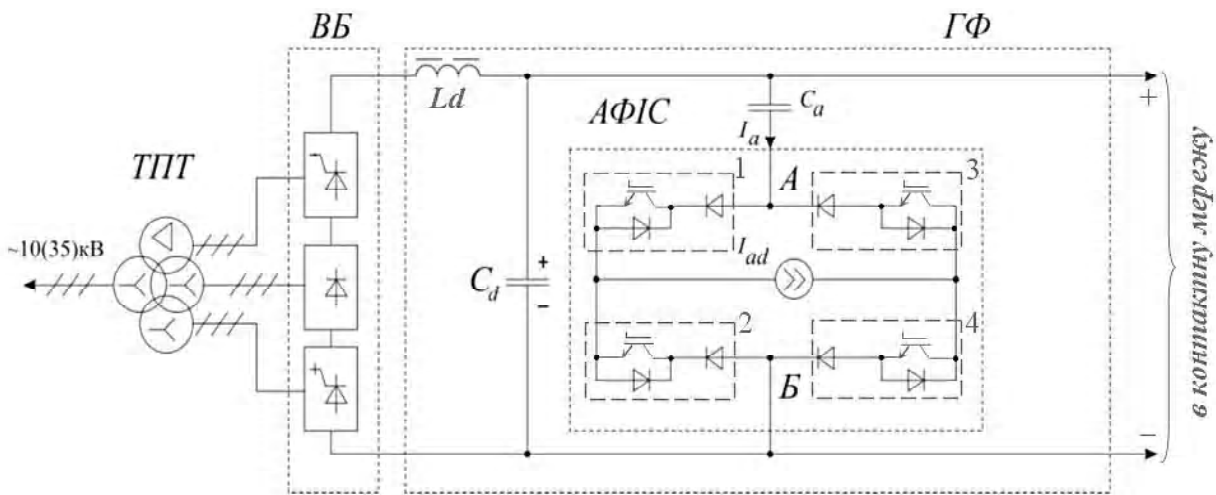


Рис. 3. Структура гібридного фільтра (ГФ) з активним фільтром паралельного типу на базі автономного інвертора струму (АФІС): ТПТ – тяговий перетворювальний трансформатор; ВБ – вентиляний блок на основі дванадцятипульсного напівкерованого випрямляча вольтододаткового типу;  $L_d-C_d$  – вихідний пасивний LC-фільтр; 1–4 – двох-квadrантні ключі знакозмінної напруги комутатора силового активного фільтра;  $C_a$  – конденсатор, що блокує протікання в АФІС постійної складової струму

$$f_{\text{резLC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \leq f_{\text{гран}}^- \quad (1)$$

де  $f_{\text{резLC}}$  – резонансна частота LC-фільтра;  
 $f_{\text{гран}}^-$  – нижня гармонійна частота робочого діапазону пристроїв залізничної автоматики, яка, у відповідності [30], для залізниць приймається рівною 21 Гц.

Однак, як показали експериментальні дослідження роботи російського електровоза ЕП10 на лініях постійного струму, при використанні одноланкового пасивного LC-фільтра з параметрами, розрахованими у відповідності з (1), позбавитися низькочастотних гармонійних складових у тяговому струмі, шкідливих як з частоти, так і з амплітуди, з точки зору нормальної роботи залізничної автоматики, не вдається [9].

Повна компенсація у тяговому струмі вищих гармонік, генерованих електрорухомим складом постійного струму, може бути досягнута при використанні активного фільтра в якості вхідного фільтра тягової асинхронної електропередачі [31]. Схемотехнічною основою цього фільтра може бути оборотний ШІМ-перетворювач з ємнісним накопичувачем електроенергії, працюючий з частотою модуляції  $f_{\text{ШІМ}}$ , яка визначається із умови [7]

$$f_{\text{ШІМ}} \geq 2 f_{\text{гран}}^+ \quad (2)$$

де  $f_{\text{гран}}^+$  – верхня гармонійна частота робочого діапазону пристроїв залізничної автоматики, яка у відповід-

ності з загальноприйнятою практикою [33] дорівнює 2000 Гц.

Значним обмеженням у використанні чисто активних фільтрів, як засобів силової електроніки для забезпечення електромагнітної сумісності електрорухомого складу постійного струму з АТД є те, що їх встановлена потужність повинна бути практично рівною з потужністю тягового автономного інвертора напруги, і отже, з урахуванням необхідності забезпечення їх вельми високої частоти ШІМ, буде мати дуже високу вартість.

Більш доцільним з економічної точки зору засобом силової електроніки для забезпечення електромагнітної сумісності електрорухомого складу постійного струму з АТД є використання на вході тягової асинхронної електропередачі гібридних фільтрів [10, 31] на основі поєднання пасивного LC-фільтра з активним фільтром послідовного типу, але суттєво менших потужностей [11]. Принцип дії такого гібридного фільтра полягає в тому, що для придушення низькочастотних (як канонічних, так і неканонічних) гармонік тягового струму використовується силовий активний фільтр (САФ) послідовного типу, а для придушення високочастотних гармонік тягового струму, обумовлених частотами ШІМ перетворювача і самого САФ, використовується індуктивність  $L$  силового пасивного LC-фільтра. Спрощений варіант силової схеми гібридного фільтра із елементами системи курування його активною складовою стосовно частотнорегульованого тягового електропривода (ЧР ТЕП) електрорухомого складу постійного струму, наведений на рис. 4 [12].

При забезпеченні чисто пасивним або гібридним

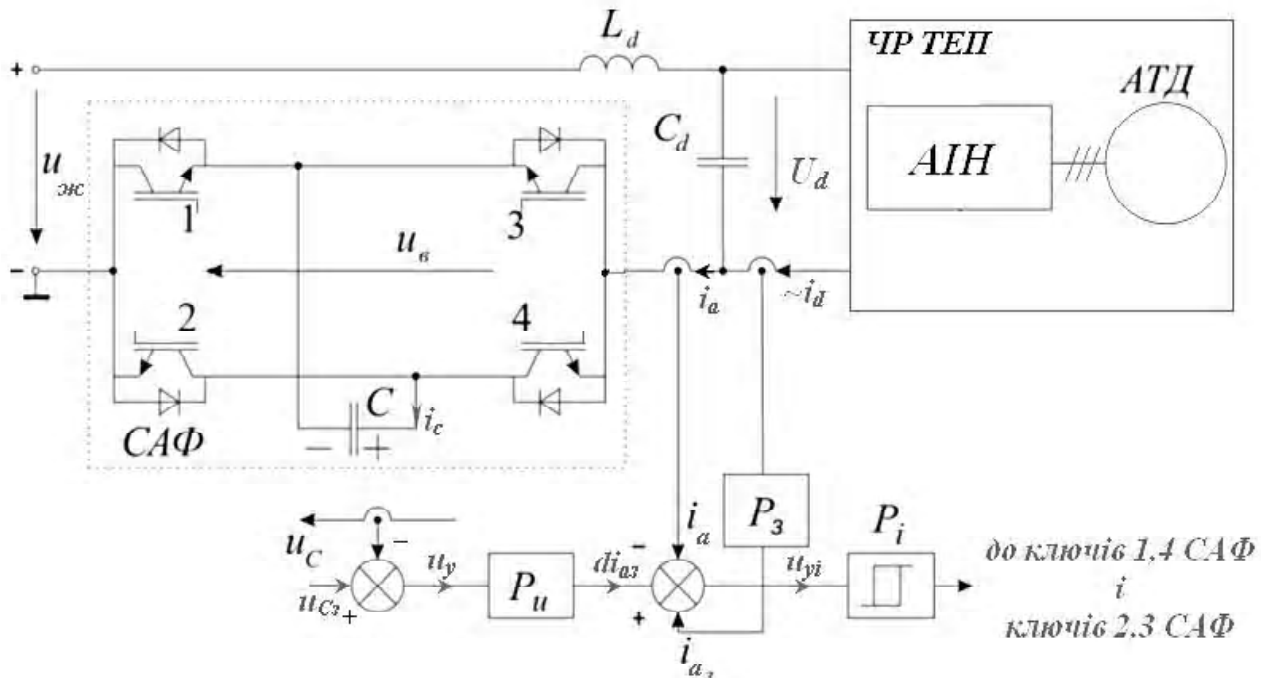


Рис. 4. Гібридний вхідний фільтр ЧР ТЕП електрорухомого складу постійного струму:  $u_{\text{жс}}$  – напруга живлення;  $L_d$ - $C_d$  – силовий вхідний пасивний фільтр; 1–4 – двоквADRANTні ключі знакозмінного струму комутатора силового активного фільтра (САФ);  $C$  – ємнісний енергонакопичувач;  $u_{\text{в}}$  – вихідна напруга САФ;  $i_c$  – струм енергонакопичувача;  $i_a$  – вхідний струм САФ;  $P_u$  – регулятор напруги на енергонакопичувачі;  $u_{c3}$  – сигнал завдання для напруги на енергонакопичувачі;  $i_{a3}$  – сигнал завдання для вхідного струму САФ;  $P_3$  – регулятор сигналу завдання для струму;  $\sim i_d$  – струм гармонійної завади, генерованої ТЕП;  $P_i$  – слідкуючий регулятор струму

фільтром в сталих режимах роботи тягової асинхронної електропередачі потужністю  $\geq 1$  МВт електромагнітної сумісності практично однакового рівня, маса гібридного фільтра є в декілька разів меншою у порівнянні з чисто пасивним фільтром. При цьому придушення амплітуд гармонік тягового струму в діапазоні частот від 1 до 150 Гц в гібридному фільтрі збільшується більш як на порядок [9, 11].

Але, не зважаючи на простоту, працездатного гібридного фільтра для тягових асинхронних електропередач магістрального електрорухомого складу постійного струму ще не створено. Це обумовлено специфікою роботи таких тягових асинхронних електропередач, а саме:

- широкий частотний спектр гармонік, генерованих ЧР ТЕП, до якого додаються і гармоніки ШІМ активного фільтра;
- жорсткі зовнішні впливи у вигляді перевантажень зі струмом і перенапруг, які виникають у перехідних і аварійних режимах;
- змінний характер параметрів тягової мережі електроживлення, зокрема, коливання в широких межах значень індуктивності контактної мережі відносно електрорухомого складу;
- незадовільні для активного фільтра динамічні властивості асинхронного тягового двигуна як наван-

таження.

На думку авторів, подальше удосконалення наведеної структури гібридного фільтра (рис. 4) стосовно її використання на електрорухомому складі постійного струму у блоці забезпечення електромагнітної сумісності (БЕМС) може бути досягнуто шляхом впровадження наступних пропозицій:

1) введення додаткового вузла короткочасного струмообмеження (КСО), забезпечуючого захист САФ від перевантажень за струмом, і, одночасно, обмеження аварійних струмів і перенапруг в схемі автономного інвертора напруги;

2) використання резонансного принципу фільтрації гармонік з частотою ШІМ активного фільтра, забезпечуючого ефективно придушення цих гармонік в існуючому діапазоні зміни індуктивності контактної мережі;

3) введення додаткових елементів керування для підвищення стійкості проти низькочастотних автоколивань і для компенсації впливу постійних часу асинхронного двигуна.

Блок забезпечення електромагнітної сумісності тягової асинхронної електропередачі електрорухомого складу постійного струму на основі гібридного фільтра з системою керування активною фільтрацією, в якому реалізовані вищенаведені пропозиції, показаний на рис. 5.

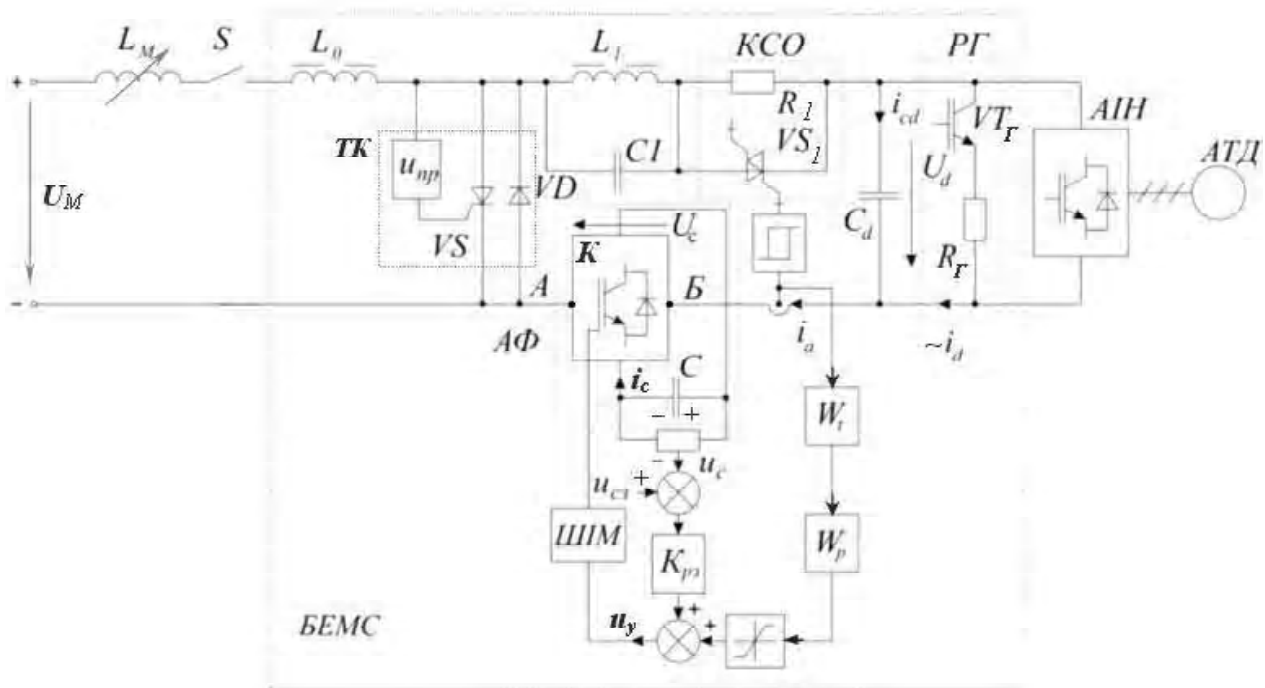


Рис. 5. Блок електромагнітної сумісності (БЕМС) з системою керування активною фільтрацією для асинхронної тягової електропередачі електрорухомого складу постійного струму:  $U_M$ ,  $L_M$  – параметри, замінюючи контактну мережу постійного струму;  $S$  – головний вимикач;  $TK$  – тиристорний короткозамикач на основі одно операційного тиристора  $VS$ , зворотного діода  $VD$  і елемент управління  $u_{упр}$ , задаючий поріг спрацювання короткозамикача з напруги;  $L_0$ ,  $L_1$  – секції дроселя LC-фільтра;  $C_d$  – конденсатор LC-фільтра;  $C1$  – резонансний конденсатор; КСО – вузол короткочасного струмообмеження ( $VS_1$  – запираємий чотирикватратний ключ;  $R_1$  – резистор струмообмеження); РГ – реостатне гальмо ( $VT_r$  – транзисторний ключ,  $R_r$  – реостата Г); АФ – активний фільтр ( $K$  – комутатор АФ;  $C$  – конденсатор енергонакопичувача АФ); ШІМ – ШІМ-контролер;  $W_p$  і  $K_{ps}$  – передаточні функції регуляторів у каналі гармонік і каналі енергонакопичувача;  $W_i$  – передаточна функція фільтра верхніх частот (ФВЧ);  $u_{cs}$  – сигнал завдання для напруги енергонакопичувача;  $u_c$  – сигнал, пропорційний напрузі  $U_c$  на енергонакопичувачі; АИИ – комутатор трифазного мостового автономного інвертора напруги; АТД – трифазний асинхронний тяговий двигун

## Висновки

1. Враховуючи жорсткість вимог сучасних стандартів до гармонійного складу мережевого і тягового струмів та до коефіцієнту потужності нелінійних споживачів, якою є і система електричної тяги постійного струму, проблеми електромагнітної сумісності тягового електропостачання і електрорухомого складу постійного струму не можна вирішити традиційними заходами і засобами.

2. Розвиток силової електроніки, посилюючи проблеми електромагнітної сумісності підсистем електричної тяги, в той же час, створює умови для розробки ефективних засобів підвищення її електромагнітної сумісності з живлячою і тяговою мережами.

3. Найбільш доцільним на сьогоднішній день технічним рішенням забезпечення електромагнітної сумісності тягових підстанцій постійного струму є використання дванадцятипульсних випрямлячів з реверсивним запираємим вольтодобудатком, працюючим у режимі активної фільтрації низькочастотних гармонік вихідної напруги та вихідних фільтрів, виконаних на основі активних фільтрів паралельного типу, для придушення високочастотних гармонік в тяговому струмі.

4. Найбільш доцільним технічним рішенням забезпечення електромагнітної сумісності електрорухомого складу постійного струму є використання в тягових асинхронних електропередачах блоку забезпечення електромагнітної сумісності, виконаних з гібридним фільтром на основі активного фільтра послідовного типу, в якому низькочастотні гармоніки придушуються активною ланкою, а високочастотні – пасивною ланкою.

5. Ефективне впровадження засобів силової електроніки для вирішення проблем електромагнітної сумісності системи електричної тяги постійного струму потребує подальшого дослідження поведінки і взаємного впливу однієї підсистеми на іншу в перехідних та аварійних режимах роботи.

## Перелік посилань

1. Корниенко, В. В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы [Текст] / В. В. Корниенко, А. В. Котельников, В. Т. Доманский. – Киев : Транспорт Украины, 2004. – 196 с.
2. Бурков, А. Т. Выбор рода тока и уровня напряжения электрического транспорта новых поколений: материалы Международного симпозиума «Eltrans'2001» [Текст] / А. Т. Бурков. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2002. – С. 37–40.
3. Курбасов, А. С. Система электрической тяги XXI века [Текст] / А. С. Курбасов // Железные дороги мираю. – 1999. – № 4. – С. 19–22.
4. Про електромагнітну сумісність електрифікованих залізничних ліній постійного струму [Текст] / І. В. Анохов та ін. // Залізничний транспорт України. – 2000. – № 2. – С. 10–12.
5. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций [Текст] / под ред. М. Г. Шалимова. – М. : Транспорт. – 1990. – 127 с.
6. Хворост, М. В. Базові положення теорії випрямлячів-стабілізаторів напруги для перетворювальних агрегатів головних тягових підстанцій метрополітенів з повздовжньою лінією постійного стру-

- му [Текст] / М. В. Хворост // Научн.-техн. сборник «Коммунальное хозяйство городов», № 60, Киев : Техника, 2004. – С. 236–247.
7. Гончаров, Ю. П. Полупроводниковый преобразователь с вольтадобавкой в качестве активного фильтра [Текст] / Ю. П. Гончаров, Н. В. Панасенко, В. В. Замаруев. – Технічна електродинаміка. Тем. вип. «Силовая электроника та енергоефективність», част. 2, 2007. – С. 112–117.
8. Сиченко, В. Г. До питання розробки активного фільтра тягової підстанції постійного струму [Текст] / В. Г. Сиченко, В. А. Зубенко, М. П. Бадьор. // Залізничний транспорт України, № 5, 2006. – С. 39–41.
9. Сорин, Л. Н. Оценка эффективности пассивных и активных фильтров для статических преобразователей электроподвижного состава [Текст] / Л. Н. Сорин, А. И. Лещев, В. В. Литовченко. // Известия вузов. Электромеханика, № 1, 2003. – С. 61–68.
10. Хворост, Н. В. Построение входного фильтра блока электромагнитной совместимости тяговой асинхронной электропередачи метровагона [Текст] / Н. В. Хворост, В. С. Никулин, М. А. Капустян. – Збірник наукових праць УкрДАЗТ, вип. 69, Харків : 2005. – С. 115–127.
11. Хворост, Н. В. Оценка эффективности гибридного фильтра блока электромагнитной совместимости тяговой электропередачи метровагона и контактной сети питания метрополитена [Текст] / Н. В. Хворост, В. С. Никулин. – Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, № 4, 2006. – С. 97–100.
12. Хворост, Н. В. Силовые активные фильтры для систем частотно-регулируемого привода на электрическом транспорте [Текст] / Н. В. Хворост, Ю. П. Гончаров, Ю. В. Чурсина. – Технічна електродинаміка. Тем. вип. «Силовая электроника та енергоефективність», част. 1, 2006. – С. 19–26.
13. Андриенко, П. Д. Диодные выпрямители нового поколения на ток 3150 А напряжение 3300В для магистральных железных дорог [Текст] / П. Д. Андриенко, А. Г. Ильин, В. Ф. Наконечный. – Тезисы I Международной научно-практической конф. «Трансэлектро-2007», Крым, Мисхор, 03.10–06.10 2007. – с. 2.
14. Хворост, М. В. Підвищення ефективності дванадцятипульсових випрямлячів тягових перетворювальних агрегатів метрополітенів з повздовжньою високовольтною лінією живлення постійного струму [Текст] / М. В. Хворост. – Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, № 3, 2004. – С. 50–54.
15. Андреев, В. Н. Современные схмотехнические, конструктивные и технологические решения устройств тягового электроснабжения. Обеспечение их наладки и эксплуатации [Текст] / В. Н. Андреев, А. В. Мизинцев, А. Д. Кондаков. – Материалы Международного симпозиума «Eltrans'2001», СПб, ПГУПС, 2002. – С. 106–107.
16. Жемеров, Г. Г. Новый класс преобразователей переменного напряжения в питающую, электромагнитно совместимых с питающей сетью [Текст] / Г. Г. Жемеров, Е. И. Сокол, Д. С. Крылов. –

- Технічна електродинаміка. Тем. вип. «Силова електроніка та енергоефективність», част. 1, 2001. С. 3 – 8.
17. Бурков, А. Т. Электронная техника и преобразователи [Текст] / А. Т. Бурков. – М.: Транспорт, 2001. – 464 с.
  18. Зиновьев, Г. С. Основы силовой электроники [Текст] / Г. С. Зиновьев. – Новосибирск, НГТУ, 2004. – 672 с.
  19. Статичні перетворювачі тягового рухомого складу [Текст] / за ред. Ю. П. Гончарова. – Харків : НТУ «ХПІ», 2007. – 192 с.
  20. Хворост, М. В. Силові схеми перетворювальних агрегатів головних тягових підстанцій метрополітену з повздовжньою лінією живлення [Текст] / М. В. Хворост, В. В. Божко. – Електротехніка і електромеханіка, № 1, 2005. – С. 106–109.
  21. Панасенко, Н. В. Обратимый преобразователь вольтодобавочного типа для тяговых подстанций электрифицированных железных дорог [Текст] / Н. В. Панасенко, В. В. Божко, Ю. П. Гончаров. // Залізничний транспорт України, № 4, 2007. – С. 76 – 80.
  22. Гончаров, Ю. П. Перетворювач з вольтододатком на повністю керованих напівпровідникових приладах для тягових підстанцій постійного струму [Текст] / Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко, В. В. Божко. – Електротехніка і енергетика, № 2, 2007. – С. 12–17.
  23. Самсонкин, В. М. Энергоэффективный преобразовательный агрегат с функциями фильтрации выходного напряжения тяговой подстанции системы электроснабжения постоянного тока напряжением 3 кВ [Текст] / В. М. Самсонкин, Н. В. Панасенко, Ю. П. Гончаров. – Тезисы докладов I Международной научн.-практ. конференции «Трансэлектро-2007», Крым, Мисхор, 03.10–06.10.2007. – с. 57.
  24. Гончаров, Ю. П. Тяговый выпрямляч з реверсивним вольтододатком на запираємих напівпровідникових приладах [Текст] / Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко, В. В. Божко. – Технічна електродинаміка, № 2, 2008. – С. 16–21.
  25. Сорин, Л. Н. Повышение эффективности электроприводов новых поколений на основе применения современных информационных технологий [Текст] / Л. Н. Сорин. – Автореферат дисс. на соиск. ученой степени докт. техн. наук, М.: МИИТ, 2005. – 40 с.
  26. Кривякін, Г. Б. Колісно-моторний блок з опорно-осьовою підвіскою асинхронного тягового двигуна для електровозу з конструкційною швидкістю 160км/год [Текст] / Г. Б. Кривякін. – Автореферат дис. на здобуття наук. ступіня канд. техн. наук, Харків, НТУ «ХПІ», 2007. – 21 с.
  27. Чапурнова, С. В. Сравнительная оценка отказов в работе телемеханики различных поколений устройств электроснабжения Октябрьской железной дороги [Текст] / С. В. Чапурнова. – Материалы Международного симпозиума «Eltrans'2002», СПб, ПГУПС, 2003. – С. 244–249.
  28. Гаврилюк, В. И. Методика испытаний новых типов подвижного состава на электромагнитную совместимость с устройствами железнодорожной автоматики [Текст] / В. И. Гаврилюк, В. Г. Сыченко, А. И. Миргородская. – Тезисы докладов I Межд.научн.-практ.конференции «Трансэлектро-2007», Крым, Мисхор, 03.10–06.10.2007. – с. 16.
  29. Электроподвижной состав с асинхронными тяговими двигателями [Текст] / под ред. Н. А. Розанова. – М.: Транспорт, 1991. – 336 с.
  30. Лещев, А. И. Оценка эффективности пассивных фильтров для статических преобразователей ЭПС [Текст] / А. И. Лещев, К. Н. Сулова. // Сб. научн. трудов «Электровозостроение», т. 44, Новочеркасск, ОАО ВЭЛНИИ, 2002. – С. 242–248.
  31. Применение гибридных фильтров для улучшения качества электроэнергии [Текст] / под ред. Г. М. Муштафа. – Электричество, № 10, 1995. – С. 33–39.
  32. Сыченко, В. Г. Силовой активный фильтр для тяговой подстанции постоянного тока [Текст] / В. Г. Сыченко, В. А. Зубенко. – 7-й Международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии. Материалы симпозиума. Санкт-Петербург. 26–29.06. 2007 г. С. 66–69.
  33. Уильямс, Т. ЭМС для разработчиков продукции [Текст] / Т. Уильямс. – М.: Издательский дом Технологии, 2003. – 540 с.

Поступила в редакцию 24.11.08 г.

После доработки 03.05.09 г.

*Рассмотрены проблемы электромагнитной совместимости подсистемы электрической тяги постоянного тока (тягового электроснабжения и электроподвижного состава) и их решение средствами силовой электроники.*

*The authors discussed the problems of electromagnetic compatibility of direct-current electric traction subsystem (traction power supply and electro - rolling stock) and their solution by power electronics facilities.*