

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНИХ СТРУКТУР ТЯГОВОГО ПРИВОДУ ПЕРСПЕКТИВНИХ БАГАТОСИСТЕМНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ З ТЯГОВИМИ ДВИГУНАМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

У статті запропоновано структурні схеми статичного перетворювача для тягового приводу перспективних багатосистемних електровозів з тяговими двигунами постійного струму та проведено їх порівняльний аналіз.

В статье предложены структурные схемы статического преобразователя для тягового привода перспективных многосистемных электровозов с тяговыми двигателями постоянного тока и проведен их сравнительный анализ.

In the article the structured schemes of steady-state converter are offered for traction drive of promising multi-system electric locomotives with traction engines of direct current and their comparative analysis is conducted.

Вступ

Сучасний рівень розвитку силової електроніки дозволяє створювати перетворювачі, які забезпечують якісне регулювання потоку електричної енергії. Наявність повністю керованих силових напівпровідникових вентилів забезпечує можливість побудови відносно простих перетворювачів з покращеними енергетичними показниками, ніж це було можливим декілька років тому [1, 2].

Загальновідомі недоліки системи тягового електропостачання напругою 3 кВ постійного струму [3 та ін.] та необхідність забезпечення процесу перевезень на електрифікованих залізницях незалежно від роду струму та значення напруги у контактній мережі без заміни електровозів на станціях стикування вимагає використання тягового електрорухомого складу, який може працювати як при постійному, так і при змінному струмах за різних рівнів напруги у контактній мережі. Такий тяговий електрорухомий склад (ЕРС) називаємо багатосистемним.

На пострадянському просторі використовується електрорухомий склад подвійного живлення (3 кВ постійного струму та 25 кВ змінного струму) який є окремим випадком багатосистемного ЕРС.

В наш час постає питання підвищення напруги у контактній мережі постійного струму з 3 кВ до 6, 12 або 24 кВ [4] – це дозволить підвищити пропускну спроможність залізниць, електрифікованих постійним струмом.

Але на шляху такого рішення постає досить важлива проблема – відсутність ЕРС на підвищену напругу у контактній мережі.

Мета роботи

Провести порівняльний аналіз можливих варіантів побудови статичних перетворювачів тягового приводу для багатосистемного ЕРС залізниць з тяговими двигунами постійного струму (ТДПС).

Матеріал і результати дослідження

В роботі [5] запропоновано структурну схему статичного перетворювача для електровоза подвійного живлення, але ця схема не враховує можливості підвищення напруги у контактній мережі постійного струму.

Враховуючі вищевикладене та аналізуючи схемні рішення статичних перетворювачів, які використовуються в інших галузях промисловості, пропонується наступна структурна схема тягового статичного перетворювача для багатосистемного електровозу з тяговими двигунами (рис. 1).

Такий перетворювач дозволяє реалізувати два основних напрямки покращення якості споживаної електричної енергії [6]:

- використання багатофазних перетворювачів, що працюють зі зсувом по фазі відносно один одного;

- використання при перетворенні електричної енергії підвищеної частоти.

Використання багатофазних систем з ланкою підвищеної частоти дозволяє зменшити масогабаритні показники фільтрів та трансформатора. Крім того, в подібних багатофазних системах є можливість керувати струмами та напругами, які перевищують максимально до-

пустими параметри одиночних силових елементів перетворювача.

Структурна схема (рис. 1) складається з двох контурів: мережевого та тягового (з двигуном постійного струму).

Перший контур призначено для перетворення електричної енергії з контактної мережі в напругу змінного струму підвищеної частоти, яку знімаємо зі вторинної обмотки трансформатора підвищеної частоти. Первина обмотка підключена до виходу високовольтного інвертора 1, вхід якого підключено безпосередньо до контактної мережі постійного струму або до виходу випрямляча 1 (керованого або некеро-

ваного), при змінному струмі у контактній мережі.

Використання некерованого випрямляча 1, підключеного до контактної мережі змінного струму, дозволить виключати вплив кута комутації ключових елементів вхідного перетворювача на енергетичні показники електровозу, що має місце при застосуванні керованого випрямляча. Використання керованого випрямляча дозволить реалізувати рекуперативне гальмування, з поверненням енергії до контактної мережі. Підтримка напруги мережевого контуру на заданому рівні здійснюється інвертором 1.

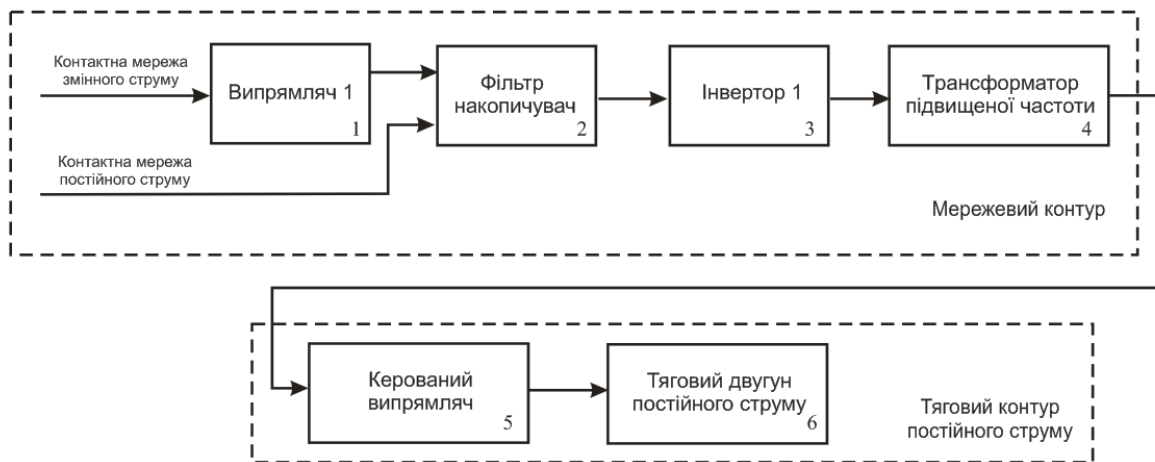


Рис. 1 Узагальнена структурна схема статичного перетворювача тягового приводу з тяговими двигунами постійного струму та ланкою підвищеної частоти

При використанні тягового двигуна постійного струму для його живлення можливо використовувати керований випрямляч, підключений до вторинної обмотки трансформатора підвищеної частоти (тяговий контур постійного струму). Керування режимами роботи тягового двигуна можливо за рахунок зміни режимів роботи керованого випрямляча та інвертора 1.

Як бачимо з рис. 1, до складу запропонованого перетворювача входить трансформатор підвищеної частоти, що дозволить зменшити габарити не тільки самого трансформатора, але й інших реактивних елементів та вузлів, зокрема фільтрів.

Вихідними даними для порівняльного аналізу перетворювальних структур тягового приводу багатосистемних електровозів з тяговими двигунами постійного струму приймаємо:

1. Напруга у контактній мережі постійного струму 3 кВ та підвищена до рівня 6, 12 або 24 кВ.

2. Напруга у контактній мережі змінного струму 25 кВ частотою 50 Гц.

3. Кількість тягових електродвигунів двигунів (ТЕД) 4 або 6, що відповідає односекційному електровозу.

Враховуючі вихідні дані, проведемо порівняльний аналіз наступних варіантів побудови статичних перетворювачів тягового приводу перспективних багатосистемних електровозів (табл. 1).

Як бачимо з табл. 1, варіанти побудови 1 та 8 відповідають традиційним для залізниць країн СНД електровозам подвійного живлення, інші варіанти розглядають можливі варіанти підвищення напруги у контактній мережі постійного струму. В будь-якому випадку електровоз повинен працювати при номінальній напрузі у контактній мережі постійного струму 3 кВ, оскільки майже неможливо забезпечити одночасний перехід всієї мережі залізниць на будь-яку нову систему живлення.

Розглянемо, яким чином можливо реалізувати кожен з варіантів, вказаних у табл. 1, та визначимось, які варіанти доцільно розглядати у подальших дослідженнях.

Таблиця 1

Варіанти побудови статичного перетворювача тягового приводу перспективних багатосистемних електровозів

Варіант побудови	1	2	3	4	5	6	7	8
6 ТЕД	3 кВ	√	√	√	√			
	6 кВ		√					
	12 кВ			√				
	24 кВ				√			
	25 кВ 50 Гц	√	√	√	√			
4 ТЕД	3 кВ					√	√	√
	6 кВ						√	
	12 кВ							√
	24 кВ							√
	25 кВ 50 Гц					√	√	√

В якості реалізації першого варіанту (відповідно до табл. 1) можливо використовувати наступну розгорнуту структурну схему (рис. 2), при цьому реалізується силовий модуль перетворювача типу МІ (на кожен тяговий двигун окремий перетворювач), відповідно до прийнятої у [7] кваліфікації.

На рис. 2 прийняті наступні скорочення: ПР – перемикач режимів (25 кВ 50 Гц або 3 кВ постійного струму); МВ – випрямляч мережевого контуру; ФН – фільтр-накопичувач; МІ – інвертор мережевого контуру; ТПЧ – трансформатор підвищеної частоти; ТВ – випрямляч тягового контуру; ТДПС – тяговий двигун постійного струму.

В режимі «3 кВ» ПР підключає МВ1...МВ6 паралельно до контактної мережі, а в режимі «25 кВ 50 Гц» – послідовно, тобто підключені у режимі дільника напруги контактної мережі. При цьому на вході кожного МВ діє напруга, яка дорівнює: $\frac{U_{км}}{6} = \frac{25}{6} = 4,17$ кВ змінного струму, а в режимі «3 кВ» діє 3 кВ постійного струму.

Елементи перетворювача МІ, ТПЧ та ТВ виконуються однофазними. Саме ця обставина робить схему, представлену на рис. 2, аналогічною по суті до класичної схеми, яку використовують на ЕРС змінного струму та подвійного живлення, на якому використовується однофазні тяговий трансформатор та тяговий випрям-

ляч [8 та ін.], тільки схема, представлена на рис. 2, є більш складною.

Перевагою представленої на рис. 2 схеми є використання мережевих інверторів МІ, які працюють зі зсувом по фазі один до одного, тобто реалізується принцип багатofазного перетворювача, що, як загальновідомо, дозволяє покращити енергетичні показники перетворювача в цілому.

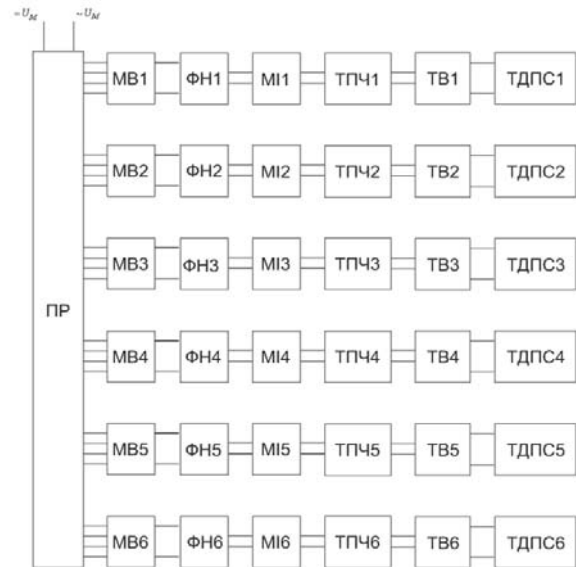


Рис. 2. Розгорнута структура тягового перетворювача за варіантом «1»: 25 кВ змінного та 3 кВ постійного струму при 6 ТДПС при реалізації модулями МІ

Загальновідомо, що для однофазних мостових випрямлячів встановлена потужність трансформатора (при активно-індуктивному навантаженні) дорівнює $S_{т1фм} = 1,23P_d$, а для трифазного мостового випрямляча $S_{т3фм} = 1,05P_d$, тобто доцільне використання трифазних систем. Реалізувати збільшення числа фаз перетворювача можливо за рахунок з'єднання в трифазну систему вторинних обмоток ТПЧ, при одночасній реалізації зсуву напруг первинних обмоток на 120 ел. градусів, тоді схема, представлена на рис. 2, перетвориться до вигляду, представленого на рис. 3.

Використання трифазної системи дозволить зменшити габаритну потужність трансформаторів на $\frac{1,23 - 1,05}{1,23} \cdot 100\% = 14,6\%$.

Фактично схема, представлена на рис. 3, реалізує перетворювач типу М3, тобто один силовий модуль на три тягових двигуна. Але ж проведені у [7] дослідження показали, що доцільно використовувати силовий модуль М2. Тоді

схема, представлена на рис. 3, змінюється до вигляду, представленого на рис. 4.

Як бачимо з рис. 4, структура тягового перетворювача представляє собою три трифазних канали, кожен з яких живить два тягових двигуна (реалізується силовий модуль М2), але кожен з тягових двигунів працює від свого керованого трифазного тягового випрямляча, тобто має місце індивідуальний привод.

Крім того, в даному варіанті побудови тягового перетворювача на вході кожного МВ діє напруга, яка дорівнює: $\frac{U_{KM}}{9} = \frac{25}{3} = 2,78$ кВ змінного струму – ця величина є близькою до режиму роботи «3 кВ» постійного струму, тобто немає необхідності використовувати вентилі більшого класу.

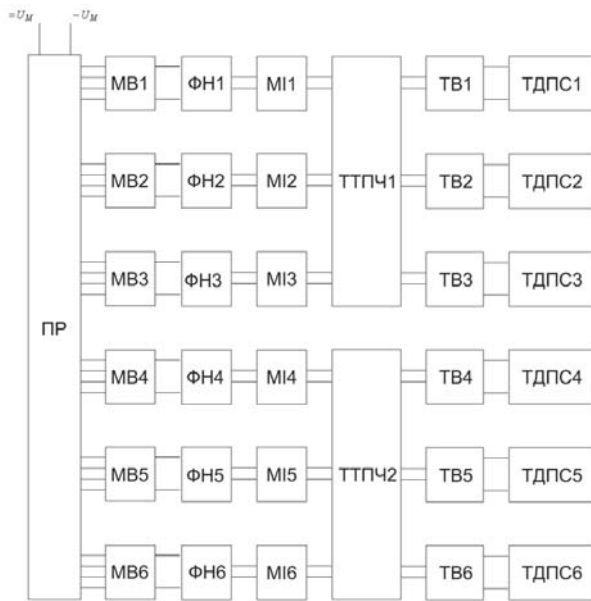


Рис. 3. Структура тягового перетворювача за варіантом «1»: 25 кВ змінного та 3 кВ постійного струму при 6 ТДПС з використанням трифазного трансформатора підвищеної частоти (ТТПЧ) при реалізації модулями М3

Для порівняння представлених структурних схем, які реалізують різні варіанти побудови статичних перетворювачів тягового приводу перспективних багатосистемних електровозів, доцільним є ввести «коефіцієнт використання функціональних вузлів» перетворювача – $k_{фв}$, який відображає, скільки функціональних вузлів перетворювача забезпечує роботу одного тягового двигуна і чим більше цей коефіцієнт, тим краще використовуються елементи перетворювача.

Наприклад, для структурної схеми, яка представлена на рис. 2, роботу тягового двигуна ТДПС1 забезпечують п'ять функціональних

вузлів, а саме: МВ, ФН1, МІ1, ТТПЧ1, ТВ1. Таким чином, $k_{фв} = \frac{1}{5} = 0,2$.

Перемикач режимів ПР не враховуємо, оскільки він є загальним для всієї схеми.

Для структурної схеми, яка представлена на рис. 3, той самий коефіцієнт складатиме:

$$k_{фв} = \frac{3}{13} = 0,23, \text{ а для схеми, яка представлена}$$

$$\text{на рис. 4: } k_{фв} = \frac{2}{12} = 0,167.$$

Порівнявши представлені на рис. 2 – 4 структурні схеми та їх коефіцієнти $k_{фв}$, стає зрозумілим, що найбільш ефективно використовуються елементи перетворювача, побудованого за схемою рис. 3.

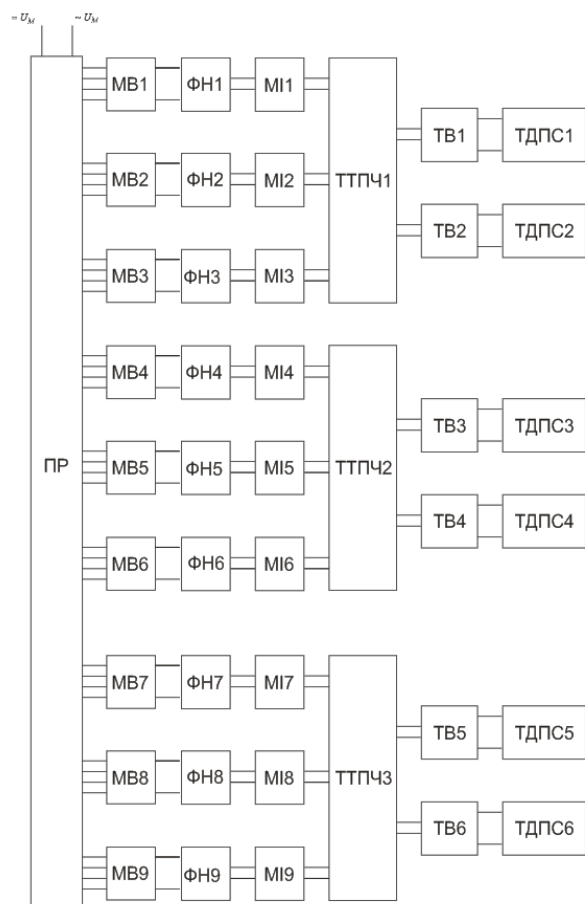


Рис. 4. Структура тягового перетворювача 25 кВ змінного та 3 кВ постійного струму при 6 ТДПС при реалізації модулями М2

Для проведення порівняльного аналізу перетворювальних структур тягового приводу шестивісного багатосистемного електровозу приймаємо структурні схеми представлені на рис. 2 – 4 за базові, позначивши їх надалі як М1, М3, М2 відповідно.

Порівнявши структурні схеми рис. 1 – 4, неважко зробити висновок, що основними функціональними вузлами, які «відповідають» за роботу з контактною мережею, є ПР та МВ. Саме поєднання цих елементів, в залежності від напруги у контактній мережі, визначає структуру перетворювача у цілому.

В залежності від режиму роботи (з'єднання) перемикача режимів є можливими наступні схеми ввімкнення мережевих випрямлячів при шести ТДПС (рис. 5).

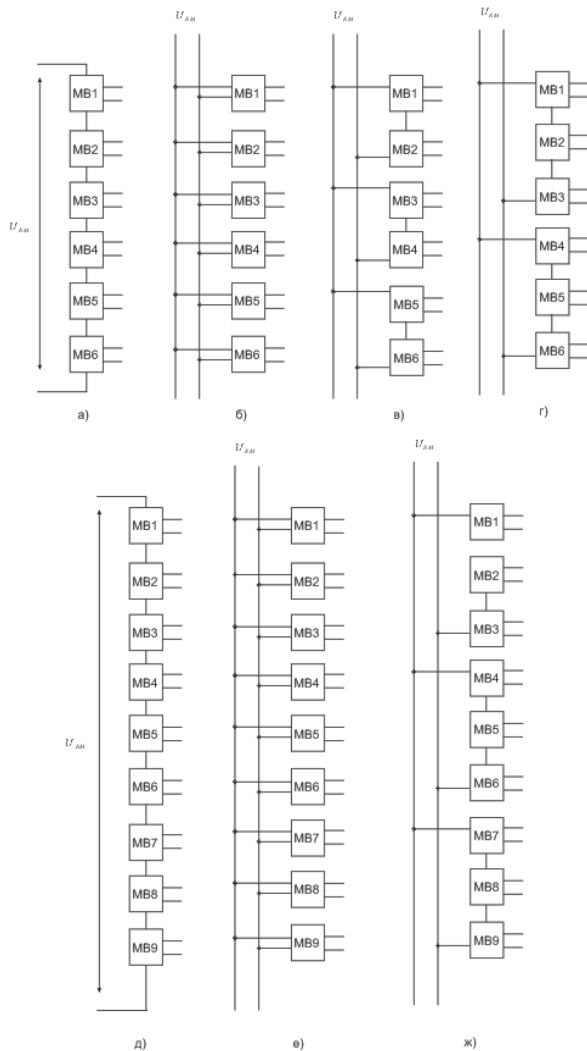


Рис. 5. Схеми ввімкнення мережевих випрямлячів при шести ТДПС

Використовуючи представлені на рис. 5 варіанти з'єднання мережевих випрямлячів, нескладно визначити значення напруги контактної мережі, яка прикладена до кожного з МВ у відповідності до виразу: $U_{\text{МВ}} = U_{\text{кн}} / a$, де $U_{\text{кн}}$ – напруга у контактній мережі; a – кількість послідовно з'єднаних МВ, до яких прикладена напруга контактної мережі.

Результати розрахунків для перетворювача

для семи ТДПС представлені у табл. 2.

Враховуючи вище представлені дослідження, стає можливим визначитися з раціональною структурою для кожного з представлених у табл. 1 варіантів побудови статичного перетворювача тягового приводу перспективних багатосистемних електровозів з шістьма тяговими двигунами постійного струму.

Так, для першого варіанту (3 кВ та 25 кВ 50 Гц), з точки зору діючих напруг та використання функціональних вузлів перетворювача, доцільно будувати перетворювач з модулів М3 за структурною схемою, що представлена на рис. 3. При цьому в режимі «3 кВ» МВ можуть бути з'єднані за варіантами «а», «б» або «в» (рис. 5), в режимі «25 кВ 50 Гц» за варіантом «а», при цьому напруга на вході мережевого випрямляча буде не більше за 4,5 кВ.

Якщо ж напруга на вході мережевого випрямляча повинна бути найменшою, то доцільно будувати перетворювач з силових модулів М2 (рис. 4). При цьому в режимі «3 кВ» МВ можуть бути з'єднані за варіантами «д» або «ж» (рис. 5), в режимі «25 кВ 50 Гц» за варіантом «д», при цьому напруга на вході мережевого випрямляча буде не більше за 3,0 кВ.

Таблиця 2

Результати визначення напруги що діє на вході мережевих випрямлячів перетворювача для семи ТДПС

Схема за рис. 5	а	б	в	г	д	е	ж
Кількість послідовно з'єднаних МВ, a	6	1	2	3	9	1	3
Напруга контактної мережі	Напруга, що діє на вході МВ, кВ						
3 кВ	0,5	3,0	1,5	1,0	0,33	3,0	1,0
6 кВ	1,0	6,0	3,0	2,0	0,67	6,0	2,0
12 кВ	2,0	12,0	6,0	4,0	1,33	12,0	4,0
24 кВ	4,0	24,0	12,0	8,0	2,67	24,0	8,0
25 кВ 50 Гц	4,17	25,0	12,5	8,33	2,78	25,0	8,33

Для варіанту 2 (табл. 1) можливо використовувати модулі М2 або М3, при цьому, з точки зору мінімальної напруги на МВ, використовувати схеми «б» та «е» (рис. 5) недоцільно, оскільки напруга буде рівною 6 кВ, що потребує використання вентилів високого класу за напругою (для режиму роботи «6 кВ»).

Для варіанту 3 також можливе використання модулів М2 та М3, але у режимі «12 кВ» недоцільно використовувати варіанти «б», «в», «е».

Для варіанту 4 доцільно використовувати для модуля М2 тільки схеми «а», а для модуля М3 – тільки схему «д» (рис. 5).

В цілому з точки зору рівномірності розподілення напруги між МВ у різних режимах роботи перетворювача доцільно використовувати в якості підвищеної напруги у контактній мережі 24 кВ постійного струму, яке є близьким до 25 кВ 50 Гц, що дозволить використовувати ті ж самі схемні рішення та той самий режим роботи ПР.

Таким же чином можливо дослідити всі інші варіанти побудови статичного перетворювача тягового приводу перспективних багатосистемних електровозів з шістьма або чотирма тяговими двигунами постійного струму, які представлені у табл. 1.

Особливістю реалізації статичного перетворювача для тягового приводу перспективних багатосистемних електровозів з чотирма тяговими двигунами постійного струму є те, що його можливо будувати з силових модулів М1 або М2.

Слід відмітити, що з точки зору надійності використовувати модулі М6 для шестивісного електровозу та М4 чотиривісного електровозу є недоцільним [7].

Структура тягового перетворювача 25 кВ змінного та 3 кВ постійного струму при 4 ТДПС при реалізації модулями М2 буде відрізнятися від тієї, що представлена на рис. 4, відсутністю третього трифазного каналу, який живить ТДПС5 та ТДПС6 (рис. 6).

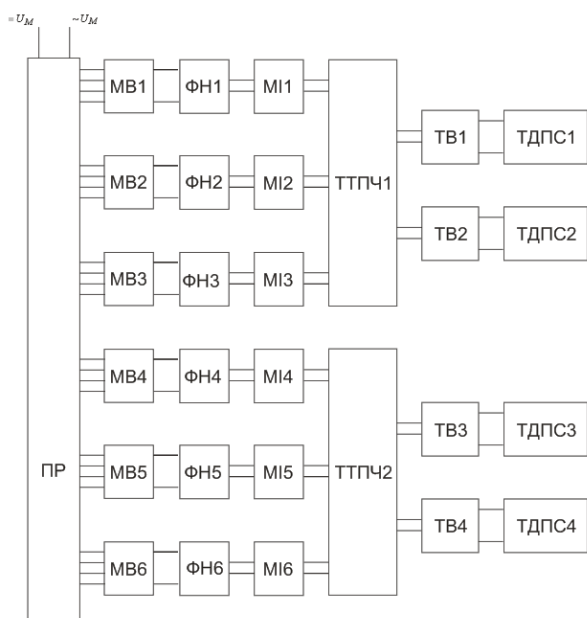


Рис. 6. Структура тягового перетворювача 25 кВ змінного та 3 кВ постійного струму при 4 ТДПС при реалізації модулями М2

Загальні висновки

1. З точки зору габаритних потужностей трансформаторного обладнання та коефіцієнта використання функціональних вузлів статичного перетворювача, у складі перетворювача пропонується використовувати трифазні трансформатори підвищеної частоти.

2. Представлений у роботі порівняльний аналіз запропонованих перетворювальних структур тягового приводу перспективних багатосистемних електровозів з тяговими двигунами постійного струму дозволив визначитись з раціональними структурами з точки зору напруг, діючих на вхідних елементах перетворювача.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Преобразовательные устройства электропоездов с асинхронными тяговыми двигателями. [Текст] / А. М. Солодунов и др.; под ред. А. М. Солодунова. – Рига: Зинантне, 1991. – 351 с.
2. Справочник по преобразовательной технике [Текст] / И. М. Чиженко, П. Д. Андриенко / под ред. И. М. Чиженко. – К.: Техніка, 1978. – 447 с.
3. Котельников, А. В. Электрification железных дорог. Мировые тенденции и перспективы. [Текст] / А. В. Котельников. – М.: Интекст, 2002. – 104 с.
4. Бадер, М. П. Концептуальные решения по нетрадиционным системам тягового электроснабжения и электромагнитной совместимости [Текст] / М. П. Бадер // Материалы 2-ой Межд. науч.-практ. конф. «Электрification железнодорожного транспорта “Трансэлектро-2008”». – Д.: ДНУЖТ, 2008. – С. 26.
5. Дубинець, Л. В. Структурна схема перспективного електровозу подвійного живлення [Текст] / Л. В. Дубинець, Г. М. Чілікін, А. М. Муха // 36. наук. пр. Дніпродзержинського держ. техн. ун-ту (техн. науки). Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика.» – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007. – С. 356-357.
6. Флора, В. Д. Полупроводниковые устройства [Текст] / В. Д. Флора, Ю. С. Коробков – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 64 с.
7. Муха, А. М. Обґрунтування вибору потужності тягового перетворювача багатосистемних електровозів [Текст] / А. М. Муха // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. – Вип. 19 – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – С. 61-67.
8. Дубровский, З. М. Грузовые электровозы переменного тока [Текст] / З. М. Дубровский, В. И. Попов, Б. А. Тушканов. – М.: Транспорт, 1991. – 464 с.

Надійшла до редколегії 25.03.2009.