

А.М. Муха, канд. техн. наук

(Україна, Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В.Лазаряна)

СТРУКТУРНІ СХЕМИ ТЯГОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ БАГАТОСИСТЕМНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ З АСИНХРОННИМ ТЯГОВИМ ПРИВОДОМ

Вступ. Україна має одну з найбільш розвинених у Європі мережу залізниць, експлуатаційна довжина якої складає понад 22 тис. км. За густотою вона займає провідне місце серед країн СНД і наближається за цим показником до таких європейських країн як Франція та Італія [1]

За обсягами вантажних перевезень залізниці України посідають четверте місце на Євразійському континенті, поступаючись тільки залізницям Китаю, Росії та Індії. Вантажонапруженість українських залізниць (річний обсяг перевезень на 1 км) у 3 – 5 разів перевищує відповідний показник розвинених європейських країн.

В Україні електрифіковано майже 43 % від загальної довжини залізничної мережі, а виконувана робота в електротязі становить 82,7%. Собівартість перевезень електротягою у декілька разів нижча, ніж теплотягою, що обумовлюється меншими питомими витратами умовного палива (до 2 разів), більшими ваговими нормами та швидкостями руху поїздів (в 1,2 – 1,3 раза), меншими експлуатаційними витратами на утримання експлуатаційного парку електровозів.

На залізницях України застосовують дві системи електричної тяги: змінного струму 25 кВ промислової частоти та постійного струму 3 кВ, з яких 50,8 % від загальної довжина електрифікованих ділянок України працюють на постійному струмі [1].

Світовий досвід застосування різних систем електричної тяги постійного і змінного струмів однозначно свідчить про переважне використання системи змінного струму промислової частоти напругою 25 кВ [2].

Система змінного струму забезпечує більші переваги в поетапному нарощуванні енергетичних можливостей електричної тяги, а при необхідності й у їхньому зниженні, наприклад, при спаді обсягів перевезень.

До недоліків системи 25 кВ промислової частоти в першу чергу відносять відносно малі показники якості електричної енергії, у тому числі низький $\cos\phi$.

Не потребує доказів той факт, що система 3 кВ постійного струму вичерпала свої можливості, оскільки підвищення потужності локомотивів (підвищення струмового навантаження) приведе до зниження напруги на контактному проводі, що зменшує пропускну здатність завантажених ділянок.

Модернізувати систему тягового електропостачання 3 кВ постійного струму можливо двома напрямками:

- 1) переведенням електрифікованих ділянок на змінний струм напругою 25 кВ промислової частоти 50 Гц;
- 2) підвищенням напруги на контактному проводі, що дозволить зменшити

струмове навантаження та підвищити пропускну здатність.

Перший напрямок – переведення електрифікованих ділянок з тягою на постійному струму 3 кВ на змінний 25 кВ 50 Гц, за різними оцінками, потребує від 60 до 80% від вартості побудови нової лінії, а строк окупності перевищує 15 років, що у наш час майже неможливе з економічних міркувань [3].

Другий напрямок потребує використання нетрадиційних систем постійного струму з підвищеною напругою кратною 3 кВ, а саме: 6, 12 або 24 кВ, це дозволить зменшити струмове навантаження. Так, підвищення напруги з 3 до 6 кВ дозволяє зменшити втрати потужності у контактній мережі з 12 до 3% [4].

Але підвищення напруги у контактній мережі потребує створення нового електрорухомого складу, і в цьому випадку доцільним є використання багатосистемного електрорухомого складу (ЕРС) (мається на увазі ЕРС, який зможе працювати при різних рівнях напруги у контактній мережі як при постійному, так і змінному струмах), оскільки провести перехід на підвищену напруги справа не миттєва і тому викликає необхідність використання локомотивів як на 3 кВ, так і на підвищену напругу. У країнах Європи багатосистемний ЕРС інтенсивно експлуатується з кінця 80-х років ХХ ст. [5].

Таким чином, з метою підвищення енергоефективності систем електричної тяги постійного струму підвищити напругу у контактній мережі з 3 до 6, 12 або 24 кВ постійного струму з одночасним вводом в експлуатацію багатосистемних електровозів. Тяговий привід багатосистемного ЕРС, зокрема електровозів, може бути побудований як на базі двигунів постійного струму, так і асинхронних двигунів.

Мета роботи. Провести порівняльний аналіз можливих варіантів побудови статичних перетворювачів тягового приводу для багатосистемного електрорухомого складу залізниць з асинхронними тяговими двигунами (АТД).

Матеріал і результати дослідження.

Проведений літературний аналіз варіантів побудови тягових перетворювачів багатосистемних електровозів, що експлуатуються на залізницях Європи [5], та електровозів подвійного живлення, що експлуатуються на залізницях колишнього СРСР, дозволяє представити узагальнену структурну схему тягового перетворювача діючого ЕРС (для асинхронного тягового електропривода) (рис.1).

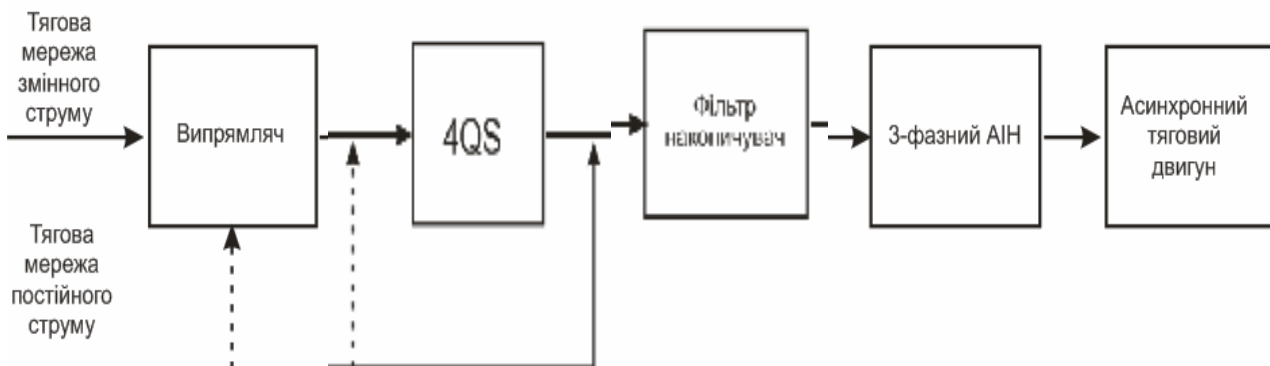


Рис. 1 Узагальнена структурна схема тягового перетворювача діючого багатосистемного ЕРС з АТД

Тяговий перетворювач, структурна схема якого представлена на рис.1, має у своєму складі 4QS перетворювач, що дозволяє не тільки підтримувати рівень напруги на проміжній ланці постійного струму (на рис.1 - фільтр накопичувач), а ще покращити його енергетичні показники, зокрема коефіцієнт потужності [6,7]. Специфіка роботи 4QS перетворювача приводить до появи в тяговому струмі вищих гармонійних складових. Це характерна риса всіх перетворювальних пристроїв силової електроніки, які виконані на напівпровідникових керованих вентилях, пов'язана із ключовим (дискретним) характером роботи вентилів, що визначає дискретизацію як процесу споживання енергії перетворювачем від її первинного джерела, так і процесу передачі її споживачеві (навантаженню) [8].

Дискретне споживання енергії перетворювачем від джерела електроенергії призводить до помітного зворотного впливу вентиляного перетворювача на якість електроенергії, наслідки чого відчуває як сам перетворювач, так і інші споживачі, що одержують живлення від того ж джерела.

Тяговий вентиляний перетворювач електрорухомого складу, споживаючи з тягової мережі активну потужність, «виливає» у неї потужність по вищих гармоніках, що псує форму напруги в мережі й тим самим ускладнює роботу інших споживачів електроенергії в мережі. Для обмеження цього негативного впливу вентиляних перетворювачів на контактну мережу можуть бути застосовані такі міри, крім обмеження співвідношення потужностей перетворювача й живлючої мережі (постійного й змінного струмів), [9]:

- 1) збільшення числа еквівалентних фаз перетворювача;
- 2) використання схем перетворювачів з поліпшеною формою вхідного струму;
- 3) фільтрацію вхідних струмів перетворювача, як правило, за допомогою паралельного підключення до мережі послідовних LC-фільтрів, налаштованих на домінуючі гармоніки вхідного струму;
- 4) використання схем активної фільтрації вхідного струму, що компенсують відхилення вхідного струму перетворювача від синусоїдальної форми.

З іншого боку, дискретна передача енергії з виходу перетворювача в навантаження, як правило, знижує ефективність її використання в навантаженні, де здійснюється перетворення електричної енергії в механічну.

Такий вплив, у першу чергу на електрорухомому складі змінного струму, позначається в зниженні енергетичних показників, що в деякій мірі стримує широке впровадження напівпровідникових тягових перетворювачів.

Великі швидкості зміни напруг і струмів вентилів у процесі комутації призводять до помітного електромагнітного випромінювання в навколишнє середовище, створюючи перешкоди в колах пристроїв слабкострумової електроніки, у тому числі в пристроях керування цими вентиляними перетворювачами, що породжують зазначені перешкоди.

На електрорухомому складі такі випромінювання в першу чергу впливають на канали радіозв'язку й локомотивної сигналізації. Чітка робота цих систем визначає безпеку руху поїздів, що є головною вимогою, висунутою до будь-яких транспортних засобів залізниць.

Крім, того аналіз схемних рішень для перетворювачів діючого багатосистемного ЕРС, показав, що при використанні підвищеної напруги у контактній

мережі постійного струму потрібно ускладнювати схеми стабілізації напруги на ланці постійного струму, тобто використовувати більш складні перетворювачі.

В роботі [10] запропонована структурна схема статичного перетворювача для електровоза подвійного живлення (який є окремим випадком багатосистемного електровоза), але ця схема не враховує можливість підвищення напруги у контактній мережі постійного струму.

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

Такий перетворювач дозволяє реалізувати два основних напрямки покращення якості споживаної електричної енергії [11]:

- використання багатофазних перетворювачів, що працюють зі зсувом за фазою відносно один одного;
- використання при перетворенні електричної енергії підвищеної частоти.

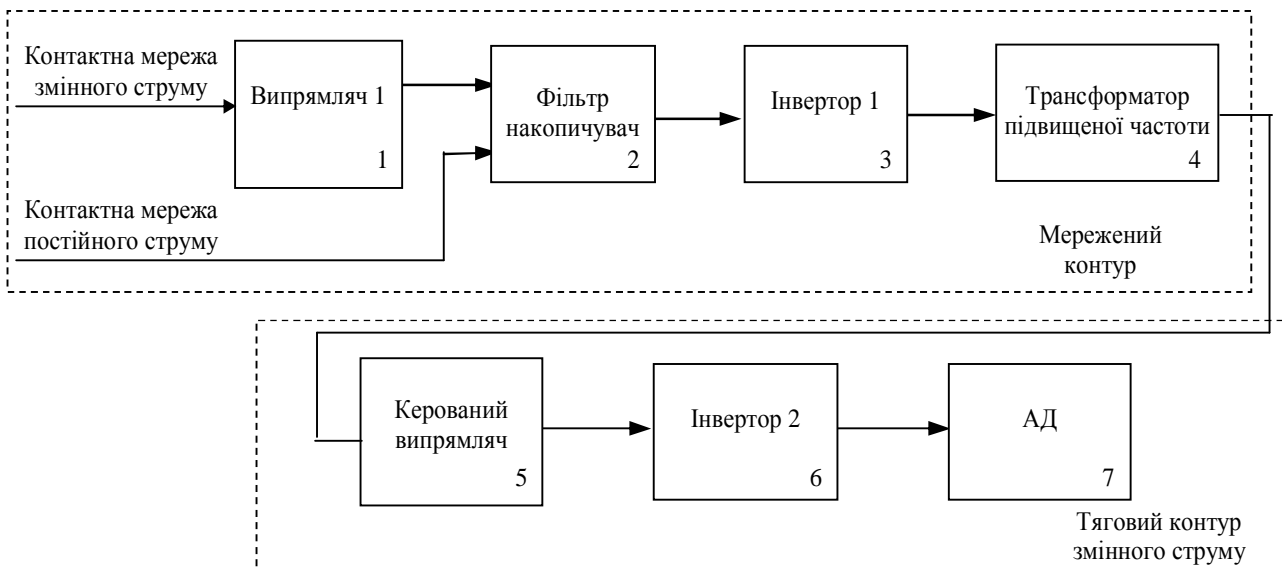


Рис.2. Узагальнена структурна схема статичного перетворювача тягового приводу з асинхронними тяговими двигунами та ланкою підвищеної частоти

Використання багатофазних систем з ланкою підвищеної частоти дозволяє зменшити масогабаритні показники фільтрів та трансформатора. Крім того, у подібних багатофазних системах є можливість керувати струмами та напругами, які перевищують максимально допустимі параметри одиночних силових елементів перетворювача.

Структурна схема (рис. 2) складається з двох контурів: мережевого та тягового змінного струму (з АД). Приймаємо запропонований перетворювач як базовий для подальших досліджень.

За вихідні дані для аналізу властивостей запропонованого статичного перетворювача тягового приводу перспективних багатосистемних електровозів приймаємо:

- 1). Напругу в контактній мережі постійного струму 3 кВ та підвищену до рівня 6, 12 або 24 кВ.

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

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

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

Як бачимо з таблиці варіанти побудови 1 та 5 відповідають традиційним для залізниць країн СНД електровозам подвійного живлення, інші варіанти розглядають можливі варіанти підвищення напруги у контактній мережі постійного струму. У 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 нову систему живлення.

Таблиця

Варіанти побудови статичного перетворювача асинхронного тягового приводу перспективних багатосистемних електровозів

<i>Варіант побудови</i>		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
6 АТД	3 кВ	•	•	•	•				
	6 кВ		•						
	12 кВ			•					
	24 кВ				•				
	25 кВ 50 Гц	•	•	•	•				
4 АТД	3 кВ					•	•	•	•
	6 кВ						•		
	12 кВ							•	
	24 кВ								•
	25 кВ 50 Гц					•	•	•	•

Розглянемо яким чином можливо реалізувати кожен із варіантів, наведених у таблиці, та визначимось, які варіанти доцільно розглядати у подальших дослідженнях.

Для реалізації першого варіанта (відповідно до таблиці) можливо використовувати розгорнуту структурну схему (рис. 3), при цьому реалізується силовий модуль перетворювача типу М1 (на кожен тяговий двигун окремий перетворювач), відповідно до прийнятої у [12] класифікації.

На рис. 3 прийняті такі 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; ТІ – тяговий інвертор; АТД – асинхронний тяговий двигун.

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

Елементи перетворювача МІ, ТПЧ, ТВ та ТІ виконуються однофазними. Саме ця обставина робить схему, представлену на рис. 3 аналогічній по суті до класичної схеми, яку використовують на ЕРС змінного струму та подвійного живлення, на якому використовується однофазні тяговий трансформатор та тяговий випрямляч [13, 14], тільки схема представлена на рис. 3 більш складна. Крім того, використання однофазних трансформаторів у складі перетворювача є недоцільним з точки зору габаритної потужності, оскільки 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 доцільно використання трифазних систем.

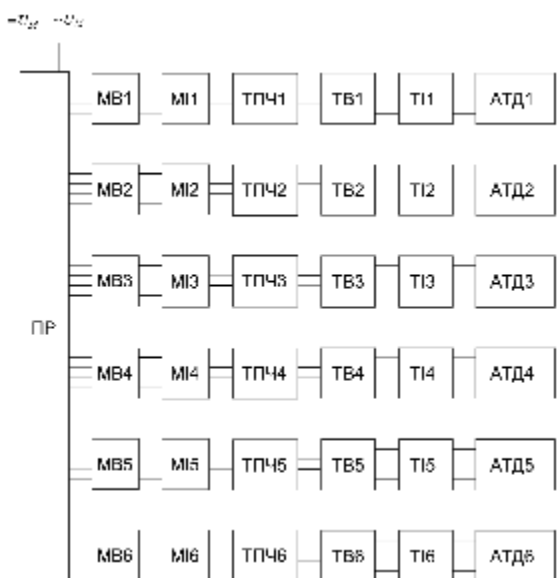


Рис. 3. Структура тягового перетворювача за варіантом «1»: 25 кВ змінного та 3 кВ постійного струму при 6 АТД

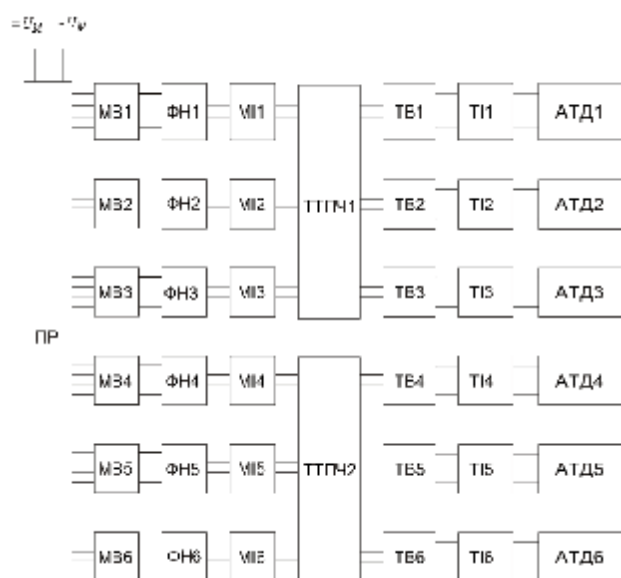


Рис. 4. Структура тягового перетворювача за варіантом «1»: 25 кВ змінного та 3 кВ постійного струму при 6 АТД з використанням трифазного трансформатора підвищеної частоти (ТТПЧ) при реалізації силовими модулями МЗ

Елементи перетворювача МІ, ТПЧ, ТВ та ТІ виконуються однофазними. Саме ця обставина робить схему, представлену на рис. 3, аналогічною по суті до класичної схеми яку використовують на ЕРС змінного струму та подвійного живлення, на якому використовується однофазні тяговий трансформатор та тяговий випрямляч [13, 14], тільки схема представлена на рис. 3 більш складна. Крім того, використання однофазних трансформаторів у складі перетворювача є недоцільним з точки зору габаритної потужності, оскільки для однофазних мостових випрямлячів встановлена потужність трансформатора (при активно-індуктивному навантаженні) дорівнює $S_{Т1фм} = 1,23P_d$, а для трифазного мосто-

вого випрямляча $S_{\text{тзфм}} = 1,05P_d$, тобто доцільне використання трифазних систем.

Тому наведену на рис. 3 розгорнуту структуру тягового перетворювача представимо з використанням трифазних трансформаторів підвищеної частоти (рис.4).

У представленій схемі ТПЧ 1...3 та ТПЧ 4...6 з'єднані у два трифазних трансформатори, кожен з яких живить по три тягових двигуна. Фактично представлена структурна схема відображає реалізацію силового модуля М3 [12].

Але ж проведені у роботі [12] дослідження показали, що доцільно використовувати силовий модуль М2. Тоді схема, розглянута на рис. 4 змінюється до вигляду наведеному на рис. 5.

Як бачимо з рис. 5 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 інвертора, тобто має місце індивідуальний привід.

Для порівняння представлених структурних схем, які реалізують різні варіанти побудови статичних перетворювачів тягового приводу перспективних багатосистемних електровозів, є доцільним увести "коефіцієнт використання функціональних вузлів" перетворювача $k_{\text{фв}}$, 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. 3 роботу тягового двигуна АТД1 забезпечує шість функціональних вузлів, а саме: МВ1, ФН1, МП1, ТПЧ1, ТВ1, ТП1. Таким чином $k_{\text{фв}} = \frac{1}{6} = 0,167$.

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

Для структурної схеми, яка представлена на рис. 4, $k_{\text{фв}} = \frac{3}{16} = 0,187$, а для схеми яка представлена на рис. 5, $k_{\text{фв}} = \frac{2}{14} = 0,143$.

Загальні висновки. Порівнявши зображені на рис. 3 – 5 структурні схеми та їх коефіцієнти $k_{\text{фв}}$, стає зрозумілим, що найбільш ефективно використовувати елементи перетворювача, побудованого за схемою, наведеною на рис. 4 (модуль М3).

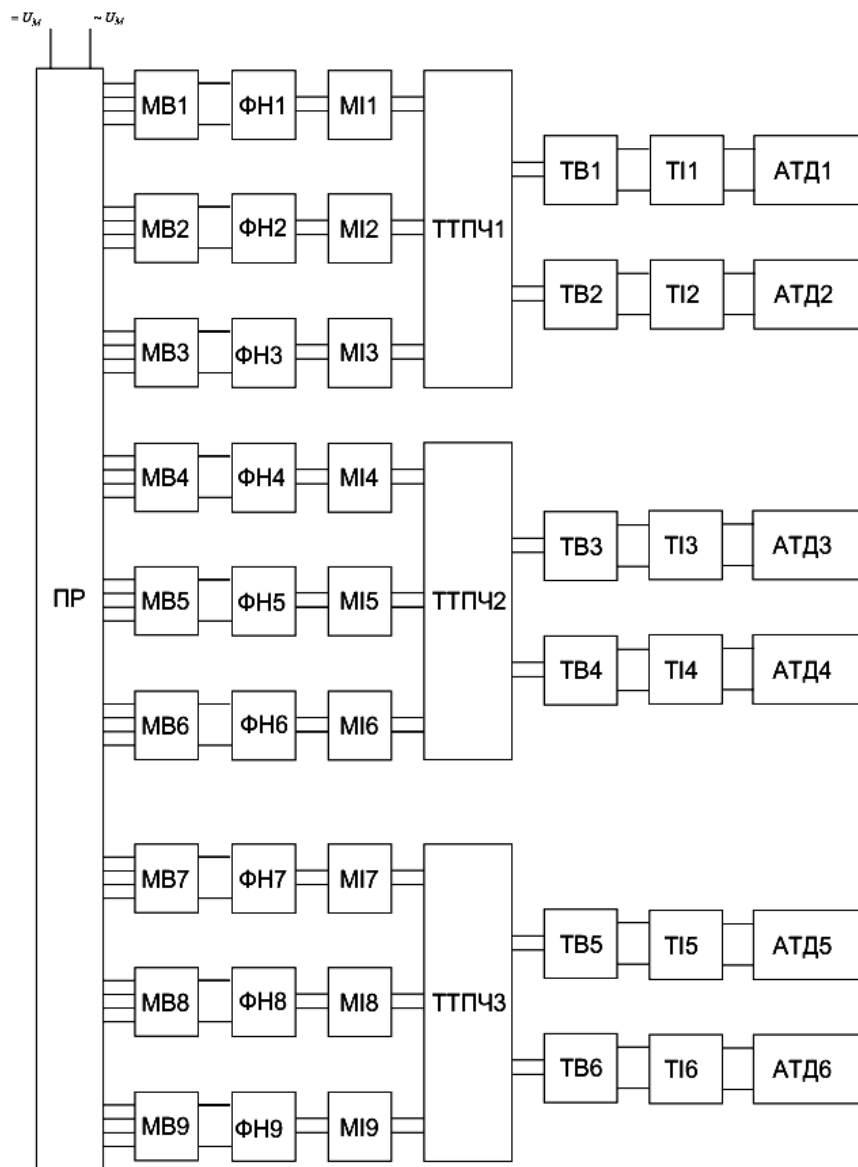


Рис. 5. Структура тягового перетворювача напругою 25 кВ змінного та 3 кВ постійного струмів при 6 АТД при реалізації модулями М2

Список літератури

1. Котельников А.В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы. – М.: Интескт, 2002. – 104 с.
2. Корниенко В.В., Доманская Г.А. Существующие и перспективные технологии электро-снабжения железных дорог. // Залізничний транспорт України. – 2008. – № 4. – С.3-6.
3. Феоктистов В.П., Литовченко В.В., Баранцев О.Б. Нужны многосистемные электровозы. // Локомотив. – 2002. – № 1. – С.4-5.
4. Хворост Н.В., Гончаров Ю.П., Панасенко Н.В., Панасенко Н.Н. Совершенствование электрической тяги постоянного тока железных дорог Украины для скоростного пассажирского движения. // Залізничний транспорт України. – 2003. – № 6. – С.25-31.
5. Литовченко В.В., Баранцев О.Б. Современные многосистемные электровозы. // Локомотив. – 2000. – № 9. – С.45-46.
6. Литовченко В.В. Определение энергетических показателей электроподвижного состава

- переменного тока с 4qS-преобразователями. // Электротехника. – 1993. – № 5. С. 23-31.
7. Литовченко В.В. 4qS-четырёхквadrантный преобразователь электровозов переменного тока. // Известия вузов. Электромеханика. – 2000. – № 3. – С. 64-73.
8. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. – Ч.1. – 199 с.
9. Муха А.М., Куриленко О. Я. Шляхи зниження впливу тягових вентильних перетворювачів на тягову мережу. // Тези I міжнар. наук.-практ. конф. «Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті». – Д., – 2007. – С. 38-39.
10. Дубинець Л. В., Чілікін Г. М., Муха А. М.. Структурна схема перспективного електровазу подвійного живлення // Зб. наук. праць Дніпродзер. держ. техн. ун-ту (технічні науки). Тем. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика.» – Дніпродзержинськ, – 2007. – С.356-357.
11. Флора В. Д., Коробков Ю. С.. Полупроводниковые устройства. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 64 с.
12. Муха А. М. Обґрунтування вибору потужності тягового перетворювача багатосистемних електровазів. // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007. Вип. 19. – С.61-67.
13. Дубровский З.М., Попов В.И., Тушканов Б.А. Грузовые электровозы переменного тока. – М.: Транспорт, 1991. – 464 с.
14. Тихменев Б.Н., Трахтман Л.М. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты. – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.