

УДК 629.423:621.314

ВІСІН М. Г., ЗАБАРИЛО Д. О. (ДНУЗТ)

Каф. «Електрорухомий склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010 Дніпропетровськ, Україна, тел.+38(063)446-77-38, ел. пошта [lazbl@yandex.ru](mailto:lazbl@yandex.ru)

## АНАЛІЗ СИЛОВИХ СХЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИСОКОЧАСТОТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ АСИНХРОННИХ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ

### Вступ

Стрімкий розвиток силових напівпровідникових ключів та мікропроцесорної системи керування став вирішальним у розвитку та у впровадженні тягового привода з асинхронними двигунами, які мають значні переваги над колекторними [1].

Досвід експлуатації електрорухомого складу на залізницях країн Заходу та Російської Федерації показав, що доцільним є створення багатосистемного рухомого складу, що визнано ще в середині 80-х років спеціальною Комісією міжнародного союзу залізниць [2].

### Постановка задачі та мета

Головними компонентами тягового асинхронного привода, який має тракт для живлення від мережі змінного струму являються тяговий трансформатор і перетворювач.

Сучасні тягові перетворювачі виконуються в основному на силових IGBT-транзисторах, які витримують зворотну напругу величиною 6,5 кВ та прямий струм 400...1200 А, що достатньо для того, щоб у плечі випрямляча (або інвертора) мати по одному елементу IGBT. Це означає, що компактність перетворювача майже досягнула свої межі. Тому подальший розвиток напівпровідникових приладів лише незначно може вплинути на зниження масогабаритних показників електропривода в цілому. Тому зниження маси високовольтної частини привода можливо досягнути за рахунок зниження маси трансформатора, оскільки він відноситься до таких компонентів в системі тягового привода які мають високу вартість, велику масу і значний об'єм. До того ж трансформатор з його великою сконцентрованою масою являється елементом силового електричного кола, можливості суттєвого вдосконалення якого за допомогою нових розробок при існуючих технологіях мінімальні. Подальше підвищення його компактності викликало би збільшення втрат і вимагало би дуже потужних систем охолодження. Тому необхідно розробити принципово новий підхід для досягнення мінімуму маси і об'єму транс-

форматора при одночасному підвищенні його коефіцієнта корисної дії.

### Аналіз способи зниження масогабаритних показників трансформатора

Для зниження масогабаритних показників трансформатора необхідно вказати, які елементи його мають найбільшу масу, а отже і об'єм. Маса трансформатора включає в себе:

- 1) маса «заліза» (маса сталі магнітопроводу);
- 2) маса міді (маса обмоток);
- 3) маса трансформаторного масла;
- 4) маса баку і арматури.

Маса арматури, баку і масла залежить від об'єму активної частини трансформатора, тобто від об'єму заліза і міді. Які в свою чергу залежать потужності трансформатора. Потужність визначається добутком струму і електрорушійної сили обмотки. Електрорушійна сила залежить від індукції насичення магнітного матеріалу магнітопроводу, площі його поперечного перерізу, від частоти напруги живлячої мережі і кількості витків обмотки:

$$E = 4,44 fBSw, \quad (1)$$

- де  $E$  - електрорушійна сила, В;  
 $f$  - частота напруги живлячої мережі, Гц;  
 $B$  - магнітна індукція, Тл;  
 $S$  - площа поперечного перерізу, м<sup>2</sup>;  
 $w$  - кількість витків.

Отже, для підтримання постійного значення електрорушійної сили трансформатора разом із зменшенням кількості міді ( $w$ ) і сталі ( $S$ ) необхідно підвищувати значення магнітної індукції ( $B$ ), тобто застосовувати матеріали з більшим значенням індукції насичення, або (та) підвищувати частоту вхідної напруги ( $f$ ).

Маса міді залежить як від кількості витків обмотки, так і від площі поперечного перерізу витка, яка визначається щільністю струму:

$$S_m = \frac{I}{j}, \quad (2)$$

де  $S_m$  - площа поперечного витка обмотки,  $m^2$ ;

$I$  - струм в обмотці, А;

$j$  - щільність струму, А/мм<sup>2</sup>.

Із виразу (2) видно, що для зменшення площі поперечного перерізу витка, а отже і маси міді при збереженні постійного значення струму необхідно збільшувати щільність струму. Проте зі збільшенням щільності струму збільшуються втрати в міді (збільшується потужність розсіювання):

$$P_m = j^2 S_m^2 R, \quad (3)$$

де  $P_m$  - втрати в міді, Вт;

$R$  - активний опір обмотки, Ом.

Збільшення величини втрат в міді викликає підвищення температури обмотки, що призводить до погіршення стану ізоляції, або її пошкодження. Для забезпечення нормальної роботи (без перевищення допустимої температури перегріву) з ростом щільності струму необхідно інтенсивніше відводити тепло від обмотки. Одним із способів охолодження обмотки при досить значній щільності струму (250 А/мм<sup>2</sup>) являється застосування спеціальних охолоджувальних камер, наповнених рідким азотом, що використовується у надпровідних обмотках.

Отже, зменшення масо-габаритних показників тягового трансформатора можливо реалізувати наступними способами:

- 1) збільшенням частоти живлячої напруги ;
- 2) застосуванням матеріалів з більшою індукцією насичення;
- 3) застосуванням надпровідних обмоток.

В разі поєднання декількох способів трансформатор буде легшим і меншим. Проте на практиці найбільше розповсюдження отримав перший спосіб. Збільшення частоти живлячої напруги трансформатора широко використовується в імпульсних джерелах живлення [3,4]. Такі джерела мають відносно низькі масогабаритні показники, високий коефіцієнт корисної дії та відносно низьку вартість.

#### Аналіз схем електрорухомого складу із застосуванням високочастотного трансформатора

Перші розробки силових електричних схем тягового привода з використанням високочастотного трансформатора були призначені для застосування їх лише на електрорухомому складі (ЕРС) змінного струму [5,6]. В загальному вигляді функціональна схема має вигляд, який зображено на рис. 1. Схема працює таким чином: напруга мережі змінного струму випрямляється випрямлячем В1, згладжується фільтром Ф1 і перетворюється в змінну напругу ви-

сокої частоти інвертором І. Далі напруга подається на первинну обмотку трансформатора Т. Напруга вторинної обмотки трансформатора випрямляється випрямлячем В2, згладжується фільтром Ф2 і прикладається до входу автономного інвертора АІ, який живить тяговий асинхронний двигун АТД.

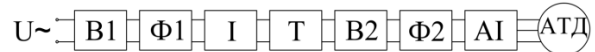


Рис. 1. Функціональна схема живлення асинхронного двигуна від мережі змінного струму з використанням високочастотного трансформатора

Також в роботі [6] було запропоновано варіанти схем, які використовують резонансні явлення. Такі схеми дозволяють знизити навантаження напівпровідникових приладів за рахунок того, що їх комутація відбувається в момент, коли струм, який протікає через вентиль, знижується до нуля. Проте практичне впровадження таких схем вимагає застосування індуктивностей і ємностей резонансного контуру з досить жорстким обмеженням відхилення їх заданих параметрів і симетричну схему трансформатора.

Пізніше було запропоновано схему для багатосистемного ЕРС з проміжним високочастотним трансформатором [7], яка представлена на рис.2. Така схема розрахована на живлення ЕРС як з тяговими двигунами (ТЕД) постійного струму, так і з ТЕД змінного струму. В даному випадку викликає інтерес розгляду схеми для живлення тільки ТЕД змінного струму. Схема включає в себе випрямляч, інвертор, трансформатор підвищеної частоти, керований випрямляч та інвертор для живлення ТЕД змінного струму. Головним недоліком такої схеми є неможливість реалізації рекуперативного гальмування із-за поставленого на вході схеми випрямляча та на виході високочастотного трансформатора керованого випрямляча.

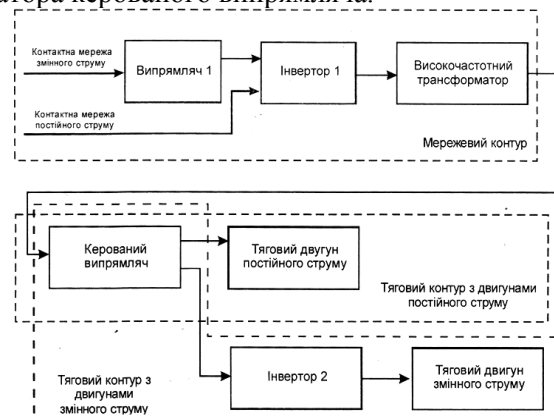


Рис. 2. Функціональна схема перспективного багатосистемного електровоза

Необхідно відмітити, що керований випрямляч необхідний для регулювання випрямленої напруги на колекторних ТЕД пульсуючого струму, а не для регулювання напруги на інверторі 2. Автономний інвертор напруги (інвертор 2) автоматично регулює напругу і частоту для живлення асинхронних ТЕД в залежності від швидкості руху електровоза.

Крім того, недоцільно подавати напругу тягової мережі 3 кВ на інвертор 1. Сучасна елементна база силових керованих напівпровідників дозволяє відразу подавати напругу 3 кВ на автономний інвертор напруги (інвертор 2).

Згодом на базі вище описаної схеми було створено нову схему багатосистемного електровоза з трансформатором підвищеної частоти (рис. 3) [8]. В цій схемі замість випрямлячів запропоновано використовувати чотириохвандрантні перетворювачі 4QS, що дає можливість реалізації рекуперативного гальмування. Крім того, в схемі запропоновано використання трифазної системи, що у порівнянні з однофазною дозволить зменшити габаритну потужність трансформаторів на 14,6 %.

Необхідно відмітити, що схема (див. рис. 3) була запропонована для живлення електровоза від мережі змінного струму напруги 25 кВ, 50 Гц і для живлення від мережі постійного струму таких напруг: 3 кВ, 6 кВ, 12 кВ, 24 кВ. Так як на даний час не існує силових напівпровідникових елементів які б змогли витримати напругу мережі 24 кВ, то вона подається на мережевий випрямляч, а не на автономний інвертор напруги, що являється недоцільним у випадку живлення електровоза від мережі постійного струму напруги 3 кВ. Недолік полягає у тому, що живлення тяговий інвертор (ТІ) отримує не безпосередньо від контактної мережі постійного струму, а попередньо проходить через такі елементи схеми (рис. 3): МВ, ФН, МІ, ТВ). В результаті схема має низький ККД та меншу надійність при живленні від мережі постійного струму.

Крім того в роботі [8] автором не представлена схема перетворення постійної напруги в змінну для живлення первинних трьох фаз трансформатора підвищеної частоти, тобто М11, М12, М13 і т. д. Також не представлено схему випрямлячів трифазної змінної напруги в постійну від вторинних обмоток трифазного трансформатора на ланку постійної напруги

У випадку несправності будь-якого з інверторів мережевого контуру МІ порушиться нормальна робота одного з трансформаторів ТТПЧ і, відповідно, трьох тягових двигунів АТД. А у випадку несправності одного з випрямлячів

мережевого конуру МВ не тримають живлення, в кінцевому випадку, всі тягові двигуни, тобто не передбачено аварійну схему.

Так як вихідна напруга на інверторах мережевих контурів МВ при живленні їх від мережі 25 кВ, 50 Гц і від 3 кВ (в першому випадку  $U_{МВ} = 0,9 \cdot 25000 / 6 = 3750$  В, а в другому випадку

$U_{МВ} = 3000 / 6 = 500$  В) неоднакова, то параметри фільтрів ФН і мережевих контурів МІ не узгоджуються і не забезпечують надійну роботу ЕРС. До того ж відсутня індуктивність в якості вхідного фільтра між контактною мережею і мережевим контуром МВ1, встановлення якого дозволить знизити психофотометричний струм гармонік до прийняттого рівня.

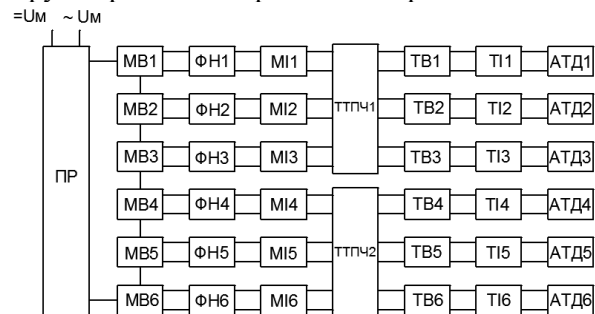


Рис. 3. Структура тягового перетворювача для режиму: 25 кВ змінного та 3 кВ постійного струму при 6 АТД з використанням трифазного трансформатора підвищеної частоти (ТТПЧ) ПР – перемикач режимів, МВ – випрямляч мережевого контуру, ФН – фільтр-накопичувач, МІ – інвертор мережевого контуру, ТТПЧ – трифазний трансформатор підвищеної частоти, ТВ – випрямляч тягового контуру, АТД – асинхронний тяговий двигун

Для усунення вказаних недоліків запропоновано нову принципову схему двосистемного ЕРС.

### Розробки

Розроблена функціональна схема ЕРС подвійного живлення приведена на рис. 4а. Графіки зміни напруги на елементах тягового приводу представлено на рис. 4б.

При живленні тягових двигунів від контактної мережі змінного струму схема працює наступним чином: напруга мережі 25 кВ, 50 Гц через струмоприймач ХА1 і головний вимикач QF1 подається на вхідний перетворювач 4QS1, який випрямляє напругу до значення 3,75 кВ. Випрямлена напруга згладжується LC фільтром FLC і подається до високочастотного однофазного мостового інвертора напруги перетворю 4QS2 в якому постійна напруга перетворюється в змінну 3,4 кВ з частотою  $f > 50$  Гц. Далі напруга подається на первинну обмотку високочастотного трансформатора і з виходу вторинної надходить до чо-

тирьохквadrантного перетворювача 4QS3. В даному випадку перетворювач 4QS3 виконує функції лише випрямляючо-інверторного перетворювача і не виконує функції імпульсного випрямляючо-інверторного перетворювача. В 4QS3 напруга випрямляється до значення 3 кВ і подається до ланки постійної напруги DCL. В ланці постійної напруги напруга згладжується і прикладається на вхід автономного інвертора напруги PWR. З виходу PWR до асинхронних двигунів М подається трифазна напруга, яка регулюється частотою  $f = var$ .

При живленні тягових двигунів від контактної мережі постійного струму 3 кВ напруга через струмоприймач ХА2, швидкодіючий вимикач QF2 і дросель Dг подається до ланки постійної напруги DCL і на вхід автономного інвертора напруги PWR, який живить асинхронні тягові двигуни М.

На рис. 4а представлена функціональна схема лише одного тягового кола живлення асинхронного двигуна. Таку схему можливо застосувати як на ЕРС з трьохвісними, так і на ЕРС з двохвісними візками. Тобто на 4-х, 6-ти, 8-ми і т. д. вісних локомотивах.

Досвід експлуатації залізниць Російської Федерації показав, що оптимальним з точки зору потужності (щодо електровозів) є створення шестивісних електровозів [9]. Експлуатаційний досвід залізниць також приходять до такого висновку. Тому далі будуть розглянуті схеми для шестивісного виконання ЕРС.

Електричні схеми електровозів на базі функціональної схеми (див. рис. 4а) з теоретичної точки зору при компонуванні елементів кожного тягового кола між собою мають безліч варіантів, що відображено в роботі [8]. Проте найбільшу відмінність з точки зору конструктивної побудови та практичної значимості мають наступні три варіанти схем:

- 1) із застосуванням двох трифазних трансформаторів;
- 2) із одним загальним однофазним шестиобмоточним трансформатором;
- 3) зі шістьма окремими однофазними трансформаторами.

Недоліки і переваги кожної із схем буде проаналізовано з точки зору надійності і масогабаритних показників.

Головною перевагою схем з застосуванням трифазних трансформаторів є виграш у масогабаритних показниках. При застосуванні трифазного трансформатора замість трьох однофазних трансформаторів тієї ж загальної потужності питомі витрати активних матеріалів змен-

шаться на 19 %. В такому ж співвідношенні зменшаться й втрати. До того ж, застосування трифазного мостового випрямляча в порівнянні з трьома однофазними дозволить знизити кількість силових елементів вдвічі і зменшити пульсацію вихідної напруги майже в 12 раз. Проте трифазні схеми мають свої недоліки в практичному застосуванні.

Далі розглянуто переваги і недоліки на прикладі функціональних схем. Для спрощення елементи схеми зображено в тяговому режимі.

Функціональна схема електровоза із застосуванням трифазного високочастотного трансформатора приведена на рис. 5. Напруга від контактної мережі змінного струму на вході розподілена між двома послідовно з'єднаними перетворювачами В11 та В12. Кожен з перетворювачів утворює тягове коло для живлення трьох автономних інверторів напруги АІН і тягових асинхронних двигунів М.

Принципова електрична схема одного тягового кола зображена на рис. 6. Напруга на вході перетворювача В11 складає половину номінальної напруги контактної мережі змінного струму (так як В11 і В12 з'єднані послідовно) і рівна  $25/2=12,5$  кВ.

Для захисту обладнання силових електричних кіл електровозів від атмосферних перенапружень застосовуються розрядники. Вони розраховуються на напругу перенапружень яка перевищує в 2 рази максимальну напругу контактної мережі. Тому вхідні перетворювачі повинні короткочасно витримувати напругу  $29 \cdot 2=58$  кВ. Оскільки перетворювачі В11 і В12 з'єднані послідовно, то кожен з них повинен витримувати  $58/2=29$  кВ. Перетворювачі В11 і В12 представляють собою мостові керовані випрямлячі, силові ключі VT1...VT4 (див. рис. 6) яких з'єднані попарно послідовно. Так як два ключі з'єднані послідовно, то кожен з них повинен витримувати напругу  $29/2=14,5$  кВ. Перетворювачі ІВ1 і ІВ2 повинні витримувати напругу 29 кВ. Оскільки, коли VT5 відкритий, а VT6 закритий, то вся напруга на вході ІВ1 прикладається до VT6.

Отже, в номінальному режимі силові ключі перетворювачів В11 і В12 повинні витримувати напругу 7,25 кВ і короткочасні перенапруження 14,5 кВ. Ключі перетворювачів ІВ1 та ІВ2 в номінальному режимі повинні витримувати напругу 14,5 кВ і короткочасні перенапруження 29 кВ.

Силові напівпровідникові ключі, які необхідні для комутації вищевказаних напруг не існують на теперішній час.

Отже, реалізація схем з використанням трифазних трансформаторів при сучасній елементній базі неможлива. Тому порівняння їх з точки зору масогабаритних показників не викликає зацікавленість.

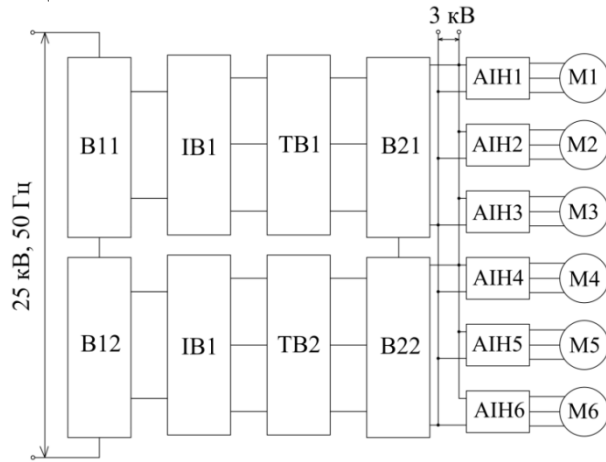


Рис. 5. Функціональна схема з застосуванням трифазного мостового інвертора для живлення обмоток трифазного трансформатора живлення обмоток трифазного трансформатора

Функціональна схема із застосуванням шестиобмоточного трансформатора представлена на рис. 7. В такій схемі застосовується один високочастотний проміжний трансформатор обмотки якого працюють синфазно.

Для реалізації такої схеми достатньо застосувати в перетворювачах силові елементи з робочою напругою 6,5 кВ. Такі елементи існують і широко застосовуються на електрорухомому складі з асинхронним приводом.

При виході з ладу одного з перетворювачів в колі до трансформатора напруга на всіх шести тягових двигунах знизиться на  $1/6 \approx 16,7\%$  від номінальної. Відповідно, сумарна потужність шестивісного електровоза буде рівна потужності п'яти двигунів.

Відомо, що обертовий момент асинхронного двигуна пропорційний квадрату напруги  $M \sim U^2$ , тоді, якщо номінальну напругу на всіх тягових двигунах прийняти за 100 %, тобто  $U = 1$ , то отримаємо:

$$M \sim U^2 \sim 1^2 = 1.$$

Тобто момент буде рівний 100 % при номінальній напрузі 100%.

При зниженні напруги на всіх двигунах на 16,7 % загальний момент стане рівним  $0,83^2 = 0,68$  від загальної потужності.

Потужність електровоза прямопропорційна сумі обертових моментів тягових двигунів:

$$P_{\text{ел}} \sim \sum M_{\text{тед}}.$$

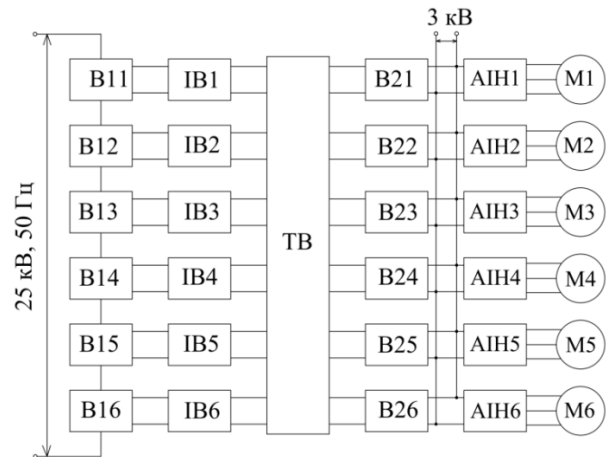


Рис. 7. Функціональна схема із застосуванням шестиобмоточного трансформатора

Тому при зниженні сумарного моменту тягових двигунів на 32 % потужність електровоза також знизиться на 32 %.

Отже, у разі виходу з ладу одного з перетворювачів, який знаходиться в колі до трансформатора загальна потужність електровоза знизиться на 32 %, і обертовий момент також на 32 %.

У разі виходу із ладу одного з перетворювачів (B21...B26) в колі після трансформатора на всіх шести двигунах збережеться номінальне значення напруги, так як всі автономні інвертори (АІН1...АІН6) включені паралельно між собою. Проте загальний струм в п'яти робочих перетворювачах збільшиться на 16,7 %. В такому випадку загальна потужність електровоза знизиться на 16,7 %. А так як напруга на п'яти двигунах матиме номінальне значення, то і загальний обертовий момент знизиться на 16,7 %, тобто буде становити  $100\% - 16,7\% = 83,3\%$ , що на 15,3 % (83,3-86) більше, ніж у першому випадку виникнення аварійної ситуації (в колі до трансформатора).

При виході з ладу трансформатора електровоз буде повністю у неробочому стані, що являється суттєвим недоліком.

Функціональна схема електровоза із застосуванням шести однофазних трансформаторів приведена на рис. 8. Така схема має шість окремих тягових кіл для живлення індивідуальних двигунів.

У разі виходу з ладу одного з перетворювачів в колі до чи після трансформатора, або одного з трансформаторів загальна потужність і момент знизяться на 16,7 % якщо відключити один двигун. Якщо не відключати двигун, то загальна потужність і момент зменшаться не більше ніж на 10 %.

Отже, з точки зору надійності схема з шести однофазними трансформаторами має перевагу над

схемою з одним шестиобмоточним трансформатором, оскільки при будь-якому аварійному випадку електровоз втратить 16,7 % потужності і моменту.

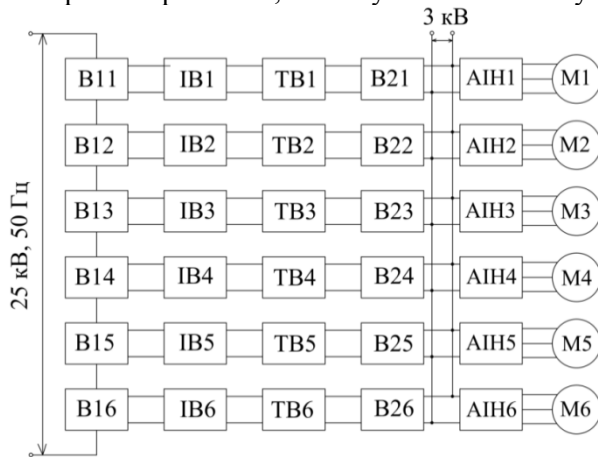


Рис. 8. функціональна схема електровоза із застосуванням шести однофазних трансформаторів

Розглянуті дві нижче приведені схеми (рис. 7, 8) конструктивно відрізняються лише трансформаторами. Тому, з точки зору масогабаритних показників, розглянуто співвідношення між трансформаторами.

Як відомо, з ростом потужності трансформатора збільшується його ККД, тобто зменшуються втрати. Зв'язок між масою активних матеріалів  $G$  і потужністю  $S$  має таке співвідношення [10]:

$$G \sim S^{\frac{3}{4}}. \quad (4)$$

Тоді, питомі витрати активних матеріалів  $g$  визначаються за наступним співвідношенням:

$$g \sim \frac{G}{S} \sim \frac{1}{S^{\frac{1}{4}}}. \quad (5)$$

Якщо прийняти потужність однофазного однообмоточного трансформатора  $S_1$  за одну відносну одиницю, то потужність однообмоточного трансформатора  $S_6$  буде рівна шести відносним одиницям, тобто  $S_1 = 1$ ,  $S_6 = 6$ . Скориставшись вище приведеною формулою отримаємо:

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ротанов Н. А. Электроподвижной состав с тяговыми асинхронными двигателями / Н. А. Ротанов, А. С. Курбасов, Ю. Г. Быков, В. В. Литовченко. – М.: Транспорт, 1991. – 336 с.
2. Литовченко В. В. Современные многосистемные электровозы / В. В. Литовченко, О. Б. Баранцев // Локомотив. – 2000. – №9. – С. 45-46.
3. Готтлиб И. М. Источники питания. Инверторы, конверторы, линейные и импульсные стабилизаторы /

$$g_1 = \frac{1}{1^{\frac{1}{4}}} = 1, \quad g_6 = \frac{1}{6^{\frac{1}{4}}} = 0,639.$$

Порівнявши між собою значення витрат двох трансформаторів отримаємо:

$$\frac{g_1}{g_6} = \frac{1}{0,639} = 1,56.$$

Отже, витрати активних матеріалів шістьох однофазних трансформаторів будуть приблизно на 56 % перевищувати витрати на один шестиобмоточний трансформатор.

З точки зору ремонтпридатності схема із шістьма однофазними трансформаторами більш вигідна, так як у випадку пошкодження одного з трансформаторів його можливо зняти для усунення несправності і замінити іншим. У випадку ж пошкодження однієї з обмоток шестиобмоточного трансформатора необхідно розбирати весь трансформатор для усунення несправності, що вимагатиме більшої затрати часу та праці.

Не дивлячись на окремі недоліки схеми з шестиобмоточним трансформатором вона має суттєву перевагу в масогабаритних показниках трансформатора і тому в подальшому матиме більш детальне дослідження.

#### Висновки

В роботі проаналізовано способи зниження масогабаритних показників трансформатора, виконано аналіз силових схем ЕРС із застосуванням високочастотного трансформатора. Запропоновано альтернативну схему силових кіл двосистемного ЕРС з тяговим асинхронним приводом, що дозволить знизити масогабаритні показники тягового трансформатора, і відповідно всього приводу. На відміну від раніше розроблених схем запропонована схема має більш високий коефіцієнт корисної дії при живленні ЕРС від тягової мережі постійного струму. Крім того, запропонована схема має більш високий показник електромагнітної сумісності на відміну від існуючих електричних схем ЕРС, оскільки в колі перетворення потужності відсутній імпульсний відбір енергії від джерела живлення.

#### REFERENCES

1. Rotanov N. A. Kurbasov A. S., Bykov Yu. G., Litovchenko V. V. *Elektropodvizhnoy sostav s tyagovymi asinkhronnymi dvigatelyami* [Electric rolling stock with traction induction motors]. Moscow, Transport Publ., 1991. 336 p.
2. Litovchenko V. V., Barantsev O. B. *Sovremennye mnogosistemnye elektrovozy* [Modern multi-system electric locomotives]. *Lokomotiv* – Locomotive, 2000, issue 9, pp. 45-46.
3. Gottlib I. M. *Istochniki pitaniya. Invertory, konver-*

© Вісін М. Г., Забаріло Д. О., 2013

И. М. Готтлиб. – М.: Посмаркет, 2002. – 544 с.

4. Мэк Р. Импульсные источники питания, теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению / Р. Мэк. – Издательский дом «Додэка-XXI», 2008. – 272 с.

5. М. Kunz. Тяговые преобразователи уменьшенной массы / Железные дороги мира. – 2000. - №8 С. 31 – 34.

6. Victor M. Преобразование энергии на электроподвижном составе переменного тока с помощью трансформатора повышенной частоты / М. Виктор // Железные дороги мира. – 2006. - №6 – С. 49-53.

7. . Дубинец Л. В. Структурна схема перспективного электровоза подвійного живлення / Л. В. Дубинец, М. Г. Чілікін, А. М. Муха // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки): [тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика»]. – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2007. – С. 356-357.

8. Муха А. М. Розвиток наукових основ створення тягових електропередач багатосистемних електровозів / А. М. Муха // Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Спеціальність 05. 22.09 – Електротранспорт. Дніпропетровськ – 2011. – 36 с.

9. . Орлов Ю. А. Особенности схем и конструкций базового электровоза нового поколения / Ю. А. Орлов, В. П. Янов // Транспорт Российской Федерации. – 2008. - №1 (14). – С. 60-64.

10. . Тихомиров Г. М. Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов / Г. М. Тихомиров. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

Надійшла до друку 10.04.2013.

**Ключові слова:** високочастотний трансформатор, електрорухомий склад, силова схема, трифазний трансформатор, автономний інвертор напруги, тяговий асинхронний двигун.

*tory, lineynye i impulsnyye stabilizatory* [Power sources. Inverters, converters linear and switching regulators]. Moscow, Posmarket Publ., 2002. 544 p.

4. Mek R. *Impulsnyye istochniki pitaniya, teoreticheskie osnovy proektirovaniya i rukovodstvo po prakticheskomu primeneniyu* [Switching power supply, theory designing and guide for practical use]. Izdatelskiy dom «Dodeka-XXI» Publ., 2008. 272 p.

5. M. Kunz. *Tyagovye preobrazovateli umenshennoy massy* [Reduced weight traction converters]. *Zheleznye dorogi mira - Railways of the World*, 2000. - issue 9, pp. 31 – 34.

6. Victor M. *Preobrazovanie energii na elektropodvizhnom sostave peremennogo toka s pomoshchyu transformatora povyshennoy chastoty* [Energy transformation for electric rolling AC with high frequency transformer]. *Zheleznye dorogi mira - Railways of the World*, 2006. - issue 6, pp. 49 – 53.

7. Dubynets L. V., Chilikin M. H, Mukha A. M. *Strukturna skhema perspektivnoho elektrovoza podviinoho zhvylnennia* [Structural circuit for the prospective dual power supply electric locomotive]. *Zbirnyk naukovykh prats Dniprodzerzhynskoho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky): [tematychnyi vypusk «Problemy avtomatyzovanoho elektropryvoda. Teoriia y praktyka»]* - Dniprodzerzhynsk: DDTU. – 2007. – S. 356-357.

8. Mukha A. M. *Rozvytok naukovykh osnov stvorennia tiahovykh elektroperedach bahatosystemnykh ektrovoziv* [The development of scientific bases of creation tractive electric drive for multisystem electric locomotive]. *Avtoreferat dysertatsii na zdobuttia naukovooho stupenia doktora tekhnichnykh nauk. Spetsialnist 05. 22.09 – Elektrottransport* - Abstract of the thesis for obtaining of academic degree of Doctor of Technical Sciences. Speciality 05.22.09 - Electric transport, Dnipropetrovsk, 2011. 36 p.

9. Orlov Yu. A., Yanov V. P. *Osobennosti skhem i konstruksiy bazovogo elektrovoza novogo pokoleniya* [Specifics of circuits and construction of basic electric locomotive of new generation]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* - Transport of the Russian Federation, 2008, issue 1 (14), pp. 12-14.

10. Tikhomirov G. M. *Raschet transformatorov: ucheb. posobie dlya vuzov* [Calculation of transformers: a manual for high schools study guide]. Energoatomizdat Publ., 1986. 528 p.

Статтю рекомендовано до друку д.т.н., професором М. В. Панасенком

Перспективним напрямком в області залізничного транспорту являється розвиток і впровадження багатосистемного електрорухомого складу на якому застосовано тяговий асинхронний привод. Тяговий привод являється основною системою перетворення потужності на рухомому складі і включає в себе трансформатор, перетворювач і двигун. Тяговий трансформатор являється найбільш громіздким елементом привода і має значну масу і об'єм. Тому знижуючи його масогабаритні показники можливо отримати більш компактний і економічний привод в цілому.

Одним із способів суттєвого зниження масогабаритних показників тягового трансформатора являється підвищення його робочої частоти. Для реалізації цього необхідно розробити спеціальні схеми для живлення високочастотного трансформатора. Існуючі схемотехнічні рішення не дозволяють в значній мірі спростити схеми, а також, в деяких випадках, мають низький коефіцієнт корисної дії. Тому необхідно розробити схему силових кіл електрорухомого складу, яка матиме високий ККД, просту реалізацію з точки зору схемотехніки та надійну в експлуатації.

В роботі виконано аналіз існуючих схем багатосистемного електрорухомого складу, які використовують високочастотний трансформатор та розроблено новий варіант схеми.

Запропонований авторами новий варіант схеми двосистемного електрорухомого складу з тяговим асинхронним приводом дозволить знизити масогабаритні показник трансформатора, підвищити ККД ЕРС при живленні від мережі постійного струму 3 кВ і підвищити надійність в аварійних режимах роботи. Крім того, в запропонованій схемі відсутній імпульсне відбирання енергії від тягової мережі, що підвищує рівень електромагнітної сумісності ЕРС з пристроями автоматики.

УДК 629.423:621.314

ВИСИН Н. Г., ЗАБАРИЛО Д. А. (ДНУЖТ)

Кафедра Электроподвижной состав железных дорог, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010 Днепропетровск, Украина, тел. +38(063) 446-77-38, эл. почта [lazbl@yandex.ru](mailto:lazbl@yandex.ru)

## АНАЛИЗ СИЛОВЫХ СХЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ПИТАНИЯ АСИНХРОННЫХ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Перспективным направлением в области железнодорожного транспорта является развитие и внедрение многосистемного электроподвижного состава на котором применен тяговый асинхронный привод. Тяговый привод является основной системой преобразования мощности на подвижном составе и включает в себе трансформатор, преобразователь и двигатель. Тяговый трансформатор является наиболее громоздким элементом привода и имеет значительную массу и объем. Поэтому снижая его массогабаритные показатели возможно получить более компактный и экономичный привод в целом.

Одним из способов существенного снижения массогабаритных показателей тягового трансформатора является повышение его рабочей частоты. Для реализации этого способа не обходимо разработать специальные схемы для питания высокочастотного трансформатора. Существующие схемотехнические решения не позволяют в значительной степени упростить схемы, а также, в некоторых случаях, имеют низкий коэффициент полезного действия. Поэтому необходимо разработать схему силовых цепей электроподвижного состава, которая будет иметь высокий КПД, простую реализацию с точки зрения схемотехники и надежную в эксплуатации.

В работе выполнено анализ существующих схем многосистемного электроподвижного состава, которые используют высокочастотный трансформатор и разработано новый вариант схемы.

Предложенный авторами новый вариант схемы двухсистемного электроподвижного состава с тяговым асинхронным приводом позволит снизить массогабаритные показатели трансформатора, повысить КПД ЭПС при питании от тяговой сети постоянного тока 3 кВ и повысить надежность в аварийных режимах работы. Кроме того, в предложенной схеме отсутствует импульсный отбор энергии от тяговой сети, что повышает уровень электромагнитной совместимости ЭПС с устройствами автоматики.

**Ключевые слова:** высокочастотный трансформатор, электроподвижной состав, силовая схема, трехфазный трансформатор, автономный инвертор напряжения, тяговый асинхронный двигатель.

Статью рекомендовано к печати д.т.н, профессором *Н. В. Пансенком*

UDC 629.423:621.314

VISIN N. G., ZABARILO D. A. (DNURT)

Department Electric rolling stock of railways, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after V. Lazaryan, Lazaryana street 2, 49010 Dnipropetrovsk, Ukraine, tel.: +38(056)373-15-04, e-mail [lazbl@yandex.ru](mailto:lazbl@yandex.ru)

## THE ANALYSIS OF POWER CIRCUITS USING A HIGH-POWER TRANSFORMER FOR THE FEEDING OF INDUCTION TRACTION MOTORS OF ELECTRIC ROLLING STOCK

The perspective direction in the field of railway transport is the development and implementation of multi-system electric rolling stock which used asynchronous traction drive. Traction drive is the main power conversion system for rolling stock and includes transformers, converters and motor. Traction Transformer is the most cumbersome part of the drive and has great weight and volume. Therefore, reducing its weight and dimension parameters can obtain a more compact and economical drive in general.

One way to significantly reduce weight and size parameters of traction transformer is increasing its operating frequency. To achieve this it is necessary to develop special circuits for feeding high-frequency transformer. Existing circuit engineering solutions do not allow greatly simplified scheme and, in some cases, have low efficiency. It is therefore necessary to develop a circuit of power circuits electric rolling stock which will have high efficiency, easy realization in terms of circuitry and reliable in operation.

In this work analyzed the existing circuits of multisystem electric rolling stock which use high-frequency transformer and developed a new version of the circuit.

Authors proposed a new version of the circuit of dual-system electric rolling stock with asynchronous traction drive will reduce the weight and size of transformer parameter, increase efficiency of electric rolling stock in direct current power supply 3 kV and increase reliability in emergency modes. Besides in the proposed circuit is missing sampling pulse energy from power network that increases the level of electromagnetic compatibility of electric rolling stock with automation devices.

**Keywords:** high-frequency transformer, electric rolling stock, power circuit, three-phase transformer, self-excited voltage inverter, traction induction motor.

Prof. *M. V. Panasenko*, D. Sc. (Tech.) recommended this article to be published.

© Вісін М. Г., Забаріло Д. О., 2013