

ТЯГОВА АСИНХРОННА ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧА МЕТРОВАГОНА ПІДВИЩЕНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Хворост М.В., к.т.н., доц.
ДП "Харківський метрополітен"
Україна, 61012, Харків, вул. Енгельса, 29
тел. (0572) 730-35-96

Запропонована структура тягової асинхронної електропередачі метровагона потужністю 1000 кВт дозволяюча при напрузі живлення 1500 В реалізувати концентровану систему тяги п'ятивагонних метропоїздів по схемі "два головні обмоторені вагони з кабінами управління в голові і хвості поїзда та три причепні вагони в середині". Показано, що к.к.д. запропонованої тягової асинхронної електропередачі навіть при використанні вузлів захисту від струмів короткого замикання тягових двигунів при відмовах в інверторі напруги буде не нижче за 0,92 при частоті широтно-імпульсної модуляції інвертора 3 кГц.

Предложена структура тяговой асинхронной электропередачи метро вагона мощностью 1000 кВт позволяющая при напряжении питания 1500 В реализовать смешанную систему тяги пятивагонных метро поездов по схеме "два головных обмоторенных вагона с кабинами управления в голове и хвосте поезда и три прицепных вагона в середине". Показано, что к.п.д. предложенной тяговой асинхронной электропередачи даже при использовании узлов защиты от токов короткого замыкания тяговых двигателей при отказах в инвертировании напряжения будет не ниже 0,92 при частоте широтно-импульсной модуляции инвертирования 3 кГц.

АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

Аналіз робіт [1, 2] показує, що в якості показників технічної досконалості метропоїздів щодо енергетичних, матеріальних і трудових втрат в процесі експлуатації можуть бути прийняті:

- величина максимально допустимої швидкості V_{\max} і ступінь її реалізації $K_V = V_{\text{cp}}/V_{\max}$ (де V_{cp} – середня швидкість) в циклі руху "пуск – вибіг – гальмування";
- коефіцієнт корисного використання енергії гальмування $K_{\text{pek}} = A_p/A_{\text{TK}}$ (де A_{TK} – кінетична енергія метропоїзда на момент початку гальмування; A_p – рекуперуєма у тягову мережу електроенергія);
- коефіцієнт корисної дії $\eta_M = A_{\text{TK}}/A_{\text{TC}}$ (де A_{TC} – енергія, споживаєма метропоїздом з тягової мережі на циклі руху "пуск – вибіг – гальмування"; A_{TK} – кінетична енергія метропоїзда на кінець пуску);
- відносна кількість обмоторених метровагонів

$$K_M = \frac{N_{\text{BM}}}{N_{\text{B}}} \quad (\text{де } N_{\text{B}} - \text{загальна кількість вагонів у складі метропоїзда; } N_{\text{BM}} - \text{кількість обмоторених вагонів у складі метропоїзда);$$

- клас експлуатаційної надійності метропоїзда, який пов'язаний з кількістю відмов метровагонів на лінії за термін їх служби.

Показники K_V , K_{pek} , η_M , як правило, визначають експериментально, тобто при реалізації циклу руху метропоїзда "пуск – вибіг – гальмування" на еквівалентному перегоні у вигляді площадки з максимально допустимим пасажиронавантаженням метровагонів та при максимально допустимих величині швидкості V_{\max} на кінець пуску і величині прискорення $a_{\text{П}}^+$ на інтервалі пуску і уповільнення $a_{\text{Г}}^-$ на інтервалі гальмування. Однак, на стадії розробки нового типу метропоїздів доцільно оцінити ці показники з боку технічної досконалості окремих систем і вузлів.

Очевидно, що в ідеальному випадку при реалізації на еквівалентному перегоні в 1670 м [3] в циклі руху метропоїзда "пуск – вибіг – гальмування" на кінець інтервалу пуску максимально допустимої швидкості $V_{\max} = 90$ км/год при постійній величині максимально допустимого з точки зору комфортності пасажирів прискорення $a_{\text{П}}^+ = 1,6$ м/с² і уповільнення на інтервалах вибігу і гальмування відповідно $a_{\text{В}}^- = 0,0917$ м/с² і $a_{\text{Г}}^- = 1,6$ м/с² [1] середня швидкість становить $V_{\text{cp}} \cong 69$ км/год, що дає $K_V \cong 0,766$.

Коефіцієнт K_{pek} і η_M в ідеальному випадку наближаються до 1.

Щодо кількості обмоторених метровагонів та класу експлуатаційної надійності метропоїзда, то можна прийняти, що ці показники у ідеальному випадку п'ятивагонного метропоїзда з двома головними обмотореними вагонами в голові і хвості відповідають $K_M = 40$ % і абсолютному класу, тобто не більше однієї відмови метровагона на лінії за нормативний термін служби до його капітального ремонту при прийнятій системі технічного обслуговування і ремонту.

При прийнятій для вітчизняних метрополітенів моторвагоній тязі ($K_M = 100$ %) технічні показники метропоїздів навіть на базі вагонів 81.717 (головних) і 81.718 (проміжних) з тяговою електропередачею постійного струму в якій реалізується двозонна характеристика управління тяговими двигунами постійного струму послідовного збудження від тиристорно-імпульсної системи керування є далекими від ідеальних технічних показників.

Так, при максимально реалізуємій швидкості в кінці пуску $V_{\max} = 82,3$ км/год, коефіцієнти технічної ефективності складають: $K_V \cong 0,578$; $K_{\text{pek}} \cong 0,42$ при схемному к.к.д. рекуперації $\eta_{\text{Г}} = 0,48$; $\eta_M \cong 0,85$ при к.к.д. тягової електропередачі $\eta_{\text{ТЕП}} = 0,86$. Практика ж експлуатації таких метропо-

їздів на Олексіївській лінії ДП "Харківський метрополітен" показує, що по своїй експлуатаційній надійності метропоїзди на основі метровагонів 81.717 і 81.718 відповідають лише відносному класу. Далекими від ідеальних технічних показників є і п'ятивагонні метропоїзди розподіленої системи тяги $K_M = 60\%$, Паризького метрополітену, три обмоторені вагони яких мають мономоторні візки з тяговими двигунами постійного струму підвищеної потужності [1].

Суттєвого покращення технічних показників (за виключенням K_M та $K_{рек}$) метропоїздів з моторвагонною тягою було досягнуто ще на кінець 80-х років ХХ-го століття за рахунок використання в якості тягових двигунів метровагонів трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, кращі зразки яких мають масу віднесено до їх потужності на рівні 1,6 кг/кВт [4]. Так, фірма "Стремберг" (Фінляндія) розробила тягову асинхронну електропередачу на основі інвертора напруги для метровагонів серії 100 яка дозволила при розгоні метропоїзда з моторвагонною тягою до швидкості 80 км/год реалізувати середнє прискорення на рівні 0,888 м/с², що дозволяє скоротити час розгону до 2,5 с, а при гальмуванні, починаючи із швидкості 62 км/год реалізувати постійне уповільнення на рівні 1,2 м/с² [1].

Відмітимо, що в режимах пуску і гальмування цих метропоїздів з тяговою асинхронною електропередачею регулювання потужності тягових асинхронних двигунів виконується аналогічно регулюванню потужності двигунів метровагонів з електропередачею постійного струму, тобто з використанням двозонної характеристики управління двигунами.

Структура класичної силової схеми тягової асинхронної електропередачі метровагона метровагона, яка реалізує групове управління тяговими асинхронними двигунами, має вигляд, наведений на рис. 1.

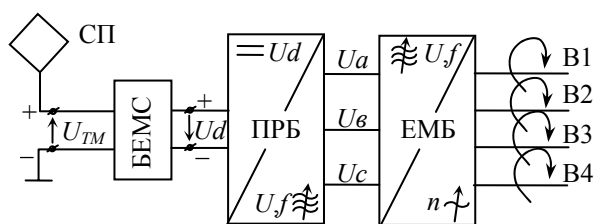


Рис. 1. Структура силової схеми тягової асинхронної електропередачі метровагона з груповим управлінням двигунами: БЕМС – блок електромагнітної сумісності; ПРБ – перетворювально-регулювочний блок; ЕМБ – електромеханічний блок; B1 – B4 – вали чотирьох тягових асинхронних двигунів; U_{TM} – напруга в тяговій мережі; U_d – напруга живлення ПРБ; СП – струмоприймач метровагона

В традиційному варіанті використання двозонної характеристики управління тяговими асинхронними двигунами у класичній структурі тягової асинхронної електропередачі метровагона на базі автономного інвертора напруги електромеханічний блок (ЕМБ), забезпечуючий перетворення регульованої по величині і частоті змінної трифазної напруги U, f в регулюванні обороти n валів асинхронних двигунів, пред-

ставляє собою паралельне з'єднання чотирьох тягових двигунів з загальними фазними резисторами для погодження потужності (напруги) двигунів в режимі гальмування при високих швидкостях з потужністю (напругою) загального для всіх двигунів перетворювально-регулювочного блока (ПРБ). Фазні резистори при низьких швидкостях гальмування та в режимі тяги шунтуються контакторами.

Перетворювально-регулювочний блок (ПРБ) представляє собою трифазний мостовий комутатор інвертора напруги на двофазних напівпровідникових ключах знакозмінного струму із снаберами фіксації рівня напруги на керованих вентилях [3]. Блок електромагнітної сумісності (БЕМС) представляє собою, як правило, сукупність двох вузлів: вхідного LC-фільтра для придушення вищих гармонік струму і напруги на вході ПРБ і, отже, для обмеження пульсацій тягового струму та наданні тяговій мережі властивостей джерела напруги і регулятора реостатного гальма для забезпечення режиму електричного гальмування при відсутності в тяговій мережі споживачів або напруги на струмоприймачі (наприклад, при переїзді розривів контактного рельса). Однак, треба мати на увазі, що в тягових асинхронних електропередачах з двозонною характеристикою управління двигунами метровагонів, асинхронні тягові двигуни виконуються далекими від теоретично можливих масо-габаритних характеристик із-за необхідності забезпечувати їх роботу в режимі глибокого ослаблення магнітного поля, а також із-за того, що для реалізації найбільш допустимої гальмової сили у діапазоні високих швидкостей ($V > 30 - 40$ км/год), тягові асинхронні двигуни повинні працювати з підвищеною напругою і ввімкненими фазними резисторами. Крім цього для обмеження фазних струмів короткого замикання при відмовах в інверторі напруги типу "пробиття" ключа тягові асинхронні двигуни метровагонів виконуються з великою індуктивністю розсіювання обмоток.

Ці чинники, а також порівняно низький рівень напруги живлення, який обумовлює при збільшенні потужності значні втрати в тяговому електрообладнанні метровагона, і, що особливо небажано, збільшення втрат потужності в комутаторі інвертора напруги з традиційною "жорсткою" комутацією силових напівпровідникових ключів, а також високі вимоги щодо допустимих пульсацій струму в тяговій мережі і не дозволяють суттєво підняти потужність тягової асинхронної електропередачі із-за обмежень як з боку масо-габаритних параметрів електрообладнання, так і з боку спроможності традиційної системи його охолодження, прийнятої у метровагонобудуванні і тим самим робить неможливим перехід на концентровану або розподілену систему тяги метропоїздів.

Реалізація ж прийнятих для практики використання концентрованої системи тяги метропоїздів масо-габаритних і енергетичних показників тягового електрообладнання метровагонів підвищеної потужності потребує нетрадиційних підходів до побудови силових схем блоків тягової асинхронної електропередачі, вибору величини напруги живлення та характеристики управління тяговими двигунами. Такими нетрадиційними підходами є перехід:

- на підвищену напругу тягової мережі, а саме напругу 1500 В, яка вже широко використовується на лініях зарубіжних метрополітенів [1];
- на однозонну характеристику управління тяговими асинхронними двигунами, що саме по собі дає можливість покращити масо-габаритні показники тягових асинхронних двигунів [6];
- на групове управління тяговими асинхронними двигунами обмотованого метровагона з реалізацією схемного захисту від ударних гальмових моментів [7, 8], що також сприяє покращенню масо-габаритних показників як тягових асинхронних двигунів із-за зняття обмежень на індуктивність розсіювання обмоток, так і перетворювально-регулювального блока;
- на "м'яку" комутацію силових напівпровідникових ключів комутатора інвертора напруги [9], що зменшить втрати потужності в цих ключах і, отже, дозволить підняти потужність і частоту широтно-імпульсної модуляції інвертора напруги;
- на гібридну структуру вхідного LC-фільтра блока електромагнітної сумісності, що дозволить як покращити масо-габаритні показники фільтра, так і знизити пульсації струму в тяговій мережі [10].

Над вирішенням цих задач і працює автор під керівництвом проф., д.т.н. Панасенко М.В. Далі будуть наведені деякі результати схематичних розробок в напрямку вирішення вище наведених задач.

СИЛОВІ СХЕМИ БЛОКІВ ТЯГОВОЇ АСИНХРОННОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ПІДВИЩЕНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

По-перше, відмітимо, що ні від прийнятої системи тяги, ні від величини напруги в тяговій мережі структури тягових асинхронних електропередач моторних метровагонів не залежать. Ці чинники впливають тільки на параметри елементів силових схем блоків тягової електропередачі метровагона.

На структури силових схем блоків тягової асинхронної електропередачі (БЕМС, ПРБ, ЕМБ) відповідно впливають який тип управління, прийнятий у тяговій асинхронній електропередачі (груповий, повізковий, індивідуальний), прийнятий тип активного фільтра (послідовний чи паралельний) при реалізації гібридної структури вхідного LC-фільтра, вид комутації (жорстка чи м'яка) двоквADRантних ключів комутатора інвертора напруги та вид характеристики управління, засіб захисту і структура силових чотириквADRантних ключів вузлів захисту від струмів короткого замикання (ударних гальмових моментів) тягових асинхронних двигунів.

На рис. 2, а наведена найбільш доцільна з точки зору простоти, установленої потужності і втрат потужності силова схема електромагнітного блока ЕМБ метровагона при реалізації групового управління тяговими асинхронними двигунами з використанням загальних фазних вузлів захисту від струмів короткого замикання двигунів при відмовах в ПРБ та тиристорною структурою чотириквADRантних ключів цих вузлів захисту.

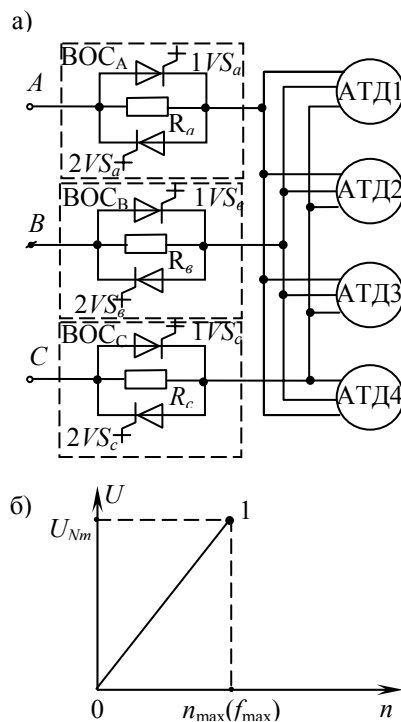


Рис. 2 Силова схема ЕМБ метровагона при груповому управлінні тяговими асинхронними двигунами (АТД1 – АТД4) і загальними фазними вузлами захисту від струмів короткого замикання двигунів (BOC_A , BOC_B , BOC_C) – а); вид однозонної характеристики управління тяговими асинхронними двигунами в межах від нуля (точка 0) до максимально допустимих оборотів ротора (точка n_{max}) – б)

При використанні однозонної характеристики управління (рис. 2, б) в зоні регульованих оборотів ($0 - n_{max}$) і, отже, регульованої напруги U і частоти f виконується умова:

$$\frac{U}{f} = const. \quad (1)$$

При цій умові в тягових двигунах буде підтримуватися постійний (максимальний) магнітний потік, що і дозволяє в процесі розгону до max реалізувати максимальний пусковий момент, тобто постійне максимально допустиме прискорення метровагона. Потужність же тягової асинхронної електропередачі в процесі пуску поступово збільшується від нуля до свого максимального значення P_{max} на момент досягнення максимально допустимої швидкості V_{max} в кінці пуску (точка 1 на рис. 2, б). Максимального значення у цей момент досягають фазна величина напруги $U=U_{Nm}$ і її частота $f=f_{max}$. Отже, реалізація однозонної характеристики управління тяговими асинхронними двигунами метровагона (рис. 2, б) не потребує при реалізації максимально допустимого уповільнення погодження потужності (напруги) тягових асинхронних двигунів і перетворювально-регулювального блока при гальмуванні з максимальної швидкості V_{max} . Це дозволяє відмовитися від підключення погоджувальних фазних резисторів при реалізації електричного гальмування, що потребує в схемі рис. 2, а постійного характеру включення чотириквADRантних ключів $1VS_i$, $2VS_i$ (де $i = a, b, c$) вузлів захисту BOC_i

як в режимі пуску, так і в режимі гальмування. Останнє і дає можливість реалізації чисто рекупера- тивного гальмування при використанні однозонної характеристики управління тяговими двигунами у всьому діапазоні швидкостей метровагона і, отже до- зволяє суттєво збільшити схемний к.к.д. рекуперації η_p , що і наближує коефіцієнт корисного використання енергії гальмування до 1.

Крім цього позитивного чинника, однозонна ха- рактеристика управління тяговими двигунами дає можливість суттєво скоротити інтервал розгону до максимальної швидкості V_{max} і, отже, підвищити сере- дню швидкість V_{cp} на перегоні, що в свою чергу сте- пінть реалізації максимально допустимої швидкості K_V наближає до 0,766.

Вузли обмеження струму короткого замикання $ВОС_i$ ($i=a, в, с$) включаються в роботу (до тягових асинхронних двигунів підключаються фазні резистори R_i ($i = a, в, с$)) тільки при відмовах ключів (типу "пробиття") в ПРБ шляхом вимикання чотириквadraнтних ключів $1/S_i, 2/S_i$ (де $i = a, в, с$). Тепер у зв'язку із зняттям обмежень для тягових асинхронних двигунів з боку двозонної характеристики управління та ін- дуктивності розсіювання асинхронні тягові двигуни для метровагонів можна проектувати з оптималь- ним з точки зору їх масо-габаритних показників. Це і дозволить вписати в габарити візка асинхронні тягові двигуни пускової потужності 250–300 кВт, що буде, достатнім для переходу на змішану структуру тяги п'ятивагонних метропоїздів навіть з двома типами метровагонів: двох головних обмоторених з кабінами управління і трьох причепних необмоторених. А це і дозволить реалізувати відносно кількість обмото- рених метровагонів K_V у складі п'ятивагонного метро- поїзда на рівні 40% і отже, зменшити експлуатаційні втрати на технічне обслуговування і ремонт метропої- здів. Щодо впливу однозонної характеристики управ- ління тяговими асинхронними двигунами при їх гру- повому керуванні від одного перетворювально- регульованого блока на частоту вихідної напруги, потужність двигунів і допустиме відхилення діаметрів колес, то перехід з двозонної характеристики до одно- зонної потребує підвищення частоти модульованої вихідної напруги для реалізації V_{max} приблизно вдвічі, а це у сукупності із скороченням робочого інтервалу на циклі "пуск – вибіг – гальмування" дає зменшення установленої потужності двигунів майже в 1,4 рази [6], а також дає, при однакових величинах відхилень по струму в 10%, збільшення допустимого відхилення діаметрів колес в 1,6 рази [11].

Втрати потужності у фазних вузлах обмеження струмів короткого замикання тягових асинхронних двигунів при потужності тягової електропередачі ме- тровагона 1000 кВт і при напрузі в тяговій мережі 1500 В складають близько 9 кВт, що при коефіцієнті корисної дії оптимізованих під однозонну характе- ристику тягових асинхронних двигунів $\eta \cong 0,96$ дає ко- ефіцієнт корисної дії ЕМБ метровагона на рівні $\eta_{ЕМБ}=0,95$.

На рис. 3 наведена силова схема перетворюваль- но-регульовочного блока (ПРБ) на базі трифазного

мостового інвертора напруги з силовими двоквadraнт- ними ключами знакозмінного струму на основі мо- дулів IGBT і вузлів однорідної комутації, забезпечу- ючих "м'яку" комутацію ключів.

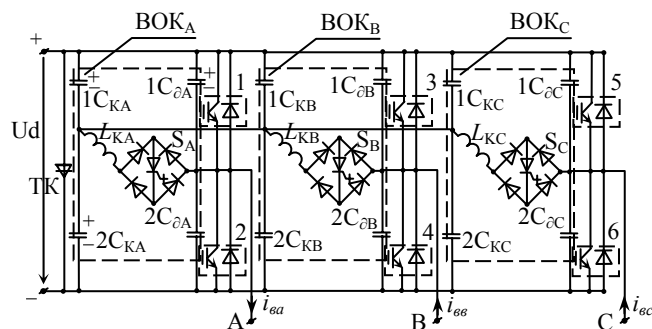


Рис. 3. Силова схема перетворювально-регульовочного блока (ПРБ) метровагона: 1–6 – двоквadraнтні ключі знакозмінного струму; ВОК_A, ВОК_B, ВОК_C – вузли однорідної комутації (L_k – комутуючий дросель; $1C_k, 2C_k$ – комутуючі конденсатори; $1C_{\delta}, 2C_{\delta}$ – снаберні конденсатори; S – чотириквadraнтний ключ); ТК – тиристорний короткозамикач для захисту ключів 1–6 від струмів короткого замикання і перенапруги з боку джерела живлення Ud

Регулювання вихідної напруги по величині і час- тоті виконується в схемі рис.3 класичним способом з використанням двополярної синусоїдальної широтно- імпульсної модуляції (ШІМ) шляхом перемикань си- лових ключів 1–6 комутатора інвертора напруги. Од- нак, на відміну від традиційної "жорсткої" комутації (комутації при напрузі) транзисторів ключів 1–6 в безснаберних схемах або схемах із снаберами фіксації напруги, комутація їх в схемі рис. 3 при ввімкненні і вимиканні на періоді ШІМ забезпечується вузлами однорідної комутації (ВОК_A, ВОК_B, ВОК_C) "м'якою", тобто при нульовій напрузі на них.

Комутація двоквadraнтних ключів знакозмінного струму при напрузі на них ("жорстка" комутація) при- водить до значних додаткових комутаційних втрат потужності всіх лінійних керованих венилях, які при напрузі більш за 1500 В на частотах ШІМ 2÷3 кГц стають вже неприйнятними з точки зору тепловиде- лень в модулях [5, 13].

Нульова напруга при ввімкненні транзисторів за- безпечується за рахунок попереднього (перед самим моментом їх ввімкнення) розряду їх снаберних кон- денсаторів C_{δ} у вузлах однорідної комутації збитко- вим струмом $\Delta i = i_k - i_g$ (де i_k – струм комутуючого дроселя L_k на момент вимикання противофазного ключа; i_g – поточне значення фазного струму), який формується ВОК при ввімкненні чотириквadraнтного ключа S. Розряджений снаберний конденсатор C_{δ} за- безпечує нульову напругу і при вимиканні цього тран- зистора. При вимиканні транзисторів снаберні кон- денсатори C_{δ} накопичують енергію, яка перед сліду- ючим ввімкненням транзистора передається джерелу живлення. Отже, наявність снаберних конденсаторів у схемі рис. 3 практично не приводить до додаткових втрат потужності, як це мало би місце при викорис- танні класичних РСД – снаберів [5].

Ввімкнення і вимкнення транзисторів ключів при нульовій напрузі на них і забезпечує практично нульові комутаційні втрати потужності в ключах схеми рис. 3. Це і дозволяє збільшити струмове навантаження модулів IGBT у порівнянні з їх використанням в схемах з "жорсткою" комутацією.

Крім цього позитивного чинника, при використанні "м'якої" комутації в схемі рис. 3 вирішується і задача обмеження крутизни фронтів імпульсів вихідної напруги інвертора з ШІМ, що забезпечує комфортний режим для ізоляції з'єднувальних кабелів і статорних обмоток асинхронних тягових двигунів. Якщо ж цю задачу вирішити у безнаберних схемах інверторів з ШІМ, то це потребує установки на виході інвертора додаткових RLC-фільтрів [12].

Щодо комутаційного інтервалу вузла однорідної комутації t_k і степені його впливу на діапазон регулювання при ШІМ, установлену потужність елементів ВОК і втрати потужності в них, то тут треба відмітити наступне.

При частотах ШІМ порядку $2 \div 3$ кГц тривалість комутаційного інтервалу вибирають із умови

$$t_k \leq 0,1T_M, \quad (2)$$

де $T_M = 1/f_M$ – період частоти модуляції.

При виконанні умови (2) зниження діапазону регулювання буде в межах 10% у порівнянні з діапазоном регулювання на цих же частотах у схемі трифазного інвертора з "жорсткою" комутацією ключів. Установлена потужність і втрати потужності в елементах вузлів однорідної комутації (L_k, C_k, C_ϕ, S) із-за малих величин діючих і середніх значень струму i_k та часу t_k будуть незначними у порівнянні з установленою потужністю і втратами потужності у основному комутаторі інвертора.

Результатами розрахунку втрат потужності у перетворювально-регулювальному блоці на базі IGBT-модулів SM600HC-66H (по два в паралель) тягової асинхронної електропередачі (рис. 3) метровагона потужністю $P_H = 1000$ кВт, напрузі живлення $U_{TM}=1500$ В, вихідної частоти $f=100$ Гц, частоти ШІМ $f_M = 3$ кГц, тривалості фронтів $t_{\phi}=5$ мкс, тривалості комутаційного інтервалу на періоді ШІМ $t_k = 33$ мкс та навантаженні з $\cos\phi = 0,8$ наведені у таблиці.

Таблиця

Втрати потужності комутатора (12 модулів)	Втрати потужності у модулі	Втрати потужності в ключі	Втрати потужності в 3-х ВОК	Втрати потужності у ВОК	Сумарні втрати потужності в ПРБ
ΔP_k (Вт)	ΔP_M (Вт)	$\Delta P_{кл}$ (Вт)	$\Delta P_{\Sigma ВОК}$ (Вт)	$\Delta P_{ВОК}$ (Вт)	$\Delta P_{ПРБ}$ (Вт)
7556	613	1226	1418	472	8024

Таким чином, коефіцієнт корисної дії перетворювально-регулювально-регулювального блоку на базі трифазного мостового інвертора напруги з "м'якою" комутацією силових ключів на основі паралельного з'єднання двох IGBT-модулів типу SM800HC-66H фірми Mit-

subishi для тягової асинхронної електропередачі метровагона потужністю 1000 кВт складає 0,991.

Силовая схема блока електромагнітної сумісності (БЕМС) з гібридним фільтром для тягової асинхронної електропередачі метровагона наведена на рис. 4.

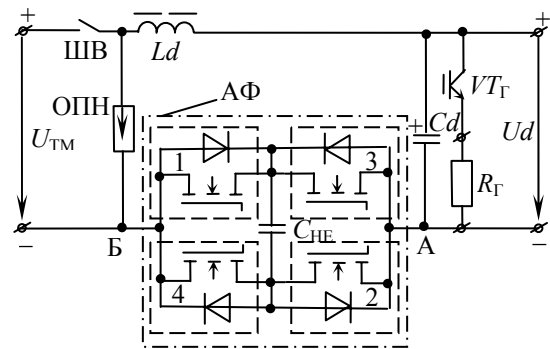


Рис. 4. Силовая схема блока електромагнітної сумісності (БЕМС) метровагона: ШВ – швидкодіючий вимикач; ОПН – обмежувач перенапруг на вході; $LdCd$ – пасивний LC-фільтр; АФ – активний фільтр (1÷4 – двоквADRANTні ключі знакозмінного струму на польових транзисторах, C_{HE} – накопичувач енергії); VT_G, R_G – реостатний гальм

Перш за все треба відмітити, що для нормальної роботи інвертора напруги перетворювально-регулювального блоку необхідно відділити його від тягової мережі з мінливою індуктивністю і надати джерелу живлення інвертора характер джерела напруги безконечної потужності [14]. Цю головну функцію і виконує БЕМС, а саме, його LC-фільтр, емність якого надає характер джерела напруги тягової мережі, а індуктивність нівелює мінливий характер індуктивності тягової мережі.

Іншими функціями БЕМС, не менш важливими з точки зору забезпечення роботи тягової електропередачі є:

- обмеження перенапруг на його вході і виході при мережевих комутаціях перенапруг [4,15];
- демпфування коливальних процесів в LC-фільтрі при первинному заряді фільтрового конденсатора і при повторних торканнях струмоприймачем контактного рельсу при відривах [10];
- забезпечення режиму електричного гальмування метровагона при зниженні напруги на його струмоприймачах [1];
- обмеження на допустимому рівні пульсацій тягового струму з метою запобігання негативного впливу на системи автоматики і зв'язку [1,14].

Виконання БЕМС в повній мірі останньої функції в межах традиційного підходу щодо її вирішення, тобто при використанні чисто пасивного LC-фільтра, обумовлює значні масо-габаритні показники блоку [1]. Використання ж гібридного фільтра не тільки дає можливість суттєвого покращення масо-габаритних показників БЕМС, але й значно збільшити степiнь придушення амплітуд гармонік тягового струму [15,16]. Негативними чинниками гібридних фільтрів є ускладнення силової схеми та збільшення втрат потужності у БЕМС в порівнянні з чисто пасивним фільтром, а також достатньо складний алгоритм керу-

вання їх активною ланкою. Як показано в роботі [17], основною проблемою керування активними фільтрами при широкому частотному спектрі придушених гармонік є одночасна наявність трьох видів завод, дві з яких діють на нижній і верхній границях робочого діапазону частот, а третя створюється пасивною ланкою гібридного фільтра.

Щодо втрат потужності, то як показують розрахунки це не є суттєвим негативним чинником. В обох випадках при потужності метровагона 1000 Вт реалізується коефіцієнт корисної дії БЕМС не нижчий за 0,98.

ВИСНОВКИ

В напрямку покращення технічних показників метропоїздів перехід на тягові асинхронні електропередачі метровагонів не має на сьогодні альтернативи. При цьому на одне із перших місць виходить проблема створення потужної тягової асинхронної електропередачі метровагона, яка дозволить реалізувати ефективну змішану систему тяги метропоїздів і наблизити показники технічної досконалості метропоїздів K_V , K_{pek} , η_M , K_M та клас експлуатаційної надійності до ідеальних, тобто до $K_{Vi} = 0,766$, $K_{peki} = 1$; $\eta_{Mi} = 1$; $K_{Mi} = 40\%$ та абсолютного класу експлуатаційної надійності. Вирішенню цієї проблеми і дозволить знизити витрати енергетичних, матеріальних та трудових ресурсів в процесі експлуатації метропоїздів.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Гаврилов Я.И., Мнацаканов В.А. Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями. – М.: Транспорт, 1986. – 229с.
- [2] Сементовский Э.И., Севастьянов Н.С., Иткинсон В.А. Техническое обслуживание и ремонт подвижного состава метрополитенов. – М.: Транспорт, 1987. – 335с.
- [3] Ротанов Н.А., Захарченко Д.Д., Плакс А.В. и др. Проектирование систем управления электроподвижным составом. – М.: Транспорт, 1986. – 327 с.
- [4] Ротанов Н.А., Кубасов А.С., Быков Ю.Г., Литовченко В.В. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями. – М.: Транспорт, 1991. – 336 с.
- [5] Oi Y., Kato S., Kato T., Yajima A., Ujiie A., Takahara E. IEGT Power Converters for the Shinkansen Traction Systems. // Т. IEE Japan, vol. 121 – D, №3, 2001. – p. 356 – 362.
- [6] Хворост М.В., Гончаров Ю.П., Панасенко М.В. та інші. Тяговий електропривод метровагонів з однозонною характеристикою керування. // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, №4, 2003. – с. 25–30.
- [7] Мияшита Т. Технологии НИТАСНИ для железных дорог. // Тез. докл. IV Международной научно-техн. конференции "Состояние и перспективы развития железнодорожного состава" Новочеркасск: ОАО "ВЭЛНИИ", 2003. – с. 16–20.
- [8] 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, №6, 2003. – с. 25–31.
- [9] Хворост М.В., Гончаров Ю.П., Панасенко М.В. та інші. Види комутації та енергетичні характеристики в електричних колах з ключовими елементами. / Електротехніка і Електромеханіка, №4, 2005. с. 67–72.
- [10] Хворост Н.В., Никулин В.С., Капустян М.А. Построение входного фильтра блока электромагнитной совмес-

тимости тяговой асинхронной электропередачи метровагона. // Збірник наукових праць УкрДАЗТ, вип. 69, Харків 2005. – с. 115–124.

- [11] Хворост Н.В., Гончаров Ю.П., Панасенко Н.В. и др. Влияние формы характеристики управления тяговыми асинхронными двигателями метровагонов на равномерность токораспределения при питании от общего инвертора. // Вісник СХУ ім. В. Даля, №8(90), част. 2, Луганськ, 2005. – с. 73–78.
- [12] Rendusara D., Engeti P. An improved output filter configuration reduces common and differential modes du/dt at the motor terminals in PWM drive systems. / IEEE Trans. on Power Electronics, V. 13, 1998, №6. – p. 1135–1143.
- [13] Сусллова К. Н., Лещев А. И. Обоснование варианта схемы автономного инвертора напряжения на модулях IGBT электровозов переменного тока с асинхронными тяговыми двигателями. // Вестник ОАО "ВЭЛНИИ", 1(50), Новочеркасск, 2006. – с. 148 – 159.
- [14] Хворост Н.В., Чумак В.А. Режимы работы силового фильтра тяговой электропередачи с полупроводниковыми преобразователями магистрального электроподвижного состава постоянного тока. / Електротехніка і Електромеханіка, №1, 2004. – с. 87–92.
- [15] Резенфельд В.Е., Шевченко В.В., Майбога В.А., Долаберидзе Г.П. Тиристорное управление электрическим подвижным составом постоянного тока. – М.: Транспорт, 1970. – 240с.
- [16] Сорин Л.Н. Повышение эффективности электровозов новых поколений на основе применения современных информационных технологий. / Автореферат дисс. на соискат. уч. ст. докт. техн. наук, М.: МИИТ, 2005. – 38 с.

Надійшла 13.03.2006