

УДК 629.423.31:621.311.44

МУХА А. М., к.т.н. (ДНУЗТ)

Енергетична ефективність перетворювача підвищеної частоти багатосистемного електровозу при живленні від контактної мережі змінного струму

Представив д.т.н., професор Разгонов О. П.

Вступ

Постійне зростання вартості енергоресурсів вимагає впровадження енергозберігаючих технологій на залізницях. Для підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) енергосистеми електрифікованих залізниць доцільно використовувати новий, більш економічний електрорухомий склад. Також з метою підвищення ККД тягової мережі, особливо при постійному струмі, доцільно підвищити рівень напруги контактної мережі [1,2]. Для забезпечення перевезення вантажів на електрифікованих ділянках при напругах змінного та постійного струмів (у тому числі в умовах підвищеної напруги) з мінімальними втратами часу доцільне використання багатосистемних електровозів [3].

В попередніх роботах [4,5,6] автор довів доцільність використання на багатосистемних електровозах статичних перетворювачів з ланкою підвищеної частоти. Використання підвищеної частоти, при перетворенні електричної енергії, дозволить зменшити втрати енергії та мінімізувати масогабаритні показники електрообладнання електровозів.

Створення та впровадження нової техніки повинно мати обґрунтовану доцільність, яку можна визначити як збільшення ККД нової техніки по відношенню до існуючої.

Основою сучасних електровозів є статичний тяговий перетворювач. Автором запропонована структура уніфікованого перетворювача на базі трансформаторів підвищеної частоти, яка забезпечує можливість роботи багатосистемного електровозу при різних параметрах контактної мережі та різних видах тягових двигунів [7]. Перетворювач включає в себе декілька функціональних вузлів перетворення енергії, що вимагає максимального збільшення ККД кожного з них для забезпечення високого ККД перетворювача у цілому.

Мета роботи

Провести дослідження з визначення коефіцієнту корисної дії перетворювача підвищеної частоти багатосистемного електровозу при живленні від контактної мережі змінного струму.

Матеріал і результати дослідження

В якості базового приймаємо уніфікований перетворювач типу 4А-М1-3Ф-4м3а (рис.1) [8]. Для визначення ККД перетворювача розглянемо один силовий модуль при поєднанні мережових випрямлячів за схемою 3а, що відповідає режиму живлення перетворювача від контактної мережі змінного струму – режим «25 кВ 50 Гц». Схема для розрахунку ККД перетворювача, призначеного для живлення асинхронного тягового АТД, представлена на рис. 2.

На рис.1 прийняті наступні скорочення та назви функціональних частин:

МВ – випрямляч мережового контуру, який призначено для перетворення енергії змінного струму у напругу постійного струму на фільтрі-накопичувачі ФН. Надалі цю напругу за допомогою інвертора мережового контуру МІ перетворюють у змінну напругу підвищеної частоти та подають на первинну обмотку трифазного трансформатора підвищеної частоти ТТПЧ.

Трифазну напругу з виходу ТТПЧ випрямляють за допомогою випрямляча тягового контуру ТВ, а далі інвертор тягового контуру ТІ передає її до асинхронного тягового двигуна з необхідними параметрами.

Для реалізації високого значення коефіцієнту потужності перетворювача, при живленні від контактної мережі змінного струму, вхідний випрямляч пропонується виконати керованим за однофазною мостовою схемою.

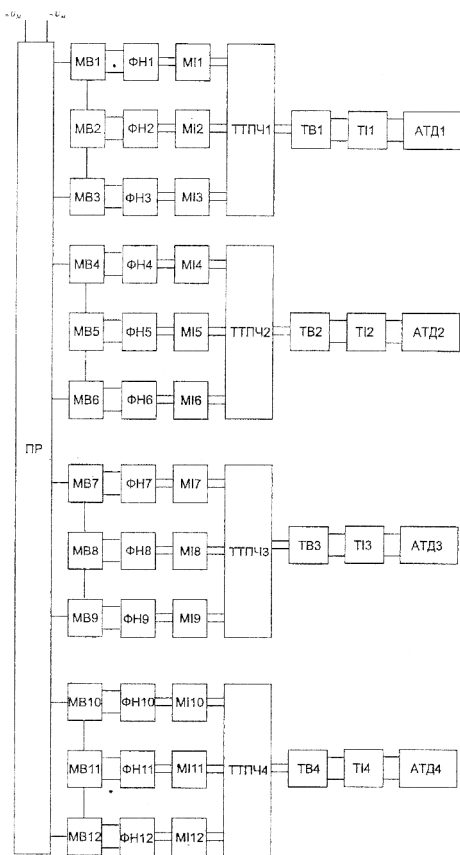


Рисунок 1 – Структура уніфікованого перетворювача для живлення чотирьох АТД на базі трифазних трансформаторів підвищеної частоти

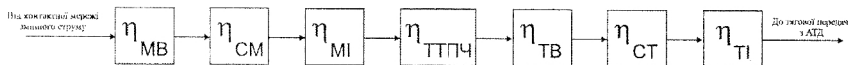


Рисунок 2 – Схема для розрахунку ККД перетворювача при живленні АТД

При побудові мережевого випрямляча за мостовою однофазною схемою на базі чотирьох тиристорних високовольтних ключів одночасно працює два ключових прилади [11], сумарні втрати потужності будуть дорівнювати:

$$\Sigma \Delta p_{VS} = 2 \cdot 0,375 \% = 0,75 \% . \quad (2)$$

Тоді ККД мережевого випрямляча на базі тиристорних ключів буде дорівнювати:

$$\eta_{MB\ VS} = 1 - 0,0075 = 0,9925 . \quad (3)$$

Іншим варіантом є побудова мережевого випрямляча на транзисторних ключах.

Транзисторний високовольтний ключ на середній струм 900 А та робочу постійну напругу 2250 В при частоті ШІМ 1000 Гц має сумарні втрати енергії 9832 Вт [10]. У відсотках, по відношенню до потужності, що комутує ключ, ці втрати складатиме:

$$\Delta p_{VT} = \frac{9832}{900 \cdot 2250} \cdot 100 \% \approx 0,485 \% . \quad (4)$$

При побудові мережевого випрямляча на базі транзисторних високовольтних ключів сумарні втрати потужності складають:

$$\Sigma \Delta p_{VT} = 2 \cdot 0,485 \% = 0,97 \% . \quad (5)$$

Тоді ККД мережевого випрямляча на базі транзисторних ключів складатиме:

$$\eta_{MB\ VT} = 1 - 0,0097 = 0,9903 . \quad (6)$$

Ще одним варіантом є побудова мережевого випрямляча на так званих гібридних ключах, які поєднують в собі тиристор, транзистор та зворотній діод. Гібридні ключі дозволяють реалізувати переваги IGBT транзисторів у режимі вимикання та переваги HD-GTO, GCT у режимах прямої провідності та ввімкнення приладів [10]. Позначення та структура гібридного ключа представлено на рис. 3 [9, 10].

Гібридний високовольтний ключ на середній струм 1200 А та робочу постійну напругу 2250 В при частоті ШІМ 1000 Гц має сумарні втрати енергії 6746 Вт [10]. У відсотках, по відношенню до потужності, що комутує ключ, ці втрати складатиме:

$$\Delta p_{VK} = \frac{6746}{1200 \cdot 2250} \cdot 100 \% \approx 0,25 \% . \quad (7)$$

При побудові мережевого випрямляча на базі чотирьох гібридних високовольтних ключів сумарні втрати потужності дорівнюють:

$$\Sigma \Delta p_{VK} = 2 \cdot 0,25 \% = 0,5 \% . \quad (8)$$

Тоді ККД мережевого випрямляча на базі гібридних ключів буде дорівнювати:

$$\eta_{мв\text{ }VK} = 1 - 0,005 = 0,995 . \quad (9)$$

Після порівняння отриманих значень ККД за виразами (3), (6) та (9) стає зрозумілим, що для збільшення енергоефективності перетворювача у його складі доцільним буде використання гібридних ключів, які характеризуються мінімальним рівнем втрат потужності.

Особливо це актуально для запропонованого автономного перетворювача підвищеної частоти, оскільки всі його складні частини мають відносно значні робочі частоти.

Виходячи з цього, визначимо ККД інших складових частин перетворювача підвищеної частоти для тягового приводу багатосистемного електровозу, побудованого на базі напівпровідникових ключів.

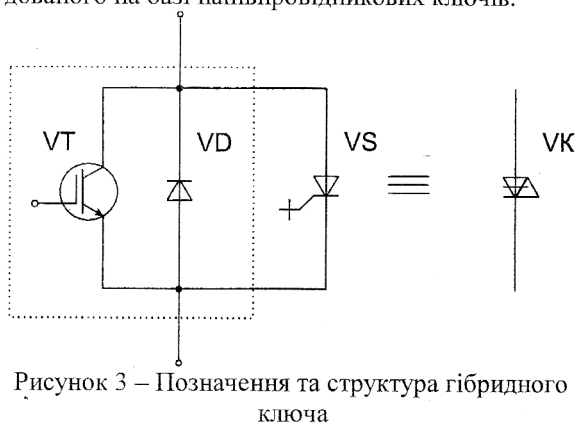


Рисунок 3 – Позначення та структура гібридного ключа

Для зменшення кількості напівпровідникових приладів, що забезпечить більш високий ККД, доцільно побудувати інвертор мережевого контуру перетворювача за напівмостовою схемою [13]. В одному напівперіоді роботи інвертора приймає участь один силовий ключ [11]. Тоді ККД мережевого інвертора, побудованого на гібридних ключах, складатиме:

$$\eta_{мі\text{ }VK} = 1 - 0,0025 = 0,9975 . \quad (10)$$

Випрямляч ТВ тягового контуру (рис.1) для забезпечення режиму рекуперації електровозу повинен мати дуальні властивості, тобто у режимі тяги він працює як випрямляч струму, а у режимі рекуперації як інвертор напруги. Варіант дуальної структури з такими властивостями представлено у роботі [9]. Принципова схема випрямляча тягового контуру перетворювача підвищеної частоти на базі IGBT транзисторів подана на рис. 4.

У режимі тяги схема (рис. 3) працює як мостовий трифазний випрямляч на базі напівпровідникових діодів VD1...VD6, а у режимі рекуперації працює інвертор напруги на базі IGBT транзисторів VT1...VT6. Напрямок струмів для режиму тяги має індекс «тяги», а режиму рекуперації – «рекуп».

Приймаючи у першому наближенні втрати у гібридному ключі при знакозмінних напругах (режим тяги або рекуперації) однаковими, одержимо значення ККД випрямляча тягового контуру, побудованого на гібридних ключах. При цьому враховуємо, що у мостовій трифазній схемі одночасно працює три ключових елемента [11].

ККД випрямляча тягового контуру дорівнює:

$$\eta_{тв\text{ }VK} = 1 - 3 \cdot 0,0025 = 0,9925 . \quad (11)$$

В якості інвертора тягового контуру (рис. 1) пропонується використати трифазний мостовий інвертор напруги з ШІМ модуляцією [14]. До виходу цього інвертора підключається трифазний асинхронний тяговий двигун.

Тоді ККД тягового інвертора на базі гібридних ключів дорівнює:

$$\eta_{дв\text{ }VK} = 1 - 3 \cdot 0,0025 = 0,9925 . \quad (12)$$

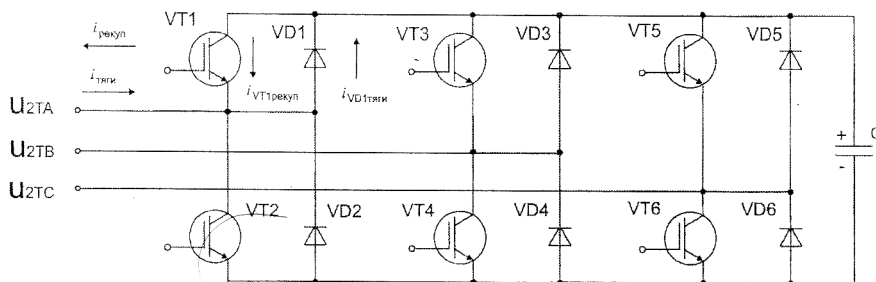


Рисунок 4 – Принципова схема випрямляча тягового контуру.

Попередні дослідження автора [15] дозволили визначити значення втрат неробочого ходу трансформатора підвищеної частоти з ряду потужностей: 1000, 16000, 2500, 4000 та 6300 кВА. При $\cos \varphi \approx 0,99$ втрати неробочого ходу цих трансформаторів складають відповідно: 602, 887, 1283, 1890 та 2750 Вт. Використовуючи ці значення втрат неробочого ходу, знаходимо:

$$\eta_{\text{ТПЧ}} = \frac{P - \Sigma p}{P}, \quad (13)$$

де сумарні втрати потужності у трансформаторі визначаються як $\Sigma p = P_{\Sigma} + P_0 = (2,5 \dots 4) P_0 + P_0 = (3,5 \dots 5) P_0$ [16].

ККД трифазного трансформатора підвищеної частоти при співвідношеннях втрат неробочого ходу P_0 та короткого замикання P_{Σ} : 2,5; 3,0; 2,5; 4,0 для трансформатора потужністю 1600 кВА (при живленні тягового двигуна потужністю 1200 кВт) дорівнює: $\eta_{\text{дв}} = 0,9981; 0,9978; 0,9975; 0,9972$.

ККД конденсаторів, які використовується у запропонованому випрямлячі, приймаємо у першому наближенні на рівні 0,995.

Результуюче значення ККД уніфікованого перетворювача, у відповідності до рис. 2, визначається як:

$$\eta_{\Sigma} \left(\frac{P_{\Sigma}}{P_0} \right) = \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{тн}} \cdot \eta_{\text{т}} \cdot \eta_{\text{дв}} + \left(\frac{P_{\Sigma}}{P_0} \right) \cdot \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{тн}} \cdot \eta_{\text{т}} \cdot \eta_{\text{дв}}. \quad (14)$$

Результуючі значення ККД уніфікованого перетворювача при використанні гібридного ключа у складі випрямлячів (МВ, ТВ) та інверторів (МІ, ТІ) мережевого та тягового контурів при різних співвідношеннях втрат $\frac{P_{\Sigma}}{P_0}$ у трифазному трансформаторі підвищеної частоти (ТПЧ) подано в табл. 1.

Таблиця 1 – Результуючі значення ККД уніфікованого перетворювача

P_{Σ}/P_0	2,5	3,0	3,5	4,0
$\eta_{\Sigma_ВК} (P_{\Sigma}/P_0)$	0,9613	0,961	0,9607	0,9604
Середнє $\eta_{\Sigma_ВК} (P_{\Sigma}/P_0)$	0,9608			

Графік залежності результуючого значення ККД перетворювача при гібридних ключах від співвідношення втрат $\frac{P_{\Sigma}}{P_0}$ подано на рис. 5.

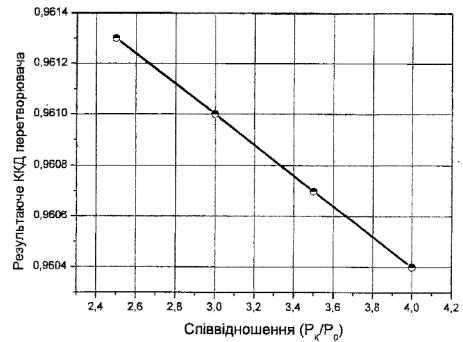


Рисунок 5 – Залежність $\eta_{\Sigma_ВК} \left(\frac{P_{\Sigma}}{P_0} \right)$ при гібридних ключах

Одержані високі значення результуючого ККД перетворювача (середнє – 0,9608 з табл. 1), що підтверджує доцільність використання запропонованої структури уніфікованого перетворювача для перспективних багатосистемних електровозів.

Для порівняння відмітимо, що однофазний тяговий перетворювач радянського виробництва ВУК-60-4л на базі діодів має ККД на рівні 0,98, а кількість напівпровідникових приладів при цьому дорівнює 200 одиниць, при робочій частоті 50 Гц. Тиристорний перетворювач ВУК-4000 на базі 192 тиристорів має ККД 0,99, а перетворювач ВІП-4000 на базі 88 тиристорів має ККД 0,985 [12]. Але ККД цих перетворювачів не враховує втрати у тяговому трансформаторі та дроселі, ККД яких складає приблизно $\eta_{\text{т}} = 4,5 \%$.

Відносно незначний виграш у ККД перетворювача на базі сучасних приладів при значно меншій їх кількості обумовлено, у першу чергу, високими комутаційними втратами у напівпровідникових приладах. При розрахунках втрат енергії робоча частота ключів дорівнювала 1000 Гц [10].

Висновки

Проведені дослідження визначили енергетичну ефективність уніфікованого перетворювача підвищеної частоти тягового приводу багатосистемного електровозу при використанні асинхронних тягових двигунів при живленні від контактної мережі змінного струму. Збільшення ККД, у порівнянні з існуючими перетворювачами, відбувається за рахунок використання трансформатора підвищеної частоти з підвищеним значенням ККД, у порівнянні з трансформаторами промислової частоти, та впровадження гібридних напівпровідникових ключів, які мають відносно низьке значення електричних втрат.

Література

1. Бадер М. П. Концептуальные решения по нетрадиционным системам тягового электроснабжения и электромагнитной совместимости // Материалы 2-ой Международной научно-практической конференции «Электрификация железнодорожного транспорта «Трансэлектро-2008»». – Д.: ДИИТ, 2008. – С. 26.
2. Котельников А.В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы. –М.: Интескт, 2002. – 104 с.
3. В.П. Феоктистов, В.В. Литовченко, О.Б. Баранцев. Нужны многосистемные электровозы // Локомотив. – 2002. – №1, – С.4-5.
4. Дубинець Л.В., Чілікін Г.М., Муха А.М. Структурна схема перспективного електровозу подвійного живлення. // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика.» – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007. – С.356-357.
5. Муха А. М. Порівняльний аналіз перетворювальних структур тягового приводу перспективних багатосистемних електровозів з тяговими двигунами постійного струму. // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 27. – С.93 – 98.
6. Муха А. М. Структурна надійність тягового перетворювача для багатосистемного електровоза з асинхронними тяговими двигунами. // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип. 28 – С. 40 – 47.
7. Муха А.М. Уніфікація як критерій порівняльної оцінки структурних схем тягового перетворювача для багатосистемного електровоза. / А.М. Муха // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. – Дн-вськ: Видавництво Дніпропетр. нац. ун-ту. залізн. трансп. ім. акад. В.Лазаряна. – 2009. – Вип. 29. – С. 66 – 70.
8. Муха А.М. Структурні схеми тягових перетворювачів для багатосистемних електровозів з асинхронним тяговим приводом / А.М. Муха // Збірник наукових праць “Гірнича електромеханіка та автоматика”, ДНГУ, Дніпропетровськ. – 2009. – Вип. 82. – С.13 – 21.
9. Козачок В. М. Силові двоквADRантні ключі для резервних тягових ШІМ-перетворювачів / В. М. Козачок, В. С. Нікулін, Н. М. Панасенко // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2009. – Вип. 108. – С.159-168.
10. Панасенко М. В. Енергозберігаючі сильно струмові високовольтні ключі і фазні модулі на їх основі / М. В. Панасенко, Н. М. Панасенко, В. Ю. Хворост // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. №5. – С.24-29.
11. Забродин Ю.С. Промышленная электроника / Ю.С. Забродин – М.: Высшая Школа, 1982. – 496 с.
12. Дубровский З. М. Грузовые электровозы переменного тока: Справочник. / В. И. Попов, Б. А. Тушканов – М.: Транспорт, 1991. – 471 с.
13. Steimel A.: Power-Electronics Issues of Modern Electric Railway Systems / Andreas Steimel // Advances in Electrical and Computer Engineering. – 2010. – Vol. 10, №2. – Pp.3-10.
14. Гончаров Ю. П. Статичні перетворювачі тягового рухомого складу. / Ю. П. Гончаров, М. В. панасенко, О. І. Семененко, М. В. Хворост. – Харків, НТУ «ХПІ», 2007. – 192 с.
15. Муха А.М. Втрати у магнітопроводі трифазного тягового трансформатора підвищеної частоти. / А.М. Муха // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. – 2010. – Вип. 35. – С. 66 – 70.
16. Пиотровский Л.М. Электрические машины / Л.М. Пиотровский / – Л.: Энергия, 1975. – 504 с.

Резюме

Представлены результаты определения коэффициента полезного действия унифицированного преобразователя многосистемного электровоза, при работе под контактной сетью переменного тока

Подані результати визначення коефіцієнта корисної дії уніфікованого перетворювача багатосистемного електровоза при роботі під контактною мережею змінного струму

We presented the results of efficiency determination for the unified converter of multisystem electrical locomotive when operating under alternating current contact network

Ключові слова: багатосистемний електровоз, контактна мережа, змінний струм, перетворювач

Поступила 31.01.2011 г.