

Література

1. Кэйс В.М. Компактные теплообменники [Текст]/ В.М. Кэйс, А.Л. Лондон. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 160 с.
2. Антуфьев В.М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева [Текст]/ В.М. Антуфьев. – М.: Энергия, 1966. – 184 с.
3. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление [Текст]: Справочное пособие/ С.С. Кутателадзе. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 368 с.
4. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках [Текст]/ А.А. Жукаускас. - М.: Наука, 1982. - 472 с.
5. Ala Ali Hasan. Thermal-hydraulic performance of oval tubes in a cross-flow of air [Текст]/Heat and Mass Transfer, accepted for publication. THP 2004 by author and THP 2004 Springer-Verlag. By permission. – P. 1-32.
6. Ota T. Forced Convection Heat Transfer from an Elliptic Cylinder of Axis Ratio 1:2 [Текст]/ T. Ota, S. Aiba, T. Tsuruta, M. Kaga // Bulletin of JSME. – 1983. – V. 26. – № 212. – P. 262-267.
7. Ota T. Heat transfer and flow around an elliptic cylinder [Текст]/ T. Ota, H. Nishiyama, Y. Taoka // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1984. – V. 27. – № 10. – P. 1771-1779.
8. Бурков В.К. Исследование теплообмена и аэродинамики пучков из овальных труб [Текст]/ В.К. Бурков, В.П. Медведский, И.Ю. Кочегарова, Ю.И. Лафа//Теплоэнергетика. – 2010. – №3. – С.42-45.
9. Тепловой расчет котельных агрегатов [Текст]: нормативный метод/под ред. Н.В. Кузнецова. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.
10. Жукова Ю.В. Аэродинамика и теплообмен плоскоовального цилиндра при вынужденной конвекции [Текст]/ Ю.В. Жукова, А.М. Терех, А.В. Семеняко. Труды V Российской Национальной конференции по теплообмену. – 25-29 октября. – г. Москва. – 2010. – Т.2. – С. 126-128.

УДК 629.423.31:621.311.44

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ПЕРЕТВОРЮВАЧА БАГАТОСИСТЕМНОГО ЕЛЕКТРОВОЗУ У РЕЖИМІ ЗМІННОГО СТРУМУ

А.М. Муха

Кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри
Кафедра «Автоматизований електропривод»
Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
вул. Ак. В. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010
Контактний тел.: (056) 373-15-47
E-mail: andremu@iu

Представлено результати визначення коефіцієнта корисної дії уніфікованого перетворювача багатосистемного електровозу, при роботі під контактною мережею змінного струму

Ключові слова: перетворювач, електровоз, структурна схема, втрати енергії

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

Ключевые слова: преобразователь, электровоз, структурная схема, потери энергии

The Presented results of the determination coefficient of efficiency unified converter of much system electric locomotive, when run under contact network of alternating current

Key words: converter, electric locomotive, structured scheme, loss to energy

Вступ

Постійне зростання вартості енергоресурсів вимагає впровадження енергозберігаючих технологій на залізницях. Для підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) енергосистеми електрифікованих залізниць доцільно використовувати новий, більш еко-

номічний 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 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].

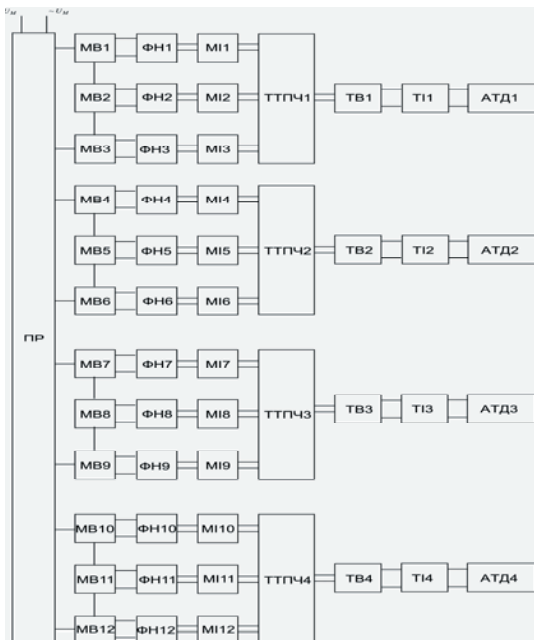


Рис. 1. Структура уніфікованого перетворювача для живлення чотирьох АТД на базі трифазних трансформаторів підвищеної частоти

Для визначення ККД перетворювача розглянемо один силовий модуль при поєднанні мережних випрямлячів за схемою За, 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 мережевого контуру, який призначено для перетворення енергії змінного струму у напругу постійного струму на фільтри-накопичувачі ФН. Надалі цю напругу, за допомогою інвертора мережевого 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.

В якості ключових елементів доцільно використати модулі на базі IGCT, GTO або IGBT приладів. Для отримання кривої струму близької до синусоїдальної, з мінімальним зсувом фази по відношенню до напруги, необхідне використання ШІМ модуляції.



Рис. 2. Схема для розрахунку ККД перетворювача при живленні АТД

На рис. 2 вказані ККД: $\eta_{МВ}$ - мережевого керованого випрямляча; $\eta_{СМ}$, $\eta_{СТ}$ - емнісних фільтрів мережевого та тягового контурів; $\eta_{МІ}$ - інвертора мережевого контуру; $\eta_{ТТПЧ}$ - трифазного трансформатора підвищеної частоти; $\eta_{ТВ}$, $\eta_{ТІ}$ - відповідно випрямляча та інвертора тягового контуру перетворювача.

Підвищення робочих частот ключових елементів призведе до зростання комутаційних втрат у ключах та відповідне зменшення ККД випрямляча у цілому. В роботах [9,10] розглянуті питання використання у складі ШІМ перетворювачів двоквADRантних сильнострумових високовольтних ключів саме з точки зору сумарних втрат енергії в них під час роботи (ввімкнення, режим провідності та вимкнення).

Тиристорний високовольтний ключ на середній струм 1400 А та робочу постійну напругу 2250 В при частоті ШІМ 1000 Гц, має сумарні втрати енергії 11824 Вт [10]. У відсотках, по відношенню до потужності, що комутує ключ, ці втрати складатиме:

$$\Delta p_{VS} = \frac{11824}{1400 \cdot 2250} \cdot 100 \% \approx 0,375 \% \tag{1}$$

При побудові мережевого випрямляча за мостовою однофазною схемою на базі чотирьох тиристорних високовольтних ключів, одночасно працює два ключі

чових прилади [11], сумарні втрати потужності будуть дорівнювати:

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

Тоді ККД мережевого випрямляча, на базі тиристорних ключів буде дорівнювати:

$$\Delta p_{MBVS} = 1 - 0,0075 = 0,9925 . \quad (3)$$

Другим 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:

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

Тоді ККД мережевого випрямляча, на базі транзисторних ключів складатиме:

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

Ще одним варіантом, є побудова мережевого випрямляча на так званих гібридних ключах, які поєднує 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 ввімкнені 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:

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

Тоді ККД мережевого випрямляча, на базі гібридних ключів буде дорівнювати:

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

Порівнявши отримані значення 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 автором перетворювача підвищеної частоти, оскільки всі його складі 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.

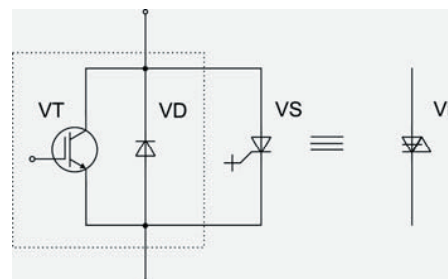


Рис. 3. Позначення та структура гібридного ключа

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:

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

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 с такими властивостями представлено у роботі [9]. Принципова схема випрямляча тягового контуру перетворювача підвищеної частоти, на базі IGBT транзисторів, представлена 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 «тяга», а режиму рекуперації – «рекуп».

Приймаючи, у першому наближенні, втрати у гібридному ключі при знакозмінних напругах (режим тяги або рекуперації) однаковими, отримуємо 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:

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

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:

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

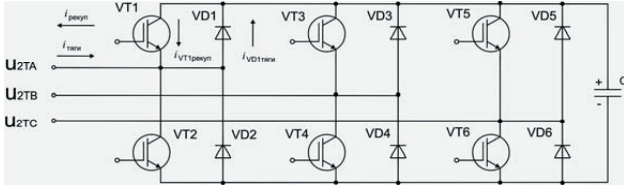


Рис. 4. Принципова схема випрямляча тягового контуру

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

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

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

ККД трифазного трансформатора підвищеної частоти при співвідношеннях втрат неробочого ходу P_0 та короткого замикання $P_k : 2,5; 3,0; 2,5; 4,0$ для трансформатора потужністю 1600 кВА (при живленні тягового двигуна потужністю 1200 кВт) дорівнює: $\eta_{\text{ТТПЧ}} = 0,9981; 0,9978; 0,9975; 0,997$.

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

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

$$\eta_{\Sigma} \left(\frac{P_k}{P_0} \right) = \eta_{\text{МВ}} \cdot \eta_{\text{СМ}} \cdot \eta_{\text{МІ}} \cdot \eta_{\text{ТТПЧ}} \left(\frac{P_k}{P_0} \right) \cdot \eta_{\text{ТВ}} \cdot \eta_{\text{СТ}} \cdot \eta_{\text{ТІ}} \quad (14)$$

Числові значення результуючого 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 $\frac{P_k}{P_0}$ у трифазному трансформаторі підвищеної частоти (ТТПЧ) представлено у табл. 1.

Таблиця 1

Значення результуючого значення ККД уніфікованого перетворювача

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

Графік залежності результуючого значення ККД перетворювача при гібридних ключах, від співвідношення втрат $\frac{P_k}{P_0}$ представлено на рис. 5.

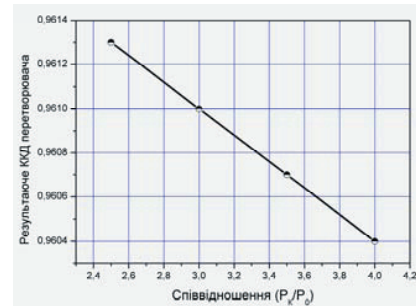


Рис. 5. Залежність $\eta_{\Sigma_ВК} \left(\frac{P_k}{P_0} \right)$ при гібридних ключах

Отримані значення результуючого ККД перетворювача мають високе значення (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, мають 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 ВИП-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 $\eta_{\text{ТТ}} = 4,5\%$.

Відносно незначний вигравш 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].

Загальні 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 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, №1, 2002. – С.4-5.
4. Дубиниць 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 заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Вип. 27. – Дн-вськ: ДНУЗТ. - 2009. - С.93 - 98.
6. Муха А. М. Структурна надійність тягового перетворювача для багатосистемного електровоза з асинхронними тяговими двигунами. // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Вип. 28 – Дн-вськ: ДНУЗТ. - 2009. - 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. заліз. 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 “Гірнична електромеханіка та автоматика”, ДНГУ, Дніпропетровськ, вип. 82, 2009. – 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, вип.. 108, 2009. – 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, Volume 10, Number 2, 2010. -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 «ХПИ», 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. – Дн-вськ: Видавництво Дніпропетр. нац. ун-ту. заліз. трансп. ім. акад. В.Лазаряна, 2010. - Вип. 35. - С. 66 – 70.
16. Пиотровский Л.М. Электрические машины / Л.М. Пиотровский / . – Л.: Энергия, 1975. – 504 с.