

УДК 629.423.1– 83

А. М. МУХА – д. т. н., доц., Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, andremu@i.ua

## ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ПРИ ЖИВЛЕННІ ВІД КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

*Статтю представив д. т. н., проф. Л. В. Дубинець*

### Вступ

У сучасних умовах постійного зростання вартості енергоресурсів постає задача розробки нового тягового електрорухомого складу з підвищеними енергетичними показниками. Цій темі присвячено ряд робіт провідних науковців та виробників [1 – 3]. Один зі шляхів підвищення енергоефективності системи тягового електропостачання постійного струму є підвищення напруги у контактній мережі постійного струму до рівня 6, 12 або 24 кВ, але це вимагає впровадження нового багатосистемного електрорухомого складу (ЕРС), зокрема електровозів [4 – 6].

В попередніх роботах [7 – 11] 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.

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 [8,11]. Перетворювач включає в себе декілька функціональних вузлів перетворення енергії, що вимагає максимального збільшення коефіцієнта корисної дії (ККД) кожного з них, для забезпечення високого ККД електровоза у цілому.

Як відомо, саме ККД використовується для оцінки енергоефективності нової техніки при порівнянні її з існуючими системами.

Мета роботи – провести дослідження з визначення коефіцієнту корисної дії перетворювача підвищеної частоти багатосистемного електровозу з асинхронними тяговими двигунами (АТД) при живленні від контактної мережі постійного струму.

### Матеріал і результати дослідження

Статичний перетворювач тягової електропередачі багатосистемного електровоза повинен забезпечувати виконання поїзної роботи на ділянках залізниці, електрифікованих як на змінному, так і постійному струмах. Представимо результати дослідження ККД тягового перетворювача багатосистемного електровоза при живленні від контактної мережі постійного струму напругою 3 кВ.

Для базового уніфікованого перетворювача типу 4А– М1– 3Ф– 4м3а схема розрахунку ККД перетворювача для живлення АТД представлена на рис. 1 [11].

На відміну від схеми, представленої в [8], у розрахунковій схемі відсутній  $\eta_{\text{МВ}}$ , що відповідає за визначення ККД керованого випрямляча (МВ) мережевого контуру. Це є доцільним саме з енергетичної точки зору, оскільки немає сенсу проводити повторне перетворення напруги постійного струму контактної мережі у напругу постійного струму на вході інвертора мережевого контуру.

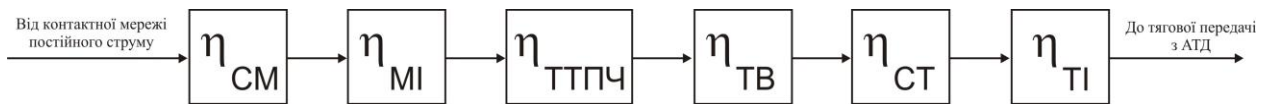


Рис. 1. Схема для розрахунку ККД перетворювача при живленні від мережі постійного струму

Інші елементи структурної схеми є аналогічними до тих, що мають місце у режимі живлення від мережі змінного струму.

Результуюче значення ККД уніфікованого перетворювача для асинхронного тягового привода при живленні від мережі постійного струму відповідно до рис. 1 у функції співвідношення втрат  $\frac{P_K}{P_0}$  у трифазному трансформаторі підвищеної частоти, визначається як:

$$\eta_{\Sigma_{п\_атд\_пс}} \left( \frac{P_K}{P_0} \right) = \eta_{CM} \cdot \eta_{MI} \cdot \eta_{ТТПЧ} \left( \frac{P_K}{P_0} \right) \cdot \eta_{ТВ} \cdot \eta_{СТ} \cdot \eta_{ТІ}, \quad (1)$$

де  $\eta_{CM}$  – ККД конденсаторного фільтра накопичувача мережевого контуру (по входу перетворювача);  $\eta_{MI}$  – ККД інвертора підвищеної частоти, на виході мережевого контуру;  $\eta_{ТТПЧ} \left( \frac{P_K}{P_0} \right)$  – ККД трансформатора трифазного підвищеної частоти;  $\eta_{ТВ}$  – ККД випрямляча на вході тягового контуру;  $\eta_{СТ}$  – ККД конденсаторного фільтра накопичувача тягового контуру;  $\eta_{ТІ}$  – ККД трифазного інвертора тягового на виході тягового контуру.

При побудові мережевого випрямляча за мостовою однофазною схемою на базі чотирьох тиристорних високовольтних ключів одночасно працює два ключових прилади [15], сумарні втрати потужності будуть дорівнювати:

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

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

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

Перспективним є використання так званих гібридних ключів.

Позначення та структура гібридного ключа представлені на рис. 2 [13, 14].

Використання гібридного ключа, у порівнянні з традиційними IGBT та тиристорами дозволить зменшити рівень втрат енергії у самих ключах, оскільки гібридні ключі дозволяють реалізувати переваги IGBT транзисторів у режимі вимикання та переваги HD-GTO, GCT у режимах прямої провідності та ввімкнення приладів [13].

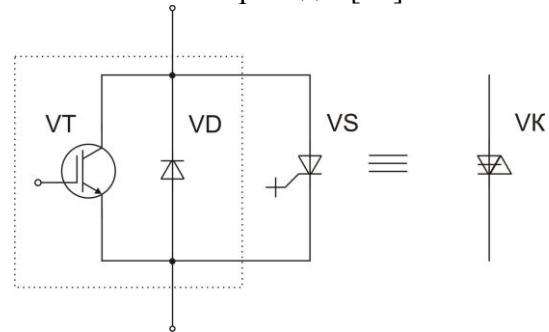


Рис. 2. Позначення та структура гібридного ключа

Гібридний високовольтний ключ на середній струм 1200 А та робочу постійну напругу 2250 В, при частоті широтно-імпульсній модуляції (ШІМ) 1000 Гц, має сумарні втрати енергії 6746 Вт [14]. У відсотках по відношенню до потужності, що комутує ключ, ці втрати становитимуть:

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

При побудові мережевого випрямляча на базі чотирьох гібридних високовольтних ключів сумарні втрати потужності дорівнюють:  $\Sigma \Delta p_{VK} = 2 \cdot 0,25 \% = 0,5 \% .$

Порівнявши значення втрат потужності у різних ключах, побачимо, що мінімальні втрати потужності (0,5 %) має місце при використанні гібридних ключів.

Прийнявши за розрахункову ККД схему представлену на рис. 1 отримано значення коефіцієнта корисної дії тягового перетворювача у цілому.

Числові значення результуючого значення ККД уніфікованого перетворювача при використанні так званого гібридного ключа (VK, рис.2) у складі випрямляча ТВ та інверторів МІ, ПІ мережевого та тягового контурів при різних співвідношеннях втрат  $P_K/P_0$  у трифазному трансформаторі підвищеної частоти, при живленні від мережі постійного струму, представлено у табл. 1.

При використанні уніфікованого перетворювача на базі гібридного ключа сумарний ККД тягового приводу багатосистемного електровоза при живленні від контактної мережі постійного струму напругою 3 кВ та асинхронних тягових двигунів буде дорівнювати:

$$\eta_{\Sigma \text{п атд ппч пс}} \left( \frac{P_K}{P_0} \right) = \eta_{\Sigma \text{п VK атд пс}} \cdot \eta_{\text{тзп}} \cdot \eta_{\text{атд}}, \quad (2)$$

де:  $\eta_{\Sigma \text{п VK атд пс}}$  - ККД уніфікованого перетворювача на базі гібридних ключів VK у

режимі живлення від мережі постійного струму;

$\eta_{\text{тзп}}$  - ККД тягової зубчастої передачі;

$\eta_{\text{атд}}$  - ККД асинхронного тягового двигуна.

При  $\eta_{\Sigma \text{п VK атд пс}} = 0,9705$  (табл. 1) та значеннями з виразу (2) отримуємо:

$$\eta_{\Sigma \text{п атд ппч пс}} = 0,9705 \cdot 0,975 \cdot 0,91 \approx 0,86.$$

Сучасний російський двосистемний електровоз струму 2ЭП20, на базі асинхронних тягових двигунів, у режимі живлення від мережі постійного струму має розрахункове значення ККД 87,5% [12].

Отримане значення ККД тягової електропередачі багатосистемного електровоза в режимі живлення від контактної мережі постійного струму, на базі перетворювача підвищеної частоти, менше цього значення.

При використанні тягового редуктора та АТД аналогічних до тих, що використовуються на електровозах європейського виробництва, рівень ККД тягової електропередачі багатосистемних електровозів із перетворювачами підвищеної частоти у режимі живлення від контактної мережі постійного струму напругою 3 кВ, буде дорівнювати:

Таблиця 1

Значення результуючого значення ККД перетворювача для АТД при живленні від мережі постійного струму

$P_K/P_0$	2,5	3,0	3,5	4,0
$\eta_{\Sigma \text{п VK атд пс}} \left( \frac{P_K}{P_0} \right)$	0,9709	0,9707	0,9704	0,9701
Середнє $\eta_{\Sigma \text{п VK атд пс}} \left( \frac{P_K}{P_0} \right)$	0,9705			

$$\eta_{\Sigma \text{п атд ппч пс им}} = \eta_{\Sigma \text{п VK атд пс}} \cdot \eta_{\text{тзп}} \cdot \eta_{\text{атд}}, \quad (3)$$

$$\eta_{\Sigma \text{п атд ппч пс им}} = 0,9705 \cdot 0,985 \cdot 0,968 \approx 0,922$$

Додатковий вииграш у ККД тягової електропередачі багатосистемного електровоза з АТД та перетворювачем підвищеної частоти, при використанні редуктора й АТД з

більшими ККД, у режимі живлення від контактної мережі постійного струму напругою 3 кВ, становитиме  $92,2 - 86,0 = 6,2\%$ .

Тобто, багатосистемний електровоз у режимі живлення від контактної мережі постійного струму з перетворювачем підвищеної частоти, призначеним для живлення АТД, має ККД не гірший, ніж у сучасного електровоза на базі асинхронних тягових двигунів.

### Висновки

Проведені дослідження визначили енергетичну ефективність уніфікованого перетворювача підвищеної частоти тягової електропередачі багатосистемного електровозу з асинхронними тяговими двигунами при живленні від контактної мережі постійного струму. Реалізація відносно високого значення 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.

### Бібліографічний список

1. Мукминова, Т. А. Прогрес залізничного транспорту визначається характеристиками тягового рухомого складу [Текст] / Т. А. Мукминова // Залізничний транспорт України. – 2004. – №5. – С. 31–34.
2. Мазнев, А. С. Повышение эффективности электроподвижного состава [Текст] / А. С. Мазнев, А. М. Евстафьев // Железнодорожный транспорт. – 2010. – №9. – С.33–36.
3. Ганович, В. Перспективы обновления подвижного состава Российских железных дорог [Текст] / Ганович В. // Транспорт Российской Федерации, №2, 2006. – С.43–45.
4. Бадер, М. П. Концептуальные решения по нетрадиционным системам тягового электроснабжения и электромагнитной совместимости [Текст] / М. П. Бадер // Электрификация железнодорожного транспорта «Трансэлектро–2008»: междунар. науч.–практ. конф., 30 сент.–04 окт. 2008 г.: тезисы докл. – Д.: ДНУЖТ, 2008. – С. 26.
5. Котельников, А. В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы [Текст] / А. В. Котельников – М.: Интескт, 2002. – 104 с.
6. Феоктистов, В. П. Нужны многосистемные электровозы [Текст] / В. П. Феоктистов, В. В. Литовченко, О. Б. Баранцев // Локомотив. – 2002. – №1. – С.4–5.
7. Дубинець, Л. В. Структурна схема перспективного електровозу подвійного живлення [Текст] / Л. В. Дубинець, Г. М. 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. Порівняльний аналіз перетворювальних структур тягового приводу перспективних багатосистемних електровозів з тяговими двигунами постійного струму [Текст] / А. М. Муха // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2009. – №27. – С.93–98.
9. Муха, А. М. Структурна надійність тягового перетворювача для багатосистемного електровоза з асинхронними тя-

- говими двигунами. [Текст] / А. М. Муха // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2009. – №28. – С. 40 – 47.
10. Муха, А. М. Уніфікація як критерій порівняльної оцінки структурних схем тягового перетворювача для багатосистемного електровоза [Текст] / А. М. Муха // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2009. – №29. – С. 66 – 70.
11. Муха, А.М. Структурні схеми тягових перетворювачів для багатосистемних електровозів з асинхронним тяговим приводом [Текст] / А.М. Муха // Збірник наукових праць «Гірничя електромеханіка та автоматика», ДНГУ, Дніпропетровськ, вип. 82, 2009. – С.13 – 21.
12. Усвицкий, С. А. Электровоз ЭП20 – базовая платформа электровозов нового поколения [Электронный ресурс] / С. А. Усвицкий // Техника железных дорог – 2009. – №2(6). – С. 81– 86. – Режим доступа: <http://www.ipem.ru>.
13. Козачок, В. М. Силові двоквADRантні ключі для резервних тягових ШІМ-перетворювачів [Текст] / В. М. Козачок, В. С. Нікулін, Н. М. Панасенко // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2009. – №108. – С.159-168.
14. Семененко, О. І. Імпульсний тяговий перетворювач на IGBT [Текст] / О. І. Семененко, В. С. Ковальов // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2010. – №114. – С.88-93.
15. Забродин, Ю.С. Промышленная электроника [Текст] / Ю. С. Забродин – М.: Высшая Школа, 1982. – 496 с.

**Ключові слова:** перетворювач, багатосистемний електровоз, енергетична ефективність.

**Ключевые слова:** преобразователь, многосистемный электровоз, энергетическая эффективность.

**Keywords:** converter, multisystem electric locomotive, energy efficiency.

Надійшла до редколегії 06.09.2012