

УДК: 622.625.28-83

О.В. ОМЕЛЬЧЕНКО, О.О. УДОВЕНКО, кандидати техн. наук, доц.,  
Р.В. СІЯНКО, магістрант, Криворізький національний університет

## ДО ПИТАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ДВОФАЗНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ В ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ ШАХТНИХ КОНТАКТНИХ ЕЛЕКТРОВІЗІВ

У статті викладені результати досліджень в напрямку пошуку і створення сучасного за структурою та енергоефективного за видом тягового електроприводу для рудникових контактних електровозів. Приведена порівняльна оцінка варіантів можливих структур тягових асинхронних приводів, відмінність яких в основному полягає в будові і характеристиках інверторів напруги електроприводу. Запропоновано перспективне схемотехнічне рішення тягового електроприводу змінного струму варіантом IGBT-інвертор – двофазний асинхронний електричний двигун. Така структура в порівнянні з трифазним варіантом має ряд переваг: менший обсяг на 35%, удвічі менші втрати електроенергії, вартість комплектуючих менше на 10%, надійність вище на 33%. Поміж тим для вирішення проблеми енергоефективності пропонується використовувати метод ШІМ для керування перетворювачем за законом трапеції, так як він володіє меншим спотворенням в порівнянні з іншими розглянутими законами управління.

**Ключові слова:** електровоз, тяговий електропривод, асинхронний двигун, система керування.

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** В наш час на підприємствах по видобутку залізорудної сировини підземним способом для транспортування корисних копалин по підземним горизонтам основним видом транспорту є шахтні контактні електровози, головним силовим елементом якого є тяговий електропривод (ТЕП) з двигуном постійного струму (ДПС) [1]. Для зміни швидкості ТЕП з ДПС використовується резисторний спосіб регулювання, що не є сучасним і доцільним через свою низьку економічність і ефективність. Тому наступним етапом розвитку стала заміна системи керування або типу тягового двигуна. Контактрно-резисторна система керування двигуном замінюється на тиристорно-імпульсну. Використання тиристорно-імпульсних перетворювачів забезпечує плавне прискорення і гальмування електровозу [2-4], а поява IGBT-транзисторів, що мають характеристики близькі до ідеального ключа, зменшила комутаційний струм, кількість обладнання і затрати на його обслуговування [5-8]. Однак, наявність колекторно-щіткового вузла не дає можливості покращити якісні показники приводу.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Більш раціональним, враховуючи світову практику вибору типів тягових двигунів, є використання ТЕП з безколекторним АД [9,10].

У ньому відсутній колекторно-щітковий вузол, маса та розміри менші від ТЕП з ДПС при збереженні тієї ж потужності, експлуатаційна надійність вища, а регулювальні можливості кращі [11]. Найбільше всі ці переваги проявляються при підтриманні граничних швидкостей та в режимі електричного гальмування.

Отже, перспективними є ТЕП змінного струму, які використовують АД та живляться від частотно-регульованого IGBT інвертору.

**Постановка завдання.** Метою проведеного дослідження є порівняння двофазних тягових асинхронних приводів з традиційними трифазними для застосування в шахтних контактних електровозах, визначення потужності асинхронних двигунів та розробка системи керування ТАП.

**Викладення матеріалу та результати.** Для досягнення зазначеної мети в роботі необхідно розв'язати такі задачі:

Порівняти різні варіанти асинхронних приводів;

Виконати розрахунок потужності двофазного двигуна, що може використовуватися в якості тягового в ТАП шахтних електровозів;

Розробити систему керування ТЕП з двофазними асинхронними двигунами шахтного контактного електровозу.

Можливими варіантами двигунів у структурі ТАП є:

Трифазний асинхронний двигун, обмотки якого з'єднані в зірку (ТАП-3 $\ast$ );

Трифазний асинхронний двигун, обмотки якого з'єднані в розімкнений трикутник (ТАП-3 $\Delta$ );

Двофазний асинхронний двигун, обмотки якого живляться від окремих інверторів (ТАП-2);  
 Двофазний асинхронний двигун, обмотки якого живляться від комбінованих IGBT перетворювачів (ТАП-комбі).

Для порівняння різних варіантів структур перетворювачів ТАП були використані наступні критерії:

Енергоефективність ( $\Delta P$  - втрати потужності,  $\eta$  - коефіцієнт корисної дії);

Масогабаритні показники ( $V$  - об'єм перетворювача);

Надійність функціонування ( $H$  - показник надійності);

Вартість електрообладнання ( $S$  - вартість).

Результати розрахунків показників всіх варіантів ТАП зведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати розрахунків показників варіантів структур перетворювачів ТАП

Системи	Показники, в.о.				
	$\Delta P$	$\eta$	$V$	$H$	$S$
ТАП-3 $\Delta$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
ТАП-3 $\Delta$	0,39	1,016	0,59	2,0	1,34
ТАП-2	0,48	1,014	0,65	1,33	0,89
ТАП-комбі	1,46	0,987	1,31	0,77	0,48

Для зручності порівняння показники дані записані в відносних одиницях по відношенню до базового варіанту, а всі його показники прийняті за 1.

Структурну схему ТАП-2 представлено на рис. 1.

Розрахункова потужність, підведена до валу двигуна

$$P_1 = mU_1 I_1 \cos \varphi_1 \eta \quad (1)$$

де  $m$  - число фаз обмотки статора;  $U_1, I_1$  - фазні напруги і струм;  $\eta$  - ККД.

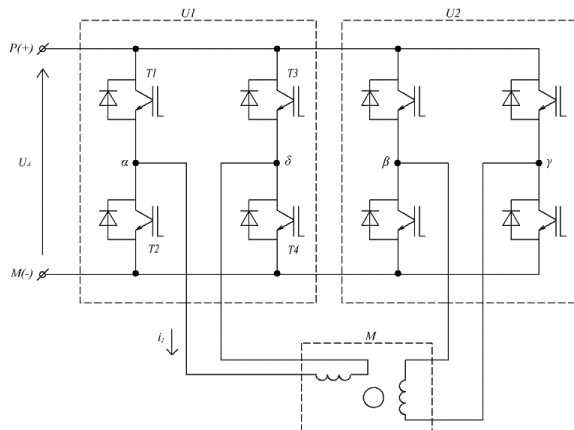


Рис. 1. Спрощена структура тягового електроприводу з двофазним асинхронним двигуном, обмотки якого живляться від окремих інверторів (ТАП-2)

Для трифазного асинхронного двигуна  $m=3$ , а для двофазного  $m=2$  і аналізуючи (1) легко зробити помилковий висновок про те, що двофазний двигун має потужність на  $\frac{1}{2}$  менше. Це може бути, якщо  $\frac{1}{2}$  «звільнених» пазів залишити порожніми, але так робити помилково з технічних позицій.

При зменшенні числа обмоток (фаз) створюється можливість в тому ж двигуні збільшити число витків в обмотці (збільшити в 1,5 рази  $U_1$ ) або збільшити перетин провідників (збільшити в 1,5 рази  $I_1$ ). В результаті

при тих же масі і габаритах виходить та сама потужність двигуна. Тобто характеристики тягового асинхронного двигуна (ТАД), при двофазному виконанні залишаються такими ж, як і в трифазному.

Застосування IGBT-інверторів в ТЕП дозволяє вирішити комплекс завдань, пов'язаних з перетворенням електроенергії для живлення ТАД. Проте залишається проблема якості перетворення електроенергії.

У практиці створення ТЕП типу «IGBT-перетворювач - асинхронний двигун» є ряд рішень для поліпшення форм кривих струму і напруги - від фільтрів до алгоритмів керування. Разом з тим рі-

шення, надійного і комплексного за структурою для умов рудних електровозів, немає. Тому зроблена спроба ще раз оцінити цю проблему, зокрема проаналізувати один з нових підходів до цієї проблеми.

Попередньо оцінивши способи формування кривих струму були обрані для порівнювання методи прямої і векторної ШІМ за законом синусоїди, і за законом трапеції. Для аналізу способів управління було проведено порівняння форм кривих напруг тягових асинхронних двигунів. Порівнювалися лінійні напруги: трифазного інверторного мосту; однофазного мосту і трапецеїдальної форми:

Аналіз методу векторної ШІМ напруги синусоїдальної форми виконаний на основі трифазного інверторного мосту і тягового асинхронного двигуна, обмотки якого з'єднані в зірку (рис. 2)

$$u = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} U_a \left( \sin \omega_s t - \frac{1}{5} \sin 5\omega_s t + \dots + (-1)^k \cdot \frac{1}{v} \cdot \sin v\omega_s t \right), \quad (2)$$

де  $v = 6k \pm 1, k = 0, 1, 2, 3, \dots$ ;

Аналіз методу прямої ШІМ напруги синусоїдальної форми виконаний на основі однофазного інверторного моста, що живить одну з фаз двофазного тягового асинхронного двигуна

$$u = \frac{4}{\pi} U_a \left( \sin \omega_s t - \frac{1}{3} \sin 3\omega_s t + \dots + \frac{1}{v} \cdot \sin v\omega_s t \right), \quad (3)$$

де  $v = 2k \pm 1, k = 1, 2, 3, \dots$ ;

Принцип формування трапецеїподібної кривої струму двигуна розвинений в додатку до двофазного перетворювача з урахуванням тягової специфіки.

Для визначення кута  $\alpha$ , при якому гармонійний склад оптимальний, був проведений аналіз розкладання трапецеїподібної кривої струму в ряд Фур'є

$$i(\omega t) = \frac{4}{\alpha\pi} I_T \sum_{v=1}^n \frac{1}{v^2} \sin v\alpha \cdot \sin v\omega t = \frac{4}{\pi} I_T \left( \frac{\sin \alpha}{\alpha} \cdot \sin \omega t + \frac{\sin 3\alpha}{9\alpha} \cdot \sin 3\omega t + \frac{\sin 5\alpha}{25\alpha} \cdot \sin 5\omega t + \dots \right). \quad (4)$$

Було встановлено, що найбільше наближення до синусоїди дає трапецеївидна крива з  $\alpha = \pi/3$ , яка і прийнята за основу

$$u = \frac{4}{\pi} U_a \left( \frac{\sin \alpha}{\alpha} \cdot \sin \omega_s t + \frac{\sin 3\alpha}{9\alpha} \sin 3\omega_s t + \dots + \frac{\sin v\alpha}{v^2\alpha} \cdot \sin v\omega_s t \right), \quad (5)$$

де  $v = 2k - 1, k = 1, 2, 3, \dots$

Результати зведено в табл. 2.

Таблиця 2

Результати порівняння лінійних напруг

Варіант	Схема. Форма напруги	$K_u$	$K_a$	Примітка
<i>a</i>	Трифазний міст. Прямокутна	0,955	1,1	Немає третього гармоніки
<i>б</i>	Однофазний міст. Прямокутна	0,9	1,273	Є 3-а гармоніка
<i>в</i>	Однофазний міст. Трапецеївидна	1,0	1,053	Немає третього гармоніки

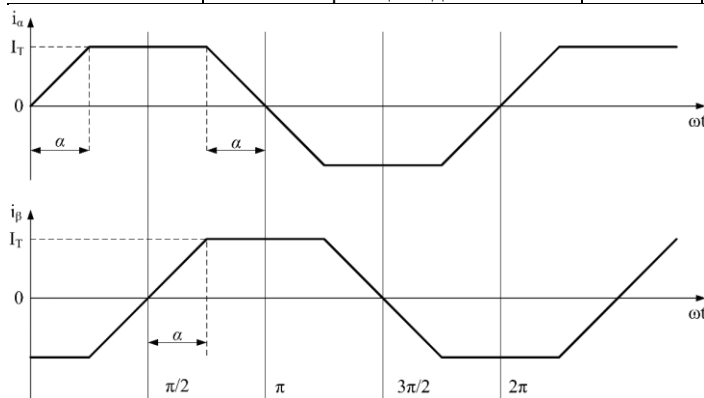


Рис. 2. Ідеалізовані діаграми кривих фазних струмів двигуна, сформованих за законом трапеції в двофазному перетворювачі

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** У роботі здійснене дослідження раціональності використання двигунів постійного струму в шахтних електровозах, а також доведена необхідність їх заміни на більш ефективні асинхронні двигуни.

Також було виконано аналіз існуючих систем керування і порівняння різних варіантів ТАП. У результаті було встановлено: двофазний ТАП переважає перед традиційним трифазним в частині меншого обсягу перетво-

рyвача - на 35 %, втрати в перетворювачі менші на 52 %, надійність вище на 33 %, вартість комплектуючих перетворювача менше на 10 %.

Аналіз способів формування кривих струму (напруги) ТАД дозволив рекомендувати до реалізації трапецієвидну форму фазної напруги двигуна, одержувану за допомогою прямої ШІМ напруги, коефіцієнт використання живлячої напруги якої на 10 % вище синусоїдальної кривої, а коефіцієнт спотворення - дорівнює одиниці проти 0,955 при синусоїдальному способі.

#### Список літератури

1. Волотковский С.А. Рудничная электровозная тяга / С. А. Волотковский. – М.: Недра, 1981. – 389 с.
  2. Синчук О.Н. Импульсные системы управления и защиты на рудничном электровозном транспорте / О. Н. Синчук, В. В. Чумак, О. В. Ершов // К.: «АДЕФ – Україна», 1998. – 280 с.
  3. Бардаш Ю.Ф. Тиристорный электропривод рудничных электровозов. / Бардаш Ю. Ф., Буряк А. Н., Чернявский В. Н. – М.: ЦНИИЭИ-уголь, 1975. – 55 с.
  4. Волотковский С.А. Опыт эксплуатации рудничных контактных электровозов с импульсной системой управления / С. А. Волотковский, Ю. С. Ремха, В. Х. Пирожено [и др.] // Горный журнал. – 1976. – №7. – С. 51 - 53.
  5. Шидловський А.К. Енергозбереження і силова електроніка в електроенергетиці / А. К. Шидловський, В. Б. Павлов // Техн. електродинаміка. Тем. випуск. Силова електроніка та енергоефективність. – К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2006. – Част.1. – С. 3-8.
  6. Дебелый В.Л. Основные направления развития шахтного локомотивного транспорта / В. Л. Дебелый, Л. Л. Дебелый, С. А. Мельников // Уголь Украины. – 2006. – №6. – С.30-31.
  7. Лебедкін С.В. Вугільна промисловість і перспективні напрямки розвитку тягових електроприводів рудникових електровозів (Проблеми і перспективи) / С. В. Лебедкін, А. Ф. Сінолиций, О. В. Пасько // Вісник Криворізького технічного університету: зб. наук. пр. – 2004. – №4. – С. 12-15.
  8. Перспективи розвитку шахтних (рудничних) електровозов з енергозберігаючими видами тягових електроприводів / О. Н. Синчук, С. В. Лебедкин, И. О. Синчук [и др.] // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ: СНУ ім. В.Даля, 2006. – №8(102). – С. 86-92.
  9. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии в структурах электроприводов. Схемотехника и принципы управления: учебное пособие / И. О. Синчук, А. А. Чернышев, И. И. Киба [и др.]. – Кременчуг: ПП Щербатых О. В., 2008. – 88 с.
  10. Синчук О.Н. Рудничный контактный электровоз с тяговым электроприводом переменного тока и микропроцессорной системой управления (разработка, испытания) / О. Н. Синчук, И. О. Синчук, Ф. И. Караманиц [и др.] // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ: СНУ ім. В.Даля, 2007. – №5(123). Ч. 2. – С. 33-37.
  11. Сінчук О.М. Випробування асинхронного тягового електропривода рудникового контактно-акумуляторного електровоза / О. М. Сінчук, Д. А. Шокарев, Є. І. Скапа, І. О. Сінчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – Вип. №6. – С. 49-52.
- Рукопис подано до редакції 01.04.16

УДК 621.314.632

В.А. КОЛЬСУН, канд. техн. наук, доц., Д.В. РИЖЕНКОВ, аспірант,  
В.М. МАКОДЗЬОБ, аспірант, О.М. КУЛИК, магістр,  
Криворізький національний університет

### АНАЛІЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ СТОСОВНО МЕРЕЖІ ЖИВЛЕННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СОНЯЧНОЇ СТАНЦІЇ

У статті досліджено енергетичні показники мережі живлення за умови наявності інверторів фотоелектричних сонячних станцій. Розраховані функції струму та напруги трифазних випрямлячів з нелінійним навантаженням. Проведена порівняльна характеристика енергетичних показників мережі живлення без використання фільтро-компенсаційних пристроїв та з активними фільтрами.

**Ключові слова:** енергетичні характеристики, активний фільтр, перетворювач, гармоніки, навантаження

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Однією з найбільш гострих проблем сьогодення України є питання стабільного енергозабезпечення та економії енергоносіїв.

На сучасних промислових підприємствах, у комунальному господарстві та транспорті більшу частину електроенергії споживає електропривод (ЕП) виробничих установок.

Виникає принципова необхідність підвищення його енергетичної ефективності та забезпечення регулювання технологічного процесу, що зумовлює застосування регульованого ЕП.