

ОЦЕНКА И СРАВНЕНИЕ ФОРМ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ДВУХ И ТРЕХФАЗНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПРИ ШИМ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ ДВУХФАЗНЫХ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В статье проанализированы формы токов и напряжений при ШИМ регулировании напряжения питания тяговых двигателей, позволяющие улучшить формы кривых тока и напряжения для условий рудничных электровозов. Предпочтение отдано трапецеидальному закону ШИМ напряжения. Проведена сравнительная оценка вариантов структур преобразователей асинхронных тяговых электротехнических комплексов, которые отличаются в основном строением и характеристиками инверторов.

Ключевые слова: тяговый электротехнический комплекс, закон управления, тяговый преобразователь.

У статті проаналізовано форми струмів і напруг при ШИМ регулювання напруги живлення тягових двигунів, що дозволяють покращити форми кривих струму і напруги для умов рудничних електровозів. Перевагу віддано трапецеїдальному закону ШИМ напруги. Проведена порівняльна оцінка варіантів структур перетворювачів асинхронних тягових електротехнічних комплексів, які відрізняються в основному будовою і характеристиками інверторів.

Ключеві слова: тяговий електротехнічний комплекс, закон управління, тяговий перетворювач.

Актуальность работы

В настоящее время на рудничных электровозах применяются тяговые электротехнические комплексы (ТЭТК), в которых используются двигатели постоянного тока с контакторно-резисторными системами управления, имеющие низкую эффективность и не соответствие уровню современных тенденций развития техники [2].

Основные преимущества ТЭТК на базе тяговых асинхронных двигателей (ТАД) по сравнению с аналогами постоянного тока заключаются в следующем:

- достаточная надежность асинхронного двигателя, благодаря отсутствию щеточно-коллекторного узла, в 4-5 раз выше;
- экономичная работа во всем диапазоне скоростей движения электровозов – от ползучей до максимальной;
- более высокие тяговые и тормозные характеристики всего электровоза благодаря жесткой механической характеристике асинхронных двигателей.

Одно из возможных и не без интересных направлений создания эффективных видов ТЭТК на базе ТАД являются варианты с двухфазными ТАД [3].

Однако, вышеизложенное априорное утверждение, необходимо подтвердить, в т.ч. возможностями новых технических решений и комплексом электротехнических показателей новой структуры ТЭТК.

Цель исследований

Анализ форм токов и напряжений инверторов для питания двухфазных тяговых асинхронных двигателей, оценка и выбор оптимальной структуры преобразователей напряжения для питания в комплексе рудничных контактных электровозов.

Материал и результаты исследований

Анализ форм токов и напряжений инверторов. Применение IGBT-инверторов в ТЭТК позволяет решить комплекс задач, связанных с преобразованием электроэнергии для питания ТАД. Однако проблема качества преобразования электроэнергии остается.

В практике создания ТЭТК типа «IGBT-преобразователь – асинхронный двигатель» имеется ряд решений для улучшения форм кривых тока и напряжения – от фильтров до алгоритмов управления. Вместе с тем, надежного и комплексного по структуре для условий рудных электровозов нет. Поэтому предпринята попытка еще раз оценить эту проблему, в частности проанализировать один из авторских подходов к этой проблеме.

Предварительно оценив способы формирования кривых тока были выбраны для сравнения методы векторной и прямой ШИМ напряжения по закону синусоиды, и по закону трапеции [1].

Для анализа способов управления было проведено сравнение форм кривых напряжений тяговых асинхронных двигателей. Сравнивались линейные напряжения: 1) трехфазного инверторного моста; 2) однофазного моста и 3) трапецеидальной формы:

1) Анализ метода векторной ШИМ напряжения синусоидальной формы выполнен на основе трехфазного инверторного моста и тягового асинхронного двигателя, обмотки которого соединены в звезду (рис. 1).

Прямоугольная форма напряжения трехфазного инвертора при разложении в ряд Фурье дает:

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

где $v = 6k \pm 1, k = 0,1,2,3, \dots$; $U_{1m} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} U_a = 1,1U_a$ – амплитуда первой гармоники;

$$\tilde{U}_1 = \frac{U_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} U_a = 0,78U_a \text{ – действующее значение первой гармоники;}$$

$$\tilde{U}_\Sigma = \sqrt{\frac{2}{3}} U_a = 0,816U_a \text{ – действующее значение полной прямоугольной кривой;}$$

$$K_\varepsilon = \frac{\tilde{U}_1}{\tilde{U}_\Sigma} = \frac{3}{\pi} = 0,955 \text{ – коэффициент искажения;}$$

$$K_a = \frac{U_{1m}}{U_a} = 1,1 \text{ – коэффициент использования питающего напряжения.}$$

2) Анализ метода

прямой ШИМ напряжения синусоидальной формы выполнен на основе однофазного инверторного моста, питающего одну из фаз двухфазного тягового асинхронного двигателя (рис. 2).

Прямоугольная форма напряжения однофазного инвертора при разложении в ряд Фурье дает:

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

где $v = 2k \pm 1, k = 1,2,3, \dots$;

$$U_{1m} = \frac{4}{\pi} U_a = 1,273U_a ;$$

$$\tilde{U}_1 = \frac{U_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_a = 0,9U_a ; \tilde{U}_\Sigma = U_a ;$$

$$K_\varepsilon = 0,9 ; K_a = 1,273.$$

3) Принцип формирования трапецевидной кривой тока двигателя развит в приложении к двухфазному преобразователю с учетом тяговой специфики.

Для определения угла α , при котором гармонический состав будет оптимален, был проведен анализ разложения трапецевидной кривой тока в ряд Фурье:

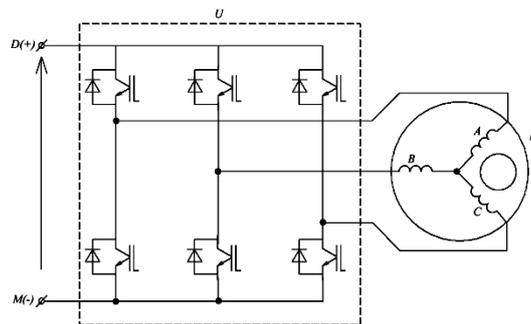


Рис. 1. Расчетная схема для метода векторной ШИМ напряжения (Упрощенная традиционная схема ТЭТК-3)

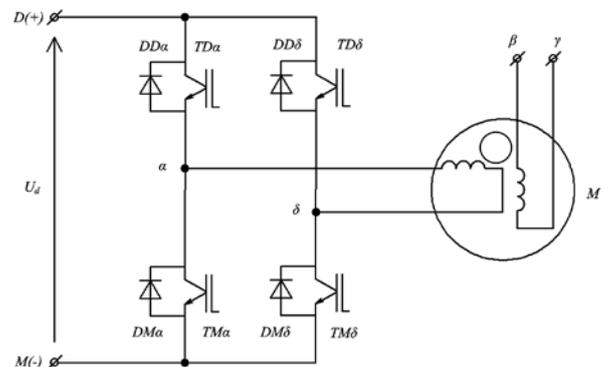


Рис. 2. Расчетная схема для метода прямой ШИМ напряжения.

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

Было установлено, что наибольшее приближение к синусоиде дает трапециевидная кривая с $\alpha=\pi/3$, которая и принята за основу.

Разложение в ряд Фурье трапеции дает:

$$u = \frac{4}{\pi} U_a \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \cdot \sin \omega_s t + \frac{\sin 3\alpha}{9\alpha} \sin 3\omega_s t + \dots + \frac{\sin v\alpha}{v^2\alpha} \cdot \sin v\omega_s t \right), \text{ где } v = 2k - 1, k = 1, 2, 3, \dots;$$

$$U_{1m} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sin \alpha}{\alpha} U_a = \frac{12}{\pi^2} \sin \frac{\pi}{3} \cdot U_a = 1,053 U_a; \quad \tilde{U}_1 = \frac{U_{1m}}{\sqrt{2}} = 0,745 U_a; \quad \tilde{U}_\Sigma = U_a \sqrt{1 - \frac{4\alpha}{3\pi}} = 0,745 U_a$$

$$; K_\delta = \frac{2\sqrt{6}}{\sqrt{\pi(3\pi - 4\alpha)}} \cdot \frac{\sin \alpha}{\alpha} = 0,9989 \rightarrow 1,0; \quad K_a = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sin \alpha}{\alpha} = 1,053$$

Результаты сведены в таблицу 1.

Сравнение структур и параметров преобразователей ТЭТК. Для сравнения различных вариантов структур преобразователей ТЭТК используем следующие критерии:

- массогабаритные показатели;
- энергоэффективность;
- надежность функционирования;
- стоимость электрооборудования.

Таблица 1

Результаты сравнения линейных напряжений

| Вариант | Схема. Форма напряжения | K_δ | K_a | Примечание |
|---------|----------------------------------|------------|-------|--------------------|
| 1 | Трехфазный мост. Прямоугольная | 0,955 | 1,1 | Нет 3-й гармоники |
| 2 | Однофазный мост. Прямоугольная | 0,9 | 1,273 | Есть 3-а гармоника |
| 3 | Однофазный мост. Трапецеидальная | 1,0 | 1,053 | Нет 3-й гармоники |

Структуры тяговых преобразователей будем анализировать в ограниченном объеме, т.е. без фильтров, тормозных систем и коммутационных аппаратов, поскольку они для всех вариантов одинаковы.

Для сравнения в качестве базового принимаем традиционный вариант ТЭТК с трехфазным ТАД, обмотки которого соединены в звезду и питаются от трехфазного IGB-транзисторного инвертора с векторной ШИМ напряжения, формируемого по синусоидальному закону (обозначение ТЭТК-3А), рис. 1.

Второй вариант ТЭТК представляет трехфазный ТАД, обмотки которого образуют схему разомкнутого треугольника, и питаются от трех однофазных инверторов (обозначение ТЭТК-3Д), рис. 3.

Третий вариант ТЭТК состоит из двухфазного ТАД, обмотки которого питаются от двух однофазных инверторов (обозначение ТЭТК-2), рис.4.

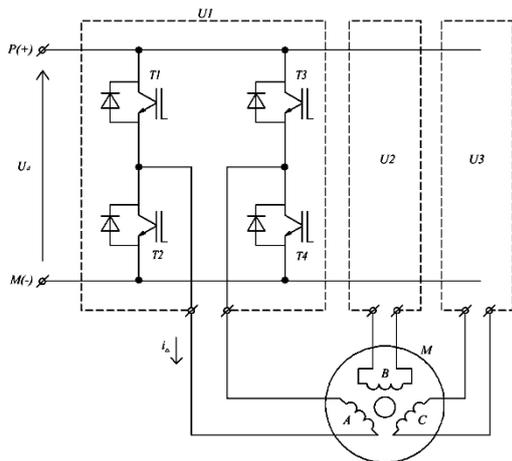


Рис. 3. Упрощенная схема ТЭTK-3Δ

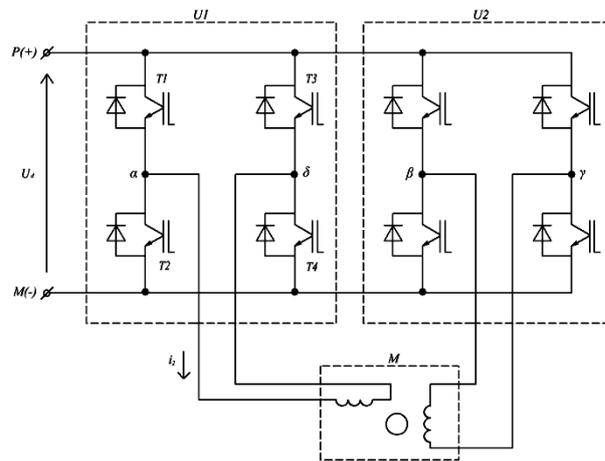


Рис. 4. Упрощенная принципиальная схема двухфазного тягового асинхронного привода ТЭTK-2

Четвертый вариант ТЭTK составлен из двухфазного ТАД, обмотки питаются от своих комбинированных транзисторно-тиристорных преобразователей (обозначение ТЭTK-комби), рис. 5.

Произведем расчет показателей для всех четырех вариантов при одинаковых исходных условиях – мощности, напряжения, частоте коммутации и т.п.

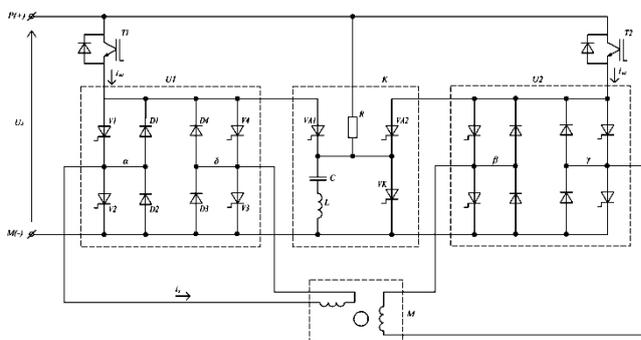


Рис. 5. Упрощенная схема ТЭTK – комби

Для каждого варианта рассчитаны следующие показатели:

- ΔP – потери мощности,
- η – коэффициент полезного действия,
- V – объем преобразователя,
- H – показатель надежности,
- S – стоимость.

Результаты расчетов показателей вариантов ТЭTK сведены в табл. 2. Для удобства сравнения показатели даны в относительных единицах по отношению к базовому варианту, а все его показатели приняты за 1.

Как видно из табл. 2 наименьшими объемами, потерями мощности и наибольшей надежностью обладают преобразователи систем ТЭTK-3Δ и ТЭTK-2. Вариант ТЭTK-3Δ самый дорогой. Поэтому на перспективу предлагается вариант ТЭTK-2.

Выводы

1. Законы управления ШИМ напряжения питания тяговых асинхронных двигателей влияют на гармонический состав первичных значений тока и напряжения. Наиболее оптимальным

Таблица 2
Результаты расчетов показателей вариантов ТЭTK

| Системы | Показатели, о.е. | | | | |
|------------|------------------|--------|------|------|------|
| | ΔP | η | V | H | S |
| ТЭTK-3λ | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| ТЭTK-3Δ | 0,39 | 1,016 | 0,59 | 2,0 | 1,34 |
| ТЭTK-2 | 0,48 | 1,014 | 0,65 | 1,33 | 0,89 |
| ТЭTK-комби | 1,46 | 0,987 | 1,31 | 0,77 | 0,48 |

законом ШИМ следует считать трапецидальный, поскольку обладает минимальным искажением функций кривых тока и напряжения.

2. Предлагаемая структура ТЭTK-2 по сравнению с традиционной – ТЭTK-3λ обладает на 35 % меньшим объемом преобразователя, в два раза меньшими потерями мощности в нем и на 33 % выше надежностью.

Список литературы

1. Бедфорд Б., Хофт Р. Теория автономных инверторов. Пер. с англ. Под ред. И.В. Антика, М. «Энергия», 1969, – 280 с.
2. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии в структурах электроприводов. Схемотехника и принципы управления / [Синчук И. О., Чернышев А. А., Пасько О. В., Киба И. И., Ключка А. С., Мельник О. Е.]. – Кременчуг: Вид. ПП Щербатых О. В., 2008. – 88 с..

3. Шаповал В. Г. К вопросу анализа импульсных способов функционирования форм кривых тока и напряжения питания 2-х и 3-х фазных тяговых двигателей / В. Г. Шаповал, И.О. Синчук, В. О. Черная // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М.Остроградського. Зб. наукових праць. – Кременчук: КДПУ ім. М.Остроградського – 2008 – Часть1, № 3 (50) – С.79–82.

EVALUATION AND COMPARE CURRENTS AND VOLTAGES FORMS TWO AND THREE-PHASE CONVERTER WITH PWM VOLTAGE POWER THE TWO-PHASE TRACTION ENGINE

Omelchenko Aleksandr Vladimirovich, Melnik Olga Evgenevna
State institution of higher education «Kryvyi Rih National University»

The article analyzes the form of currents and voltages at PWM regulation voltage of traction electric motors, which improve the shape of the curves of voltage and current for the conditions for use mine electric locomotives. Preference is given to the trapezoidal law of PWM voltage. The comparative estimation of options structures of converters an asynchronous traction electrotechnical complex, which mainly differ in the structure and characteristics of the inverters.

Key words: *traction electrotechnical complex, a control law, traction converter.*

1. Bedford B, Hoft R. Principles of inverters Circuits. M. Energiya, 1969, - 280с. (Rus.)
2. Semiconductors Electric Energy Converters in Electric Drive Structures. Circuit Technology and Principles of Control. Textbook / [I.O. Sinchuk, A.A. Chernyshev, O.V. Pasko, I.I. Kiba, A.S. Kliuchka, O.E. Melnik] – Kremenchuk: PE Scherbatykh O.V., 2008.– 88 p. (Rus.)
3. Shapoval V.G. To the question of analysis of impulsive methods of functioning of forms of curves of current and tension of feed of diphasic and three-phase hauling engines / V.G. Shapoval, I.O. Sinchuk, V.O. Chernaya // Announcer of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi state polytechnic university. Collection of scientific labours. – Kremenchuk: Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi state polytechnic university – 2008 – Part 1, №3 (50) – p.79–82. (Rus.)