ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin,2022;(12-2):34—46
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 621.313.32,621.333 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_34

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО МОДИФИКАЦИИ

Д. Ю. Бабицкий[1], Р. О. Никулин[1]

[1] Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация: достижение новых целей и преодоление современных вызовов горной отрасли диктуют новые требования надежности и сервиса технологического оборудования. Большое количество коллекторных электрических машин постоянного тока в электроприводах горного электрооборудования и техники не только требует квалифицированного периодического обслуживания, но также не соответствует современным требованиям энергоэффективности. Таким образом, образовалась тенденция перехода на электроприводы переменного тока. В настоящей работе представлен уникальный в своем роде синхронный электродвигатель для шахтного электровоза, выполненный на базе дробной зубцовой обмотки, с возбуждением от высококоэрцитивных постоянных магнитов. Такие электродвигатели по массогабаритным показателям и уровню эффективности превосходят асинхронные двигатели и классические синхронные двигатели с электромагнитным возбуждением. Показано преимущество разработанного электродвигателя в сравнении с аналогом. Однако недостатком дробных зубцовых обмоток можно назвать комплексный гармонический состав создаваемого магнитного поля. С целью уменьшения данного недостатка проведено исследование по модификации разработанного электродвигателя. В качестве модификации выбран способ сдвига части обмотки статора. Представлены методики расчета определяющих критериев с применением метода конечно-элементного анализа. Показано возможное улучшение характеристик электродвигателя при использовании рассмотренной модификации для различных углов сдвига. Выбрана величина сдвига, обеспечивающая наибольшее улучшение характеристик.

Ключевые слова: горное электрооборудование, тяговый электропривод, электропривод переменного тока, синхронный электродвигатель, дробная зубцовая обмотка, постоянные магниты, гармонический состав, магнитодвижущая сила, конечно-элементный анализ.

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках реализации программы развития НГТУ, научный проект №С21–25 «Анализ современных методов улучшения гармонического состава магнитного поля в электрических машинных с дробными зубцовыми обмотками».

Для цитирования: *Бабицкий Д. Ю., Никулин Р. О.* Энергоэффективный тяговый электропривод переменного тока и исследование его модификации // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 12-2. — С. 34—46. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_34.

© Д. Ю. Бабицкий, Р. О. Никулин. 2022

Energy-efficient ac electric traction drive and study about its modification

D. Yu. Babitsky[1], **R. O. Nikulin**[1]

[1] Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: Mining industry new goals achievement and modern challenges overcoming ask for new requirements for the reliability and service of manufacturing equipment. A large number of DC commutator machine in mining electric drives and facilities not only requires qualified periodic maintenance, but also fails to meet modern energy efficiency request. Therefore a trend towards AC electric drives is emerged. The current paper presents the unique synchronous electric motor based of fractional-slot concentrated winding and high-coercive permanent magnets excitation for a mine electric locomotive. Such electric motors are superior to induction motors and classical synchronous motors with electromagnetic excitation in terms of mass-dimensions parameters and efficiency. The advantage of the developed electric motor in comparison with the analogue is shown. However the disadvantage of fractional-slot concentrated winding is the complex harmonic content of the generated magnetic field. A study of developed electric motor modification in order to reduce this demerit is carried out. The approach of stator shifting winding is selected. Methods for characteristic criterion calculation with the finite element analysis application are presented. A possible electric motor characteristics improvement with suggested modification for different shifting angle is shown. The value of shifting angle that provides the highest performance improvement is chosen.

Key words: mining electrical equipment, traction electric drive, AC electric drive, synchronous electric motor, fractional-slot concentrated winding, permanent magnets, harmonic content, magnetomotive force, finite element analysis.

Acknowledgements: This work was supported in part of the Novosibirsk State Technical University development program, no. S21-25 “Analysis of modern ways of magnetic field harmonic content improvement in electrical machines with fractional-slot concentrated windings”.

For citation: Babitsky D. Yu., Nikulin R. O. Energy-efficient ac electric traction drive and study about its modification. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12-2):34—46. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_34.

1. Введение

В последние годы на российском рынке добычи полезных ископаемых наблюдается уверенный рост. За последнее десятилетие объем добычи железной руды в России вырос на 14,9%, а объем добытых энергетических каменных углей — более чем на 70%. Также Россия входит в тройку самых крупных стран–экспортеров угля. На данный момент ведется строительство 144 угольных предприятий, из которых 50 — это шахты, а также готовится к эксплуатации 32 железорудных месторождения [О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году: Государственный доклад. — 2021.]. Компании горнодобывающей отрасли наращивают объем добычи и обновляют технику, повышая энергоэффективность и ресурсосбережение горного оборудования [1,2]. Важным фактором, обеспечивающим эффективность горнодобывающих комплексов, является способ транспортировки минерального сырья. В рудных и угольных шахтах наибольшее распространение получили рельсовый и конвейерный транспорт [3]. Однако энергоэффективность отечественного подземного транспорта значительно отстает от современных требований [4]. Особенно низкой энергоэффективностью отличаются локомо-

тивные составы, использующие электроприводы с двигателями постоянного тока (ДПТ) [5].

Электроприводы в горной промышленности применяются во всех областях: от добычи и транспортировки до переработки. Применяемые ДПТ обладают низким КПД, а также требуют периодического обслуживания квалифицированным персоналом [6]. Исходя из статистики неисправностей электровозов, около половины этих поломок приходится на тяговые и вспомогательные ДПТ: эти поломки связаны с выходом из строя щеточно-коллекторного узла и межвиткового замыкания обмотки якоря [7]. Продукты износа щеток ухудшают изоляцию обмотки вследствие покрытия внутренних поверхностей графитовой пылью. Также при износе у ДПТ происходит смещение физической нейтрали, что может приводить к возникновению кругового огня. Данный фактор сильно влияет на ухудшение взрывобезопасности электрического двигателя, что особенно важно при работе во взрывоопасных средах. Также линии передачи постоянного тока, используемые в шахтах, не полностью удовлетворяют требованиям безопасности ввиду их трущихся контактов, а также возможности поражения электрическим током при несанкционированном касании [8].

Таким образом, наметилась тенденция перехода на электроприводы переменного тока, питаемые от аккумуляторных батарей, что позволит уменьшить время простоя оборудования по причине технического облуживания и ремонта, а также повысит электро- и взрывобезопасность для персонала [9]. Среди электродвигателей переменного тока стоит выделить синхронные двигатели, выполненные на основе дробных зубцовых обмоток (ДЗО) с числом пазов на полюс и фазу $q<1$ и возбуждением от высококоэрцитивных постоянных магнитов (ПМ). Применение ДЗО характеризуется существенным уменьшением размера лобовых частей за счет того, что каждая катушка располагается вокруг одного зубца, что сокращает осевую длину машины. Использование высококоэрцитивных редкоземельных магнитов позволило отказаться от щеточного контакта, также исключить потери в роторе и уменьшить его габариты. Совмещение этих двух технологий в электрической машине дает ряд преимуществ: повышенная энергоэффективность, меньший расход активных материалов и лучшие массогабаритные показатели [10].

2. Предлагаемая концепция

Использование электродвигателей с ДЗО и возбуждением от ПМ открывает новые возможности в области применения электрических машин. Не стала исключением горнодобывающая отрасль: сотрудники кафедры «Электромеханика» университета НГТУ НЭТИ по заказу Тульского завода горно-шахтного оборудования разработали уникальный тяговый электродвигатель для шахтного электровоза. Данный тип двигателя устанавливается на электровозы, предназначенные для транспортировки вагонеток с углем и породой, а также доставки оборудования и материалов, необходимых для работы в шахте. Электродвигатель получает питание от аккумуляторных батарей через инвертор, преобразующий постоянный ток в переменный. Однако батареи имеют небезграничную емкость и обладают свойством разряжаться, поэтому эксплуатация максимально энергоэффективного двигателя позволит полностью использовать преимущества такой комбинации (с применением ДЗО и ПМ). В сравнении с аналогом ДРТ-13 в разработанном

двигателе отсутствует щеточно-коллекторный узел, являющийся ключевым недостатком используемого ДПТ, вызывающий искрение и требующий периодического обслуживания, таким образом снижая надежность электродвигателя. Следует отметить, что спроектированный электродвигатель выполнен в габарите меньшего по мощности двигателя линейки аналогов — ДРТ-10. На рис. 1 представлено фото изготовленного опытного образца спроектированного электродвигателя, а в табл. 1 представлено сравнение параметров разработанного двигателя и аналога.

3. Испытания опытного образца

Для подтверждения расчетных параметров опытный образец был подвергнут следующим испытаниям: определение электромагнитного момента в статическом режиме при питании обмотки статора постоянным током; определение электродвижущей силы (ЭДС) холостого хода, при вращении испытуемого двигателя в режиме генератора. Результаты испытаний представлены на рис. 2 и рис. 3.

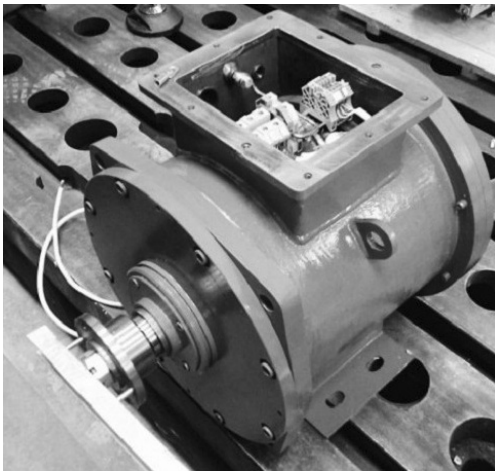

Рис. 1. Фото опытного образца разработанного электродвигателя
Fig. 1. Photo of a pilot sample of the developed electric motor

На данный момент изготовлено и введено в эксплуатацию более 60 двигателей в составе различных локомотивов. Используя новые технологии, разработчикам удалось не только улучшить массогабаритные показатели, но и увеличить грузоподъемность электровоза. Кроме того, значительно выросла энергоэффективность: в сравнении с аналогом прирост КПД составил ~10% за счет снижения уровня потерь в двигателе, что существенно снизило разряд аккумуляторов и увеличило время работы электровоза. В данном двигателе отсутствуют трущиеся контакты, которые могли бы вызывать искрение, кроме того, исключение щеточного контакта существенно упрощает обслуживание электрической машины и повышает ее надежность.

4. Исследование варианта модификации электродвигателя

Несмотря на описанные выше преимущества электрических машин ДЗО, следует отметить их особенность, которую необходимо учитывать на стадии проектирования: кроме рабочей гармоники магнитодвижущей силы (МДС) в пространственном составе присутствуют высшие гармоники и субгармоники [11]. Данные нерабочие гармоники, не участвующие в процессе преобразования энергии, приводят к возникновению ряда негативных эффектов, таких как вихревые токи в ПМ [12], вызывающие добавочные потери, добавочные магнитные потери в статоре [13], радиальные силы, действующие на электрическую машину и приводящие к появлению вибрации и шума в процессе ее работы [14,15], увеличение уровня дифференциального рассеяния и повышение общей индуктивности обмотки.

В разработанном тяговом электродвигателе применяется ДЗО с числом

Таблица 1
Параметры разработанного электродвигателя и аналога
Parameters of the developed electric motor and the analogue

Параметр	Разработанный СДПМ-13	Аналог ДРТ-13
Мощность, кВт	7,5	7,5
Момент, Н·м	72	72
Частота вращения, об/мин	1000	1000
Напряжение фазное, В	47	145
Ток, А	65	61
КПД, %	92	82,5
Масса, кг	223	380

пазов на полюс и фазу q=4/11. Для данной обмотки рабочей является 11 пространственная гармоника МДС. Среди нерабочих пространственных гармоник МДС можно выделить: 13-ю высшую гармонику, имеющую амплитуду, соизмеримую с рабочей, а также 1,5 и 7-ю субгармоники [11], табл. 2.

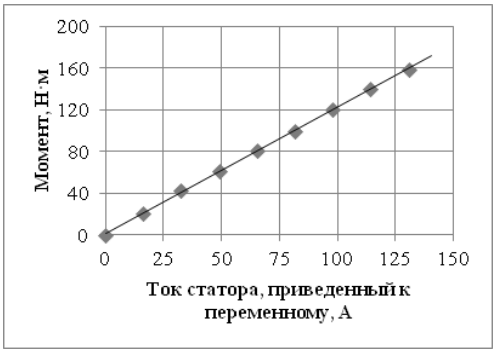

Рис. 2. Зависимость электромагнитного момента от тока статора
Fig. 2. Electromagnetic torque versus current normalized to AC

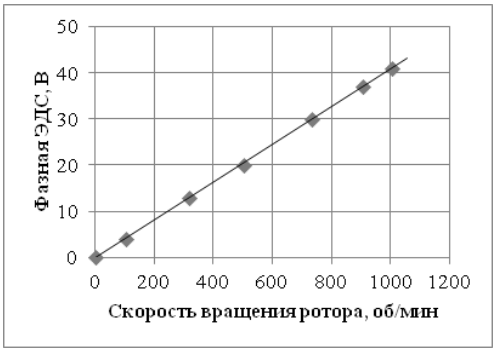

Рис. 3. Зависимость ЭДС холостого хода от частоты вращения ротора
Fig. 3. EMF versus rotor speed on load condition

На сегодняшний день исследователями предложены разработки по улучшению гармонического состава МДС ДЗО. Например, введение магнитных барьеров — участков с немагнитным материалом для локального повышения магнитного сопротивления магнитопровода статора [16]. Данный подход непосредственно не изменяет МДС, создаваемую обмоткой, но оказывает влияние на итоговое распределение магнитной индукции в воздушном зазоре. Также было предложено увеличение числа слоев обмотки для лучшего распределения МДС вдоль воздушного зазора [17–19]; применение нескольких независимых трехфазных обмоток [20,21]; модификация ДЗО с использованием сдвига части обмотки статора [19,22,23]. В предыдущей работе авторами рассмотрены современные подходы к решению данной проблемы, а также произведено их сравнение [24]. По итогам сравнения наиболее эффективным способом улучшения гармонического состава можно назвать сдвиг части обмотки статора. Его реализация заключается в выполнении статора с удвоенным числом пазов и разделении обмотки на две идентичные части. Первая укладывается согласно классической схеме ДЗО, но с шагом в два

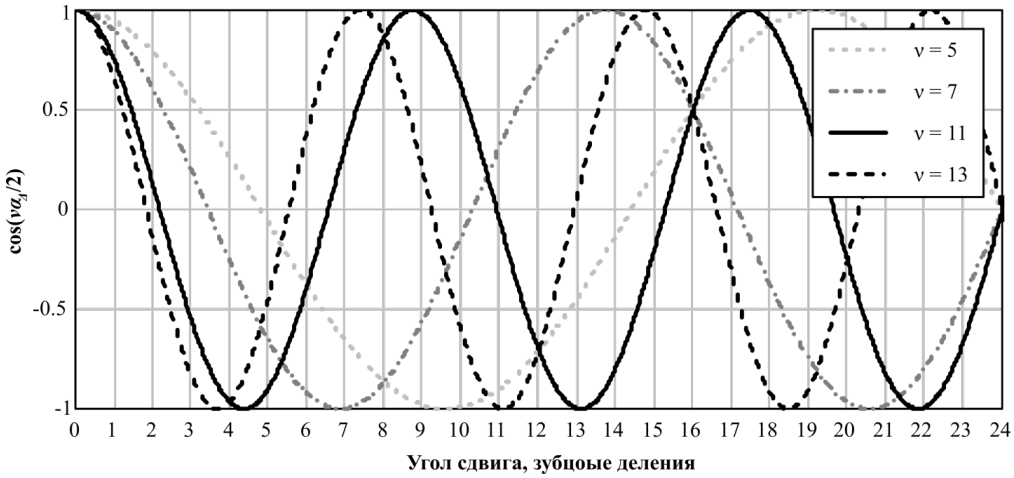

Рис. 4. Зависимость изменения обмоточного коэффициента ν-й гармоники от угла сдвига в зубцовых делениях
Fig. 4. Winding factor of ν-th harmonic variation versus shifting angle in slot pitch

зубцовых деления. Вторая часть выполняется таким же образом, но с определенным пространственным сдвигом относительно первой части, после чего они соединяются последовательно и подключаются к источнику питания обычным образом. Изменение конфигурации ротора не требуется.

В работах [22,23] способ сдвига части обмотки статора исследован для ДЗО с числом пазов на полюс и фазу q=2/5. Таким образом, необходимо провести дополнительное исследование по расширению применения данного способа на используемую в рассматриваемом электродвигателе обмотку с q = = 4/11. Итоговый гармонический состав МДС зависит от угла сдвига между двумя частями обмотки. Результирующий обмоточный коэффициент гармоники можно представить как [22]

$$k'_{об.\nu} = k_{об.\nu}\left|\cos\left(\frac{\nu\alpha_{\Delta}}{2}\right)\right|, \qquad (1)$$

где ν — номер гармоники, $k'_{об.\nu}$ — обмоточный коэффициент ν-й гармоники итоговой обмотки, $k_{об.\nu}$ — обмоточный коэффициент ν-й гармоники обычной обмотки, α_{Δ} — сдвиг между двумя обмотками в геометрических градусах.

Таким образом, необходимо подобрать такой угол сдвига, чтобы величина рабочей гармоники осталась максимально возможной, а другие нежелательные гармоники были минимизированы. Угол сдвига должен быть кратным зубцовому делению τ для сохранения симметрии статора с целью использования классических технологий изготовления электрических машин. На рис. 4 представлена зависимость, с использованием которой производился выбор величины сдвига между частями обмоток.

Поскольку для рассматриваемой обмотки рабочей является 11-я пространственная гармоника МДС, необходимо подобрать такой угол сдвига, чтобы значение функции косинуса для данной гармоники было близко к максимуму, а значения других функций при этом сдвиге оказались близки к нулю. Выбирая определенный угол сдвига, можно минимизировать ту или иную нежелательную простран-

ственную гармонику. Таким образом, можно выделить следующие варианты величины сдвига: 5τ,*9*τ,13τ,*17*τ. Следовательно, необходимо определить, при какой величине сдвига обеспечивается наибольшее улучшение характеристик электродвигателя.

Поскольку преобразование энергии в электрической машине происходит в воздушном зазоре, характеристика магнитного поля в зазоре является важным параметром. Магнитное поле в воздушном зазоре электрической машины характеризуется параметром магнитной индукции и законом ее распределения вдоль зазора. В свою очередь, магнитная индукция определяется МДС и магнитным сопротивлением. Таким образом, форма МДС, создаваемой обмоткой, непосредственно влияет на распределение магнитного поля в зазоре. Анализ представленных вариантов сдвига части обмотки статора проводился с использованием метода конечно-элементного анализа в программном пакете FEMM. Для определения воздействия на магнитное поле в воздушном зазоре лишь обмотки статора ротор электрической машины заменялся на сплошной металлический цилиндр с сохранением величины воздушного зазора. Коэффициенты ряда Фурье, полученные после гармонического разложения распределения нормальной составляющей магнитной индукции $B_{\delta н}$, представлены в табл. 2. Отношение амплитуд гармоник к рабочей гармонике рассматриваемой классической ДЗО представлено на рис. 5. Показано, что любой из вариантов сдвига приводит к небольшому снижению рабочей гармоники и значительному уменьшению нежелательных гармоник. Необходимо провести дополнительное исследование по выбору величины сдвига. В качестве критериев сравнения выбраны: крутящий момент и плавность вращения, потери в ПМ, величина индуктивности.

5. Методика расчета

Величина крутящего момента и его пульсации в ходе работы являются ключевыми показателями электродвигателя. Потери в ПМ повышают общий уровень потерь в электрической машине и вызывают дополнительный нагрев ПМ. Поле реакции якоря и зубцово-пазовая структура магнитопровода оказывают влияние на пульсации крутящего момента [25] и магнитное поле ПМ [12]. Данные факторы зависят от конструкции ротора и расположения ПМ. В ходе исследования использовалась реальная геометрия ротора спроектированного электродвигателя. Расчет проводился при постоянном угле нагрузки $\theta = \pi/2$. Постоянная составляющая момента была получена с помощью преобразования Фурье, после чего

Таблица 2

Амплитуды основных гармоник индукции магнитного поля в воздушном зазоре
Amplitudes of the major flux density harmonics in the air gap

Номер гармоники	*Магнитная индукция*, **Тл**				
	Классическая	**Сдвиг 5τ**	**Сдвиг 9τ**	**Сдвиг 13τ**	**Сдвиг 17τ**
1	0,028	0,028	0,024	0,019	0,013
5	0,044	0,003	0,044	0,02	0,034
7	0,054	0,036	0,031	0,053	0,004
11	0,212	0,186	0,204	0,207	0,197
13	0,187	0,078	0,035	0,012	0,057

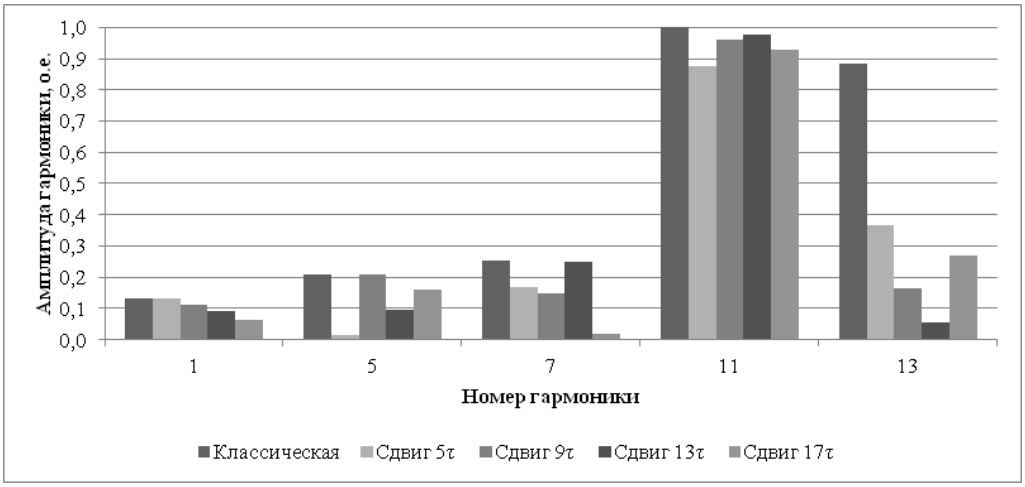

Рис. 5. Амплитуды основных гармоник индукции магнитного поля в воздушном зазоре относительно 11-й рабочей гармоники классической дробной зубцовой обмотки
Fig. 5. Amplitudes of the major flux density harmonics in the air gap in relation to 11th working harmonic of classic fractional-slot concentrated winding

была получена амплитуда пульсации момента во времени. Используя величину магнитной индукции ПМ, были рассчитаны потери в ПМ [26]:

$$P = \frac{n_{pm}}{16}\frac{1}{\rho}\frac{w^3 L^3 h}{w^2 + L^2}\left(\frac{\partial B}{\partial t}\right)^2, \qquad (2)$$

где n_{pm} — число ПМ, ρ — удельное электрическое сопротивление, w — высота магнита, h — толщина магнита, L — длина магнита.

Работа электрической машины основана на действии рабочей гармоники поля. Наличие ряда других гармоник приводит к созданию полей дифференциального рассеяния и к увеличению полной индуктивности обмотки статора. Индуктивные параметры электрической машины оказывают значительное влияние на ее работу как в установившихся, так и в переходных режимах [27]. К тому же высокий уровень индуктивности снижает коэффициент мощности электродвигателя и требует увеличения установленной мощности питающего преобразователя. В ходе анализа индуктивных параметров использовались общепринятые в теории синхронных машин индуктивности по продольной и поперечной осям (L_d, L_q). Для расчета индуктивных параметров с учетом насыщения магнитной цепи и дифференциального рассеяния применена методика, описанная в [28].

Рассчитанные величины выбранных критериев сравнения для классической ДЗО и с применением сдвига части обмотки статора сведены в табл. 3.

6. Обсуждение результатов

Как видно из табл. 3, применение сдвига части обмотки ведет к снижению крутящего момента электродвигателя. С данной точки зрения, лучшие результаты показывают варианты сдвига части обмотки статора на 9τ и 13τ.

Увеличение числа зубцов приводит к увеличению частоты зубцовых пульсаций момента и снижению их амплитуды [25, 29]. Представленные результаты отражают более чем двукратное снижение пульсаций крутящего момента для всех вариантов сдвига.

Все варианты сдвига показали сопоставимые результаты снижения уровня

Таблица 3
Результаты применения сдвига обмотки
Results of shifting winding application

Параметр	Тип обмотки				
	Классическая	Сдвиг 5τ	Сдвиг 9τ	Сдвиг 13τ	Сдвиг 17τ
M, Н·м	76,7	66	72,3	73,5	69,7
$M_{пул}$, Н·м	6,5	3	2,3	3,1	2,1
$P_{маг}$, Вт	309	79	56,6	55	54,8
L_d, *мГн*	1,1	0,7	0,7	0,7	0,7
L_q, *мГн*	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4

потерь в ПМ и индуктивностей. Варианты сдвига на 9τ,13τ,17τ позволяет снизить потери на 82–83%. Снижение индуктивностей составило более 30% для всех вариантов.

На основании рассмотренного выше сравнения можно заключить, что вариант сдвига части обмотки статора на 13τ демонстрирует лучшие характеристики по совокупности выбранных для анализа критериев. Данная величина сдвига обеспечивает наименьшее снижение крутящего момента при наибольшем снижении потерь в ПМ.

7. Заключение

В рамках тенденции увеличения энергоэффективности и отказоустойчивости электроприводов путем перехода на приводы переменного тока в настоящей статье представлен тяговый электродвигатель шахтного электровоза. Разработанный электродвигатель является синхронным с системой возбуждения от высококоэрцитивных ПМ. В качестве обмотки применена дробная зубцовая с числом пазов на полюс и фазу, меньшим 1. Благодаря данным техническим решениям спроектированный электродвигатель превосходит не только ДПТ, но и асинхронные двигатели. Кроме того, были проведены испытания опытного образца указанного электродвигателя, в ходе которых были подтверждены расчетные характеристики. На настоящий момент уже более 60 таких электродвигателей поставлены в составе различных локомотивов. Также в представленной работе предложен вариант усовершенствования данного электродвигателя путем применения сдвига части обмотки статора. Целью этой модификации является улучшение пространственного гармонического состава МДС, создаваемой обмоткой статора. В ходе исследования был определен оптимальный угол сдвига обмотки, позволяющий с наибольшей эффективностью повысить характеристики электродвигателя. Модификация обмотки, заключающаяся в сдвиге части обмотки статора на 13τ, позволила снизить потери в ПМ и индуктивность обмотки на величины, превышающие 80 и 30% соответственно. Также было достигнуто более чем двукратное снижение пульсаций крутящего момента, а уменьшение максимального момента составило 4%. Необходимо добавить, что применение данной модификации не усложнит производственный цикл изготовления электродвигателя, поскольку конструкция ротора осталась неизменной, а обновленная конструкция статора реализуема в рамках классических технологий изготовления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Степаненко В. П.* Пути повышения энергоэффективности и ресурсосбережения горного локомотивного транспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 9. — С. 128–137.

2. *Кубрин С. С.*, *Решетняк С. Н.*, *Бондаренко А. М.* Анализ влияния технологических факторов на удельные нормы электропотребления оборудования выемочных участков угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 2. — С. 161–170. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0–161–170.

3. *Бабокин Г. И.*, *Шпрехер Д. М.* Повышение энергоэффективности механизированного очистного забоя угольной шахты // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 9. — С. 122–134. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_122.

4. *Малафеев С. И.*, *Малафеев С. С.* К анализу энергетических процессов в питающей сети при работе карьерного экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3. — С. 126–137. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0–126–137.

5. *Степаненко В. П.*, *Сорин Л. Н.* Энергоэффективность подземной локомотивной откатки с гибридными накопителями энергии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 6. — С. 135–140. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0–161–170.

6. *Хошмухамедов И. М.*, Косарева-*Володько О. В.* Надежность электродвигателей карьерных экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2018. — №. 12. — С. 151–156. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12–0-151–156.

7. *Колесник И. К.*, *Черняк Ю. В.*, *Горобченко А. Н.* Анализ неисправностей электровоза ДЕ1 // Сборник научных трудов ДонИЖТ. — 2005. — № 1. — С 38–46.

8. *Юрченко О. Н.*, *Синчук И. О.*, *Гузов Э. С.*, *Шокарев Д. А.*, *Скапа Е. И.* Аспекты разработки асинхронного электротехнического комплекса шахтных контактно-аккумуляторных электровозов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2015. — Т. 1. — № 8. — С. 21–26.

9. *Абрамов Б. И.*, *Иванов А. Г.*, *Шиленков В. А.*, *Кузьмин И. К.*, *Шевырев Ю. В.* Электропривод современных шахтных подъемных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5–2. — С. 145–162. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_145.

10. *Шевченко А. Ф.*, *Приступ А. Г.*, *Новокрещенов О. И.*, *Топорков Д. М.*, *Корнеев В. В.* Особенности конструкции и проектирования энергоэффективных магнитоэлектрических электродвигателей общепромышленного назначения // Электротехника. — 2014. — № 12. — С. 41–44.

11. *Шевченко А. Ф.*, *Честюнина Т. В.* Анализ магнитодвижущих сил дробных зубцовых обмоток электрических машин // Электротехника. — 2009. — № 12. — С. 3–7.

12. *Приступ А. Г.*, *Корнеев В. В.* Потери на вихревые токи в магнитах ротора генератора аварийного динамического торможения // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. — 2016. — № 3. — С. 21–25.

13. *Пахомин С. А.*, *Пахомин Л. С.* Магнитные потери в статоре вентильного двигателя с постоянными магнитами // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2017. — Т. 60. — № 5. — С. 18–24. DOI 10.17213/0136-3360-2017-5-18–24.

14. *Chen Y. S.*, *Zhu Z. Q.*, *Howe D.* Vibration of PM brushless machines having a fractional number of slots per pole // IEEE Transactions on Magnetics. 2006, vol. 42, no. 10, pp. 3395–3397. DOI: 10.1109/TMAG.2006.879072.

15. *Zhu S.*, *Ji J.*, *Zhao W.*, *Zheng J.*, *Mao Y. Liu G.* Unequal teeth design to reduce electromagnetic vibration in fractional-slot concentrated-windings permanent-magnet machine // Journal of Magnetics. 2019, vol. 24, no. 4, pp. 657–667. DOI 10.4283/JMAG.2019.24.4.657.

16. *Dajaku G.*, *Xie W.*, *Gerling D.* Reduction of low space harmonics for the fractional slot concentrated windings using a novel stator design // IEEE Transactions on Magnetics. 2013, vol. 50, no. 5, pp. 1–12. DOI: 10.1109/TMAG.2013.2294754.

17. *Liu G.*, *Zhai F.*, *Chen Q.*, *Xu G.* Torque pulsation reduction in fractional-slot concentrated-windings IPM motors by lowering sub-harmonics // IEEE Transactions on Energy Conversion. — 2019. — Т. 34. — №. 4. — С. 2084–2095. DOI: 10.1109/TEC.2019.2935016.

18. *Li F.*, *Wang K.*, *Li J.*, *Zhang H. J.* Suppression of even-order harmonics and torque ripple in outer rotor consequent-pole PM machine by multilayer winding //IEEE Transactions on Magnetics. 2018, vol. 54, no. 11, pp. 1–5. DOI: 10.1109/TMAG.2018.2839740.

19. *Liu D.*, *Song X.*, *Dong J.* Performance of multi-layer and stator-shifting fractional-slot concentrated windings for superconducting wind turbine generators under normal and short-circuit operation conditions. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2020, vol. 30, no. 4, pp. 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2020.2971436.

20. *Barcaro M.*, *Bianchi N.*, *Magnussen F.* Analysis and tests of a dual three-phase 12-slot 10-pole permanent-magnet motor // IEEE Transactions on Industry Applications. 2010, vol. 46, no. 6, pp. 2355–2362. DOI: 10.1109/TIA.2010.2070784.

21. *Abdel-Khalik A. S., Gadoue S.*, *Ahmed S.* A nine-phase six-terminal fractional-slot-winding for interior permanent-magnet machines with low space harmonics // 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM). IEEE,2018, pp. 499–505. DOI: 10.1109/ICELMACH.2018.8506749.

22. *Reddy P. B.*, *Huh K. K.*, El-*Refaie A. M.* Generalized approach of stator shifting in interior permanent-magnet machines equipped with fractional-slot concentrated windings // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2014, vol. 61, no. 9, pp. 5035–5046. DOI: 10.1109/TIE.2013.2297515.

23. *Zhu S.*, *Cox T.*, *Xu Z.*, *Gerada C.* Novel 24-slots14-poles fractional slot concentrated winding topology with low-space harmonics for electrical machine // The Journal of Engineering. 2019, vol. 2019, no. 17, pp. 3784–3788. DOI: 10.1049/joe.2018.8085.

24. *Бабицкий Д. Ю.*, *Топорков Д. М.*, *Приступ А. Г.*, *Темлякова З. С.* Способы улучшения гармонического состава магнитного поля в электрических машинах с дробными зубцовыми обмотками // Электротехника. — 2021. — № 6. — С. 31–36.

25. *Приступ А. Г.*, *Топорков Д. М.*, *Шевченко А. Ф.* Исследование пульсаций момента синхронных магнитоэлектрических машин с дробными зубцовыми обмотками // Электротехника. — 2014. — № 12. — С. 36–40.

26. *Ruoho S., Santa-Nokki T.*, *Kolehmainen J.*, *Arkkio A.* Modeling magnet length in 2-D finite-element analysis of electric machines //IEEE Transactions on Magnetics. 2009, vol. 45, no. 8, pp. 3114–3120. DOI: 10.1109/TMAG.2009.2018621.

27. *Шевченко А. Ф.*, *Салах А. А.* М. С., *Жуловян В. В.* Влияние индуктивных параметров на характеристики магнитоэлектрического двигателя //Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. — 2012. — № 1. — С. 141–149.

28. *Бухгольц Ю. Г.*, *Приступ А. Г.*, *Честюнина Т. В.* Определение индуктивностей магнитоэлектрических машин с однозубцовыми обмотками // Электротехника. — 2011. — № 6. — С. 25–29.

29. *Babitsky D.*, *Toporkov D.* Investigation and improvement of flux density harmonic content in electrical machines with fractional slot tooth concentrated windings // 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). IEEE,2019, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949963. ГИАБ

REFERENCES

1. Stepanenko V. P. Ways to improve energy efficiency and resource saving mining locomotive transport. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2016, no. 9, pp. 128–137. [In Russ].

2. Kubrin S. S., Reshetnyak S. N., Bondarenko A. M. Impact of technology factors on specific power demands of equipment in extraction districts of coal mines. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2020;(2):161–170. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0–161–170.

3. Babokin G. I., Shprekher D. M. Enhancement of energy efficiency in fully mechanized longwall mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2021, no. 9, pp. 122–134. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_122.

4. Malafeev S. I., Malafeev S. S. Analyzing energy processes in power line of operating open-pit excavator. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2020, no. 3 pp. 126–137. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0–126–137.

5. Stepanenko V. P., Sorin L. N. The efficiency of underground locomotive haulage with hybrid energy storage. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2015, no. 6, pp. 135–140. [In Russ].

6. Khoshmukhamedov I. M., Kosareva-Volodko O. V. Reliability of electric motors of open pit mine shovels. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2018, no. 9, pp.151–156. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-12–0-151–156.

7. Kolesnik I. K., Chernjak Ju. V., Gorobchenko A. N. Analysis of fault conditions of the electric locomotive DE1. *Sbornik nauchnyh trudov DonIZhT*. 2005, no. 1, pp. 38–46. [In Russ].

8. Jurchenko O. N., Sinchuk I. O., Guzov Je. S., Shokarev D. A., Skapa E. I. Designing aspects of induction electrical complex of mine battery-trolley electric locomotives. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*. 2015, vol. 1, no. 8, pp. 21–26. [In Russ].

9. Abramov B. I., Ivanov A. G., Shilenkov V. A., Kuzmin I. K., Shevyrev Yu. V. Electric drive of modern mining machines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2022, no. 5–2, pp. 145–162. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_145.

10. Shevchenko A. F. Pristup A. G., Novokreshchenov O. I., Toporkov D. M., Korneev V. V. Construction and design features of permanent magnet electric motors for general industrial purposes. *Russian Electrical Engineering*. 2014, vol. 85, no. 12, pp. 748–751. [In Russ]. DOI: 10.3103/S106837121412013X.

11. Shevchenko A. F. Chestyunina T. V. Analysis of magnetomotive forces of fractional-slot windings of electrical machines. *Russian Electrical Engineering*. 2009, vol. 80, no.12, pp. 641–645. [In Russ]. DOI: 10.3103/S1068371209120013.

12. Pristup A. G., Korneev V. V. Eddy current losses in the rotor magnets of the emergency dynamic braking generator. *Jelektro. Jelektrotehnika, jelektrojenergetika, jelektrotehnicheskaja promyshlennost'*. 2016, no. 3, pp. 21–25. [In Russ].

13. Pahomin S. A., Pahomin L. S. Magnetic losses in the stator of a permanent magnet motor. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Jelektromehanika*. 2017, vol. 60, no. 5, pp. 18–24. [In Russ]. DOI 10.17213/0136-3360-2017-5-18–24.

14. Chen Y. S., Zhu Z. Q., Howe D. Vibration of PM Brushless Machines Having a Fractional Number of Slots Per Pole. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2006, vol. 42, no. 10, pp. 3395–3397. DOI: 10.1109/TMAG.2006.879072.

15. Zhu S., Ji J., Zhao W., Zheng J., Mao Y. Liu G. Unequal teeth design to reduce electromagnetic vibration in fractional-slot concentrated-windings permanent-magnet machine. *Journal of Magnetics*. 2019, vol. 24, no. 4, pp. 657–667. DOI 10.4283/JMAG.2019.24.4.657.

16. Dajaku G., Xie W., Gerling D. Reduction of Low Space Harmonics for the Fractional Slot Concentrated Windings Using a Novel Stator Design. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2014, vol. 50, no. 5, pp. 1–12. DOI: 10.1109/TMAG.2013.2294754.

17. Liu G., Zhai F., Chen Q., Xu G. Torque Pulsation Reduction in Fractional-Slot Concentrated-Windings IPM Motors by Lowering Sub-Harmonics. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2019, vol. 34, no. 4, pp. 2084–2095. DOI: 10.1109/TEC.2019.2935016.

18. Li F., Wang K., Li J., Zhang H. J. Suppression of Even-Order Harmonics and Torque Ripple in Outer Rotor Consequent-Pole PM Machine by Multilayer Winding. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2018, vol. 54, no. 11, pp. 1–5. DOI: 10.1109/TMAG.2018.2839740.

19. Liu D., Song X., Dong J. Performance of multi-layer and stator-shifting fractional-slot concentrated windings for superconducting wind turbine generators under normal and short-circuit operation conditions. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2020, vol. 30, no. 4, pp. 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2020.2971436.

20. Barcaro M., Bianchi N., Magnussen F. Analysis and Tests of a Dual Three-Phase 12-Slot 10-Pole Permanent-Magnet Motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2010, vol. 46, no. 6, pp. 2355–2362. DOI: 10.1109/TIA.2010.2070784.

21. Abdel-Khalik A. S., Gadoue S., Ahmed S. A Nine-phase Six-Terminal Fractional-Slot-Winding for Interior Permanent-Magnet Machines with Low Space Harmonics. *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. 2018, pp. 499–505. DOI: 10.1109/ICELMACH.2018.8506749.

22. Reddy P. B., Huh K., EL-Refaie A. M. Generalized Approach of Stator Shifting in Interior Permanent-Magnet Machines Equipped With Fractional-Slot Concentrated Windings. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2014, vol. 61, no. 9, pp. 5035–5046. DOI: 10.1109/TIE.2013.2297515.

23. Zhu S., Cox T., Xu Z., Gerada C. Novel 24-slots14-poles fractional slot concentrated winding topology with low-space harmonics for electrical machine. *The Journal of Engineering*. 2019, vol. 2019, no. 17, pp. 3784–3788. DOI: 10.1049/joe.2018.8085.

24. Babitskii D. Y., Toporkov D. M., Pristup A. G., Temlyakova Z. S. Methods to Improve the Harmonic Composition of the Magnetic Field in Electric Machines with Fractional Slot Winding. *Russian Electrical Engineering*. 2021, vol. 92, no. 6, pp. 320–325. [In Russ]. DOI: 10.3103/S1068371221060079.

25. Pristup A. G., Toporkov D. M., Shevchenko A. F. A study of cogging torque in permanent magnet synchronous machines with fractional slot windings. *Russian Electrical Engineering*. 2014, vol. 85, no. 12, pp. 743–747. [In Russ]. DOI: 10.3103/S1068371214120128.

26. Ruoho S., Santa-Nokki T., Kolehmainen J., Arkkio A. Modeling Magnet Length In 2-D Finite-Element Analysis of Electric Machines. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2009, vol. 45, no. 8, pp. 3114–3120. DOI: 10.1109/TMAG.2009.2018621.

27. Shevchenko A. F., Salah A. A. M. S., Zhulovjan V. V. Influence of inductunce parameters on the characteristics of a magnetoelectric motor. *Doklady Akademii nauk vysshej shkoly Rossijskoj Federacii*. 2012, no. 1, pp. 141–149. [In Russ].

28. Bukhol'ts Yu. G., Pristup A. G., Chestyunina T. V. Determining inductances of permanent-magnet machine with single-slot windings. *Russian Electrical Engineering*. 2011, vol. 82, no. 6, pp. 302–306. [In Russ]. DOI: 10.3103/S1068371211060058.

29. Babitsky D., Toporkov D. Investigation and improvement of flux density harmonic content in electrical machines with fractional slot tooth concentrated windings. *2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*. 2019, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949963.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бабицкий Денис Юрьевич — ассистент кафедры Электромеханики, https://orcid.org/0000-0002-2044-4675, Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20, Россия, e-mail: denibaks@gmail.com;
Никулин Роман Олегович — младший научный сотрудник, Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20, Россия, e-mail: roma99352@gmail.com.
Для контактов: *Бабицкий Д. Ю.*, e-mail: denibaks@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Babitsky D. Yu., assistant at the Department of Electromechanics, https://orcid.org/0000-0002-2044-4675, Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20, Russia, e-mail: denibaks@gmail.com;
Nikulin R. O., junior researcher, Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20, Russia, e-mail: roma99352@gmail.com.
Corresponding author: *Babitsky D. Yu.*, e-mail: denibaks@gmail.com.

Получена редакцией 24.01.2022; получена после рецензии 27.09.2022; принята к печати 10.11.2022.
Received by the editors 24.01.2022; received after the review 27.09.2022; accepted for printing 10.11.2022.