

УДК 629.423.31

Перспективы применения вентильно-индукторного двигателя в системе тяги высокоскоростного электропоезда

Е. Е. Мирошниченко

Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

Для цитирования: *Мирошниченко Е. Е.* Перспективы применения вентильно-индукторного двигателя в системе тяги высокоскоростного электропоезда // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 1004–1015. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-1004-1015

Аннотация

Цель: Применение вентильно-индукторного двигателя (ВИД) в системе тяги высокоскоростного электропоезда за счет повышения работоспособности его подшипников. Используя ВИД в качестве тягового электродвигателя, машиностроительный комплекс может решать задачи, связанные с импортозамещением комплектующих для подвижного состава. **Методы:** Основными причинами износа подшипникового узла являются силы одностороннего магнитного притяжения (ОМП). Эти силы возникают при асимметрии воздушного зазора вследствие погрешностей при изготовлении деталей и отклонений при сборке электрической машины. Силы ОМП при определенном смещении найдены по тензору натяжения Максвелла. Для этого был использован метод конечных элементов, воплощенный в программе FEMM. Зависимости токов в соответствующих фазах от момента времени, требуемые для нахождения сил, были получены в программе MATLAB (SIMULINK). **Результаты:** Проведен расчет и анализ сил ОМП при различных вариантах смещения ротора относительно оси симметрии статора, в том числе при вертикальном сдвиге в направлении действия силы тяжести. Расчеты показали, что силы ОМП могут достигать значительных величин. Выдвинуто предложение об ограничении величины силы ОМП величиной силы при предельно допустимом остаточном дисбалансе. Предложены методы, позволяющие исключить неравномерность зазора на этапе производства. **Практическая значимость:** Результаты исследований могут быть использованы разработчиками при проектировании тягового ВИД, выборе конструкционной величины зазора и назначении допусков в его размерной цепи. Использование ВИД с длительным сроком службы подшипников в системе тягового привода создаст предпосылки для получения нового конкурентоспособного подвижного состава.

Ключевые слова: высокоскоростной электропоезд, тяговый электродвигатель, вентильно-индукторный двигатель, магнитная система, неравномерность, силы одностороннего магнитного притяжения, сила дисбаланса, надежность, подшипники.

Введение

В настоящее время уровень и темп жизни требуют быстрой доставки грузов и пассажиров. Россия, как никакая другая страна, нуждается в транспорте, дающем существенный выигрыш во времени.

Первостепенным фактором развития транспорта страны являются высокоскоростные железнодорожные магистрали (ВСМ).

Сложности при создании ВСМ в основном связаны с производством локомотивов и подвижного состава. Для эксплуатации в качестве высо-

коскоростных поездов на таких магистралях планируется использовать «Ласточки», «Сапсаны», а также высокоскоростные поезда нового поколения.

Однако в связи со сложившейся в стране ситуацией (жесткими западными санкциями), многие иностранные компании, в том числе Siemens, занимающаяся производством и обслуживанием «Сапсанов», покинули российские рынки. Поэтому перед отечественным железнодорожным машиностроением стоит первостепенная задача, заключающаяся в импортозамещении и переходе на самостоятельный выпуск комплектующих для тягового подвижного состава (ТПС) [1–4].

Одним из важнейших элементов ТПС, в том числе и высокоскоростного, является ТЭД. К данным электрическим машинам предъявляются повышенные требования по электрической и механической прочности узлов, что объясняется тяжелыми условиями их эксплуатации [5]. Так, выход из строя ТЭД может привести к аварийной ситуации и срыву в графике движения поездов. Поэтому в качестве ТЭД должны применяться высоконадежные, энергоэффективные и относительно недорогие в изготовлении и обслуживании электрические машины [6], к которым, в частности, относятся ВИД. По многим показателям ВИД не уступают, а где-то и превосходят асинхронные электрические машины.

ВИД может работать в тяжелых условиях, а также при нагрузках, изменяющихся в диапазоне от холостого хода до короткого замыкания.

По КПД данный тип электрических машин превышает асинхронные на 2–7 %. ВИД имеет пологую характеристику КПД с высоким его уровнем на достаточно протяженном интервале мощности — от режимов пуска до скоростей, превышающих номинальные значения. Это обстоятельство имеет особую значимость для ТПС, в том числе высокоскоростных электропоездов, с частыми пусками.

Следующим преимуществом ВИД является достаточно простая конструкция магнитной системы — исключение обмотки на роторе и сосредоточенный тип статорной обмотки. Данное преимущество упрощает процесс изготовления ТЭД, делая его более технологичным и менее затратным с точки зрения производства. Так, в сравнении с асинхронными машинами у ВИД: операция «заливка ротора» отсутствует; катушки обмотки пропитываются без статора. Поэтому затраты на производство ВИД на 25–30 % ниже.

К одному из основных достоинств ВИД можно отнести устойчивость к отказам некоторых элементов. Так, в данных электрических машинах, в отличие от традиционных, отсутствуют магнитные связи между фазами, что дает им возможность независимой работы друг от друга. Поэтому в случае потери фазой работоспособности ВИД продолжает функционировать. При этом выходная мощность снижается на величину вышедшей из строя фазы, однако может быть компенсирована за счет возрастания нагрузки на другие работоспособные фазы.

В настоящее время имеется множество примеров практического применения ВИД в транспортных системах, накоплен большой опыт научных исследований в данной области [7–11], не исключением является и железнодорожный ТПС. Так, исследование ВИД тепловоза описано в [12], а примером практического использования служит электромеханическая трансмиссия модернизированного маневрового тепловоза ТГМ6 (присвоенное наименование ТЭМП 1тт), состоящая из дизель-генераторной установки и двух тяговых ВИД, мощность каждого из которых составляет 320 кВт. Испытания опытного образца электромеханической трансмиссии в 2022 г. показали соответствие КПД уровню 85,4 % [13].

Благодаря своим функциональным особенностям, динамическим характеристикам, а также регулировочным свойствам (большим момен-

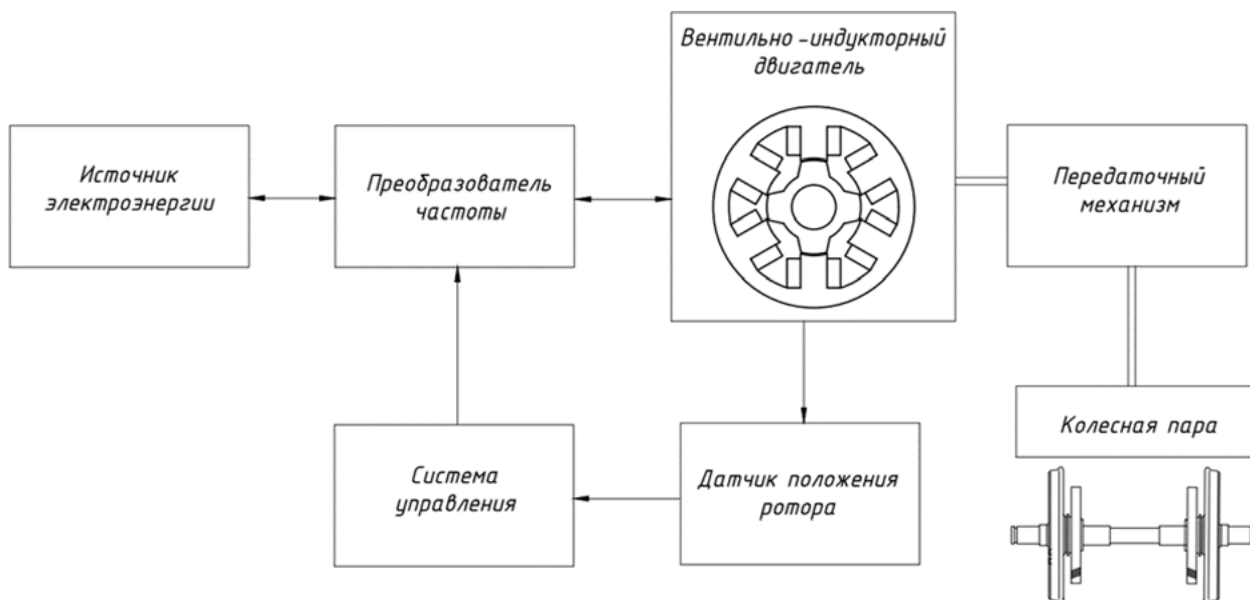


Рис. 1. Схема тягового вентильно-индукторного электропривода

там при низких скоростях, гибкому управлению скоростью, реализацией тормозных режимов), привод на базе ВИД (рис. 1) достаточно перспективен для использования в системе тяги высокоскоростных электропоездов.

Постановка цели и задачи исследования

Обычно воздушный зазор между ротором и статором проектируют минимальным, чтобы получить высокие энергетические показатели. Вследствие этого достаточно сложно выдержать симметрию магнитной системы, так как имеются погрешности при изготовлении деталей и отклонения при сборке машины. Тогда присутствует неравномерность воздушного зазора, вследствие которой появляются так называемые силы одностороннего магнитного притяжения (ОМП). Эти силы, приложенные к подшипникам, в процессе эксплуатации приводят к ускоренному износу и ухудшению виброакустических показателей ВИД.

Исследованию сил ОМП в ВИМ и поиску способов и средств по уменьшению их влияния посвящены научные труды российских и зарубежных ученых. Все они либо направлены на

совершенствование и оптимизацию конструкции ВИМ [14, 15], либо системы управления [16–18].

Основными задачами данной работы являются исследование сил ОМП, присутствующих в тяговом ВИД с неравномерным воздушным зазором, спроектированном для высокоскоростного электропоезда, а также выработка предложений и рекомендаций по ограничению данных сил до допустимых значений.

В качестве объекта исследования был выбран ВИД, магнитная система которого проектировалась в корпусе асинхронного тягового электродвигателя типа 1ТВ2019-1GC02 электропоезда «Сапсан».

Основная часть

Первый этап при проектировании тягового ВИД — выбор наилучшего соотношения зубцов статора и ротора. Для этого произведен сравнительный анализ статических характеристик различных вариантов конфигураций магнитной системы ВИД в режиме насыщения, а также в ненасыщенном режиме работы (рис. 2, 3).

При исследовании использовались электрические машины, имеющие идентичные размеры

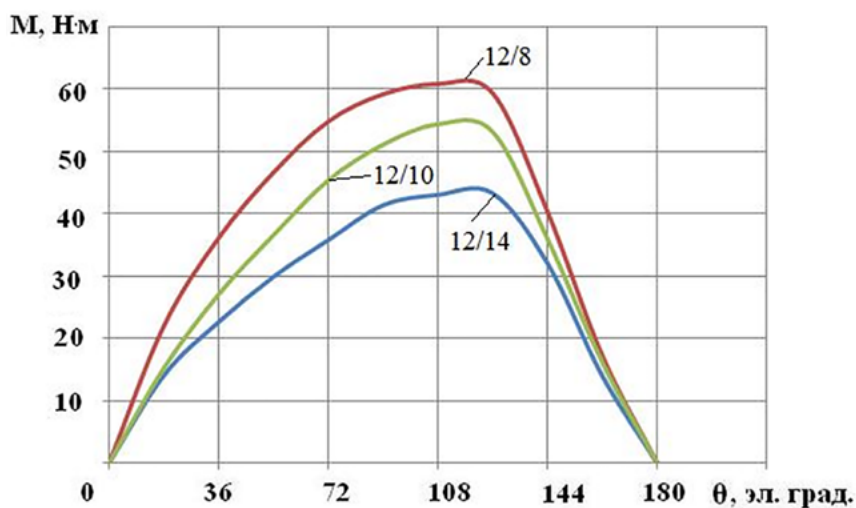


Рис. 2. Характеристики электромагнитного момента $Mэ = f(\theta)$ для магнитных систем ВИД различной конфигурации в насыщенном режиме работы

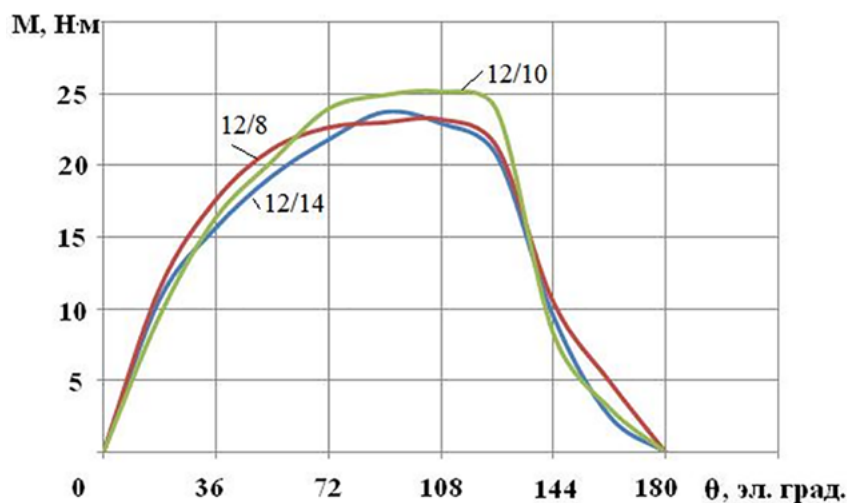


Рис. 3. Характеристики электромагнитного момента $Mэ = f(\theta)$ для магнитных систем ВИД различной конфигурации в ненасыщенном режиме работы

диаметра статора, воздушного зазора, отношение ширины коронки зубца ротора к его зубцовому шагу. Выбран двигательный режим работы. Принято, что ток статорной обмотки не изменяется в пределах полюсного деления ($i = \text{const}$). Из графиков рис. 2 и 3 следует, что наиболее предпочтительным вариантом является конфигурация магнитной системы 12/8, так как в режиме насыщения ее кривая электромагнитного момента $Mэ = f(\theta)$ располагается выше.

Затем, согласно методике сохранения габаритных размеров [19], спроектирована и построена магнитная система ВИД. В качестве дополнительных исходных данных были приняты известные размеры асинхронного ТЭД 1ТВ2019-1GC02 электропоезда «Сапсан» (внешний диаметр статора, длина магнитной системы двигателя). Магнитная система спроектированного тягового ВИД для электропоезда «Сапсан», приведенная на рис. 4, имеет следующие основные размеры:

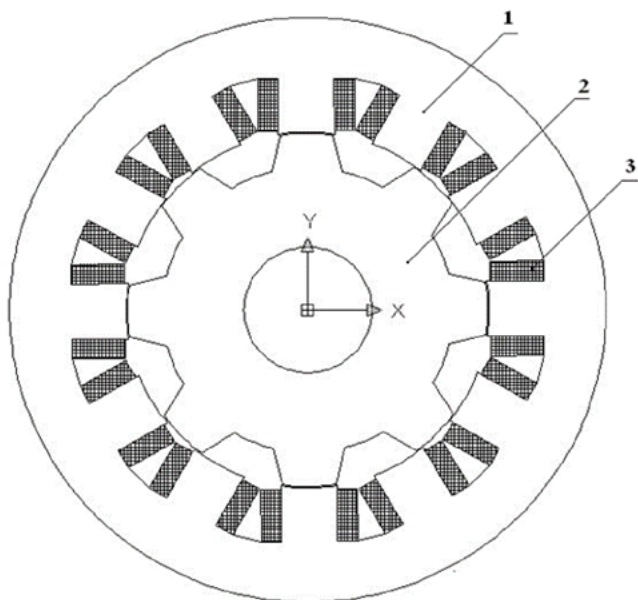


Рис. 4. Магнитная система исследуемого тягового ВИД:
1 — статор; 2 — ротор; 3 — обмотка

- диаметр ротора $D_p = 312,4$ мм;
- наружный диаметр статора $D_c = 515$ мм;
- внутренний диаметр расточки статора $D_a = 313,4$ мм;
- диаметр вала $D_b = 110,5$ мм;

- воздушный зазор $\delta = 1$ мм (на одну сторону);
- число витков — 20 шт.;
- длина пакета статора (ротора) $l = 295$ мм.

Перед проведением расчетов и исследований магнитной системы тягового ВИД (рис. 4) необходимо принять ряд ограничений и допущений. Так, магнитное поле в электрической машине плоскопараллельно и отсутствует за его пределами; не ведется учет взаимного влияния фаз; распределение магнитной индукции не находится в существенной зависимости от гистерезиса и вихревых токов; постоянными в воздушном зазоре являются значения величины неравномерности, а также температуры.

В качестве исходных данных приняты: режим работы ВИМ — номинальный, ограничение по току, частота вращения $n = n_{\text{ном}} = 4100$ об/мин, мощность составила $P_{\text{ном}} = 510$ кВт, ток в токовом коридоре 182,6 А, действующее значение тока 121 А, напряжение $U_d = 2807$ В, конструкционная величина воздушного зазора $d_k = 1,0$ мм (на одну сторону), количество витков катушки — 20, число фаз равно трем.

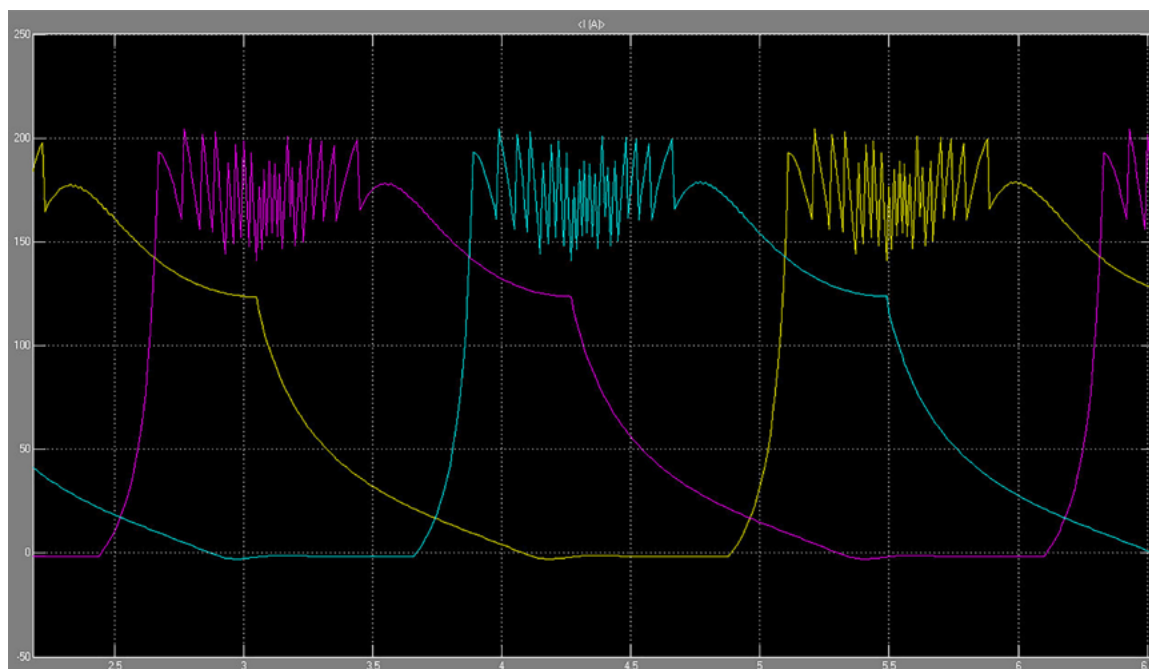


Рис. 5. Фазные токи обмотки проектируемого тягового ВИД

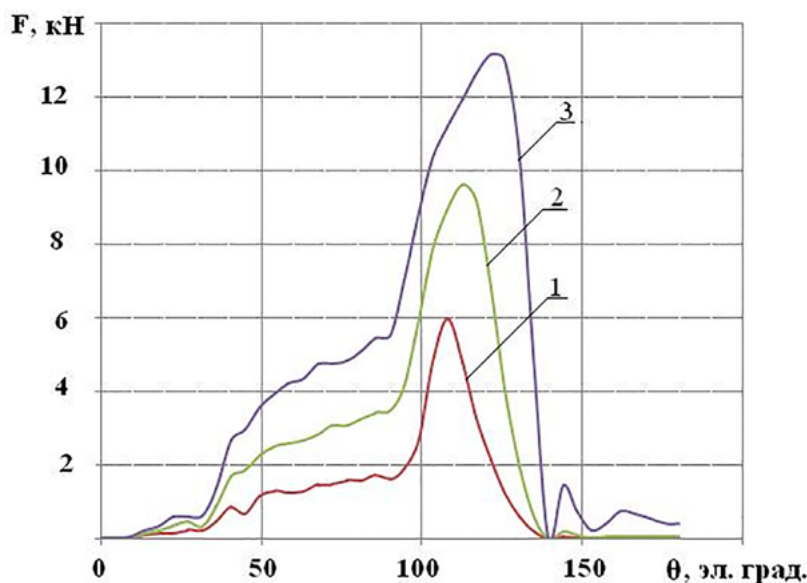


Рис. 6. Силы ОМП при вертикальном смещении ротора по оси Y на:
 l — 0,3 мм; 2 — 0,6 мм; 3 — 0,9 мм

Неравномерность зазора тягового ВИД может иметь различный характер и проявляться в связи с погрешностями в изготовлении элементов его конструкции, а также в процессе эксплуатации [20]. В работе рассмотрены идеализированные варианты смещения ротора относительно оси симметрии статора:

- смещение ротора по оси Y ;
- одновременное смещение ротора по осям X и Y .

Нахождение сил ОМП при заданном смещении проводится в определенной последовательности. В начале для расчетов используется метод конечных элементов, реализованный в программе FEMM. Он дает возможность определить матрицу потокоцепления $\psi = f(i, \theta)$ для каждой катушечной группы тягового ВИД при заданном смещении и выше принятых допущениях. Затем с использованием матрицы потокоцепления *получены* зависимости токов в соответствующих фазах от момента времени $i(t)$ в программе MATLAB (SIMULINK) (рис. 5). После этого при определенном смещении с использованием токов в формате $i(\theta)$ (от угло-

вого положения) в программе FEMM происходит нахождение сил ОМП [20].

Силы ОМП определяются с помощью тензора натяжения Максвелла в магнитном поле:

$$F = \int T_i dS,$$

где T_i — тензор натяжения;

S — поверхность, охватывающая объем.

Получены результаты расчетов сил ОМП при неравномерном воздушном зазоре на всем интервале коммутации фазы А, когда ротор смещен относительно оси симметрии статора по оси Y с шагом 0,3 мм (направление выбрано вертикально вниз — в сторону действия силы тяжести) (рис. 6). График показывает, что сила ОМП имеет довольно резкий возрастающий характер в завершении периода коммутации фазы и, достигая максимума, затем также резко падает. При вращении ротора относительно статора и переходе из рассогласованного положения зубцов в согласованное, в магнитном отношении зубцы все больше взаимодействуют друг с другом.

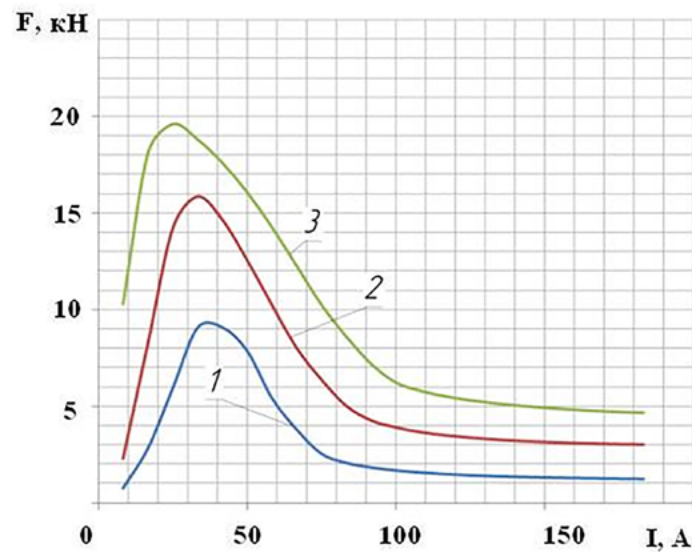


Рис. 7. Результаты расчета сил ОМП при совпадении зубцов и вертикальном смещении ротора по оси Y на:
 1 — 0,3 мм; 2 — 0,6 мм; 3 — 0,9 мм

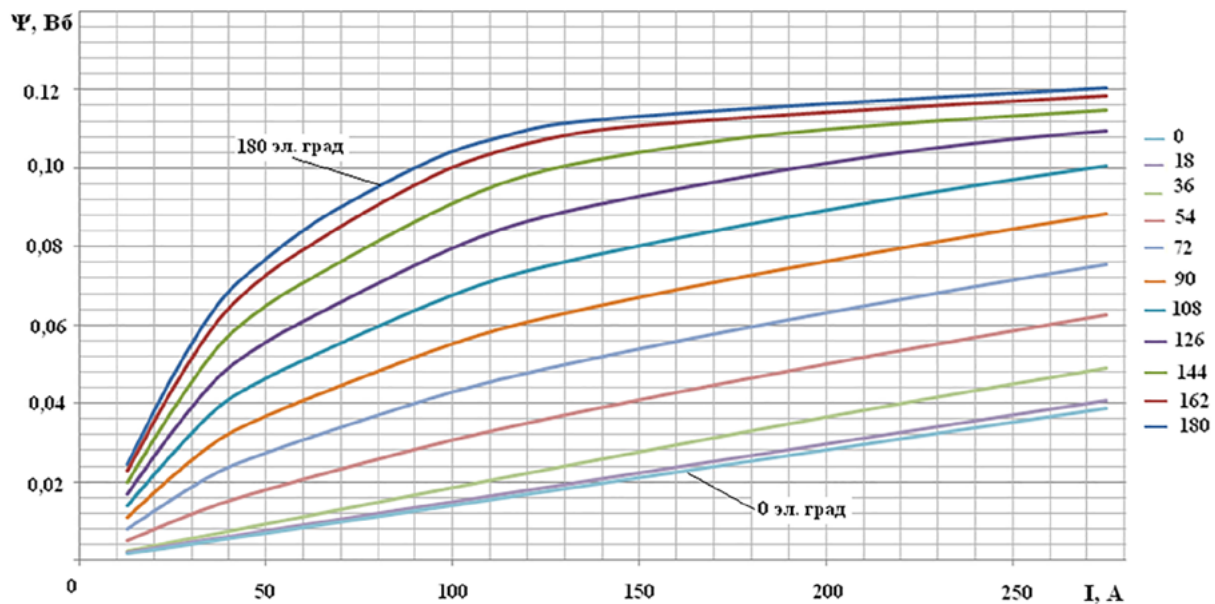


Рис. 8 Кривые намагничивания $\Psi(i, \theta)$

Получены зависимости сил ОМП от тока для магнитной системы тягового ВИД при аналогичных условиях смещения в соосном положении зубцов ротора и статора по отношению друг к другу (рис. 7).

Рис. 7 показывает, что силы ОМП принимают максимальные показатели при определенном

значении тока. Это значение соответствует току конца линейного участка кривой намагничивания (рис. 8).

Рассмотрен другой вариант, когда ротор смещается относительно оси симметрии статора одновременно по двум осям X и Y . Расчеты проводятся в режиме ограничения тока (рис. 9).

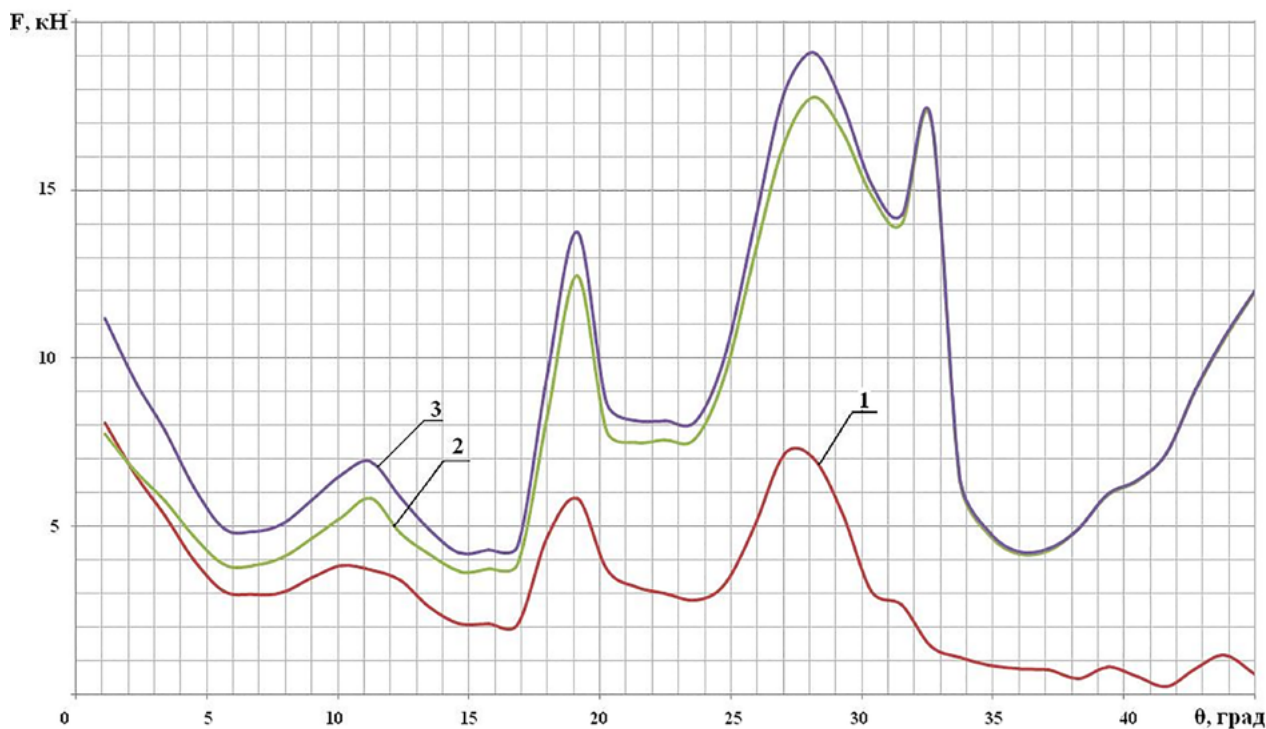


Рис. 9. Расчетные значения сил ОМП при смещении по осям X и Y на 0,5 мм:
1 — по оси X; 2 — по оси Y; 3 — результирующее по модулю

На графике рис. 9 имеется три четко различимых «всплеска» силы ОМП, каждый из которых соответствует определенной фазе А, В, С. Максимальные значения этих «всплесков», приходящиеся на спадающие токи фаз, возрастают при переходе от фазы А к фазе С. Данная закономерность присуща как составляющей силе ОМП по оси X, так и составляющей по оси Y. Кривая сил по оси X при переходе к соосному расположению зубцов ротора и статора снижается вплоть до нулевых значений.

Результаты

Под воздействием сил ОМП растет неравномерность воздушного зазора, а также создаются динамические усилия, влияющие на подшипники тягового ВИД. Аналогичное воздействие на подшипники оказывают силы дисбаланса. Хотя силы дисбаланса и силы ОМП имеют разное происхождение, характер их действия на подшипники один. Предположим, что возможно ограничить амплитудное значение сил ОМП допустимой

силой дисбаланса. Известен ГОСТ ИСО 1940-1—2007, позволяющий регламентировать силу дисбаланса, в котором описывается методика определения силы, приложенной к подшипнику при остаточном дисбалансе.

Обозначим силу при предельно допустимом остаточном дисбалансе F . Тогда, согласно предположению, сделанному выше, допустимая сила ОМП ($F_{\text{ОМП}}$) соответствует равенству $F_{\text{ОМП}} = F$. Далее подбираем класс точности балансировки. Для тягового ВИД (рис. 4) класс точности балансировки по ГОСТ ИСО 1940-1—2007 соответствует G2,5.

$$e_{\text{пер}} \omega = 2,5 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$$

Тогда значение допустимого остаточного дисбаланса определяется:

$$U_{\text{пер}} = 1000 \frac{(e_{\text{пер}} \omega) m}{\omega}$$

где ω — угловая частота вращения, рад·с⁻¹;
 m — масса ротора тягового ВИД, $m = 141$ кг.

$$\omega = \frac{\pi n}{30} = \frac{3,14 \cdot 4100}{30} = 429,13 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}.$$

$$U_{\text{рег}} = 1000 \frac{2,5 \cdot 141}{429,13} = 0,822 \cdot 10^{-3} \text{ Г} \cdot \text{мм} = \\ = 0,822 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}.$$

Следовательно, сила при предельно допустимом остаточном дисбалансе:

$$F = U_{\text{рег}} \omega^2,$$

$$F = 0,822 \cdot 10^{-3} \cdot 429,13^2 = 151 \text{ Н}.$$

Значит, допустимая величина силы ОМП:

$$F_{\text{ОМП}} = F = 151 \text{ Н}.$$

Проведенные в статье расчеты сил ОМП при асимметрии магнитной системы в тяговом ВИД показали, что силы намного превышают допустимое значение. Тогда необходимо проработать особенности производственного процесса тягового ВИД для получения на выходе электрических машин с равномерным воздушным зазором.

Важно при расчетах выбирать самый неблагоприятный вариант смещения (ротор смещается вертикально вниз, в сторону воздействия силы тяжести).

Необходимо исключить (еще на начальном этапе) причины, которые могут привести к асимметрии воздушного зазора. Так, следует назначать допуски на элементы ВИД, в сумме не превышающие допустимой неравномерности зазора. На этапе сборки машины необходимо использовать более точные методы, такие как пуклевка листов; сборка электрической машины с одной установки; особый контроль элементов конструкции ВИД — фиксация имеющихся отклонений в размерах деталей, их сортировка и последующая сборка с учетом отклонений «плюс» и «минус» от фактических размеров.

В случае наличия неравномерности воздушного зазора возможно компенсировать силы ОМП за счет введения искусственно создаваемой асимметрии намагничивающих сил.

Выводы

Обеспечение равномерности воздушного зазора в ВИД за счет контроля точности изготовления элементов конструкции электрической машины, путем внесения изменений в технологический цикл на производстве, даст возможность снизить влияние сил ОМП на подшипники, повысив их надежность. Результаты проведенных исследований могут быть использованы разработчиками при проектировании тягового ВИД, выборе конструкционной величины зазора и назначении допусков в его размерной цепи.

Использование ВИД, имеющего длительный срок службы подшипников, в системе тягового привода создаст предпосылки для появления конкурентоспособного высокоскоростного подвижного состава нового поколения.

Библиографический список

1. Лаврикова Ю. Г. Стратегические основы реализации потенциала импортозамещения на примере железнодорожного машиностроения / Ю. Г. Лаврикова, Л. М. Аверина // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. — 2015. — № 3(39). — С. 85–99.
2. Косой В. В. России нужны высокоскоростные магистрали / В. В. Косой // Транспорт Российской Федерации. — 2016. — № 5(66). — С. 16–20.
3. Постановление Совета Федерации Федерального собрания РФ «О перспективах развития железнодорожного транспорта» от 12 апреля 2023 г. № 156-СФ.
4. Мишарин А. С. Высокоскоростной железнодорожный транспорт как ключевой фактор развития транспортной системы России / А. С. Мишарин // Транспорт Российской Федерации. — 2015. — № 7(57). — С. 7–10.
5. Дорохина Е. С. Анализ методов контроля теплового состояния асинхронного тягового электродвигателя

при испытаниях и эксплуатации / Е. С. Дорохина. — URL: <http://www.rcit.su/article079.html> (дата обращения: 25.08.2023).

6 Шевкунова А. В. Повышение эффективности заводского ремонта тяговых электродвигателей / А. В. Шевкунова, Е. Е. Мирошниченко // Известия ТулГУ. — 2023. — Вып. 4. — С. 564–569.

7. Vrenken R. H. S. Switched reluctance motor drive for full electric vehicles. Part II: Practical implementation / R. H. S. Vrenken et al. // Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monte Carlo, Monaco. — 2013. — Pp. 1–7. — DOI: 10.1109/EVER.2013.6521606.

8. Voron O. A. Improving the Energy Efficiency of Electric Machines For Specialized Railway Rolling Stock / O. A. Voron, A. D. Petrushin // XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED), Ekaterinburg, Russia. — 2021. — Pp. 1–4. — DOI: 10.1109/ACED50605.2021.9462273.

9. Gaber M. Novel Two-phase 4/6 Switched Reluctance Motor Configuration used in All Electric Ships / M. Gaber, R. Yousef, M. S. Hamad // 23rd International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, Egypt. — 2022. — Pp. 1–6. — DOI: 10.1109/MEPCON55441.2022.10021713.

10. Thakre M. Performance Analysis of SRM Based on Asymmetrical Bridge Converter For Plug-in Hybrid Electric Vehicle / M. Thakre, J. Mane, V. Hadke // International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS), Chennai, India. — 2020. — Pp. 1–6. — DOI: 10.1109/ICPECTS49113.2020.9337059.

11. Скрежендевский В. В. Вентильно-индукторный тяговый электродвигатель для тепловоза / В. В. Скрежендевский, А. А. Гулевич // Проблемы безопасности на транспорте: материалы международной научно-практической конференции. — Белорусский государственный университет транспорта, 2015. — С. 80–81.

12. Модернизация тепловоза ТГМ6 (ТЭМП 1тТ). — URL: <http://promelcom.com/modernizaciya-teplovoza-temp-1tt/> (дата обращения: 25.08.2023).

13. Анучин А. С. Разработка цифровых систем эффективного управления комплектов тягового электрооборудования гибридных электрических транспортных средств: дисс. ... д-ра. техн. наук / А. С. Анучин. — М., 2018. — 445 с.

14. Chun G. Investigation of Skewing Effects on the Vibration Reduction of Three-Phase Switched Reluctance Motors / G. Chun, W. Jianhua, S. Mengjie et al. // IEEE Transactions on Magnetic. — 2015. — Vol. 51. — Iss. 9. — Pp. 1–9.

15. Isfahani A. H. Comparison of Mechanical Vibration Between a Double-Stator Switched Reluctance Machine and a Conventional Switched Reluctance Machine / A. H. Isfahani, B. Fahimi // IEEE Transactions on Magnetic. — 2014. — Vol. 50. — Iss. 2. — Pp. 293–296.

16. Zhu Z. Q. Analytical model for predicting maximum reduction levels of vibration and noise in switched reluctance machine by active vibration cancellation / Z. Q. Zhu, X. Liu., Z. Pan // IEEE Trans. Energy Convers. — 2011. — Vol. 26. — Iss. 1. — Pp. 36–45.

17. Makino H. Digital PWM-control-based active vibration cancellation for switched reluctance motors / H. Makino, T. Kosaka, N. Matsui // IEEE Trans. Ind. — 2015. — Vol. 51. — Iss. 6. — Pp. 4521–4530.

18. Cao X. Independent control of average torque and radial force in bearingless switched-reluctance motors with hybrid excitations / X. Cao, Z. Deng, G. Yang et al. // IEEE Trans. Power Electron. — 2009. — Vol. 24. — Iss. 5. — Pp. 1376–1385.

19. Могила В. С. Особенности расчета тяговых вентильно-индукторных двигателей / В. С. Могила, Т. С. Королек // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. — 2011. — № 2(23). — С. 21–25.

20. Мирошниченко Е. Е. Оценка влияния сил одностороннего магнитного притяжения на надежность подшипникового узла вентильно-индукторной электрической машины / Е. Е. Мирошниченко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. — 2022. — Т. 22. — № 3. — С. 39–51.

Дата поступления: 28.08.2023

Решение о публикации: 30.10.2023

Контактная информация:

МИРОШНИЧЕНКО Екатерина Евгеньевна — канд. техн. наук, доц.; ekaterinailjasova@rambler.ru

Prospective Applying of a Switched Reluctance Motor in the Traction System of a High-Speed Electric Train

E. E. Miroshnichenko

Rostov State Transport University, 2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., 344038, Rostov-on-Don

For citation: Miroshnichenko E. E. Prospective Applying of a Switched Reluctance Motor in the Traction System of a High-Speed Electric Train // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 1004–1015. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-1004-1015

Summary

Purpose: The use of switched reluctance motor (SRM) in the traction system of a high-speed electric train by increasing the performance of its bearings. Using SRM as a traction electric motor, the machine-building complex can solve problems related to the import substitution of components for rolling stock. **Methods:** The main reasons for the wear of the bearing assembly are the forces of one-way magnetic attraction (OMA). These forces occur when the air gap is asymmetric due to errors in the manufacture of parts and deviations in the assembly of the electrical machine. The OMA forces at a certain displacement are determined using the Maxwell stress tensor. To achieve this, the finite element method embodied in the FEMM program has been used. The dependences of the currents in the corresponding phases on the moment of time required to find the forces have been obtained using the MATLAB program (SIMULINK). **Results:** Calculation and analysis of OMA forces is carried out at various variants of rotor displacement relative to the axis of symmetry of the stator, including at vertical shift in the direction of gravity action. Calculations have shown that OMA forces can reach significant values. A proposal has been put forward to limit the magnitude of the OMA force to the magnitude of the force at the maximum permissible residual unbalance. Methods are proposed to eliminate irregularity of the air gap at the stage of production. **Practical significance:** The results of the studies can be used by the developers in the design of the traction SRM, the selection of the structural value of the gap and the assignment of tolerances in its dimensional chain. The use of SRM with a long life of bearings in the traction drive system will create the prerequisites for obtaining a new competitive rolling stock.

Keywords: High-speed electric train, traction motor, switched reluctance motor, magnetic system, irregularity, forces of one-way magnetic attraction, unbalance force, reliability, bearings.

References

1. Lavrikova Yu. G. Strategicheskiye osnovy realizatsii potentsiala importozameshcheniya na primere zheleznodorozhnogo mashinostroyeniya [Strategic foundations for the implementation of the potential of import substitution on the example of railway engineering]. *Ekonomicheskiye i sotsial'nyye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz* [Economic and social changes: facts, trends, forecast]. 2015, Iss. 3(39), pp. 85–99. (In Russian)
2. Oblique V. V. Rossii nuzhny vysokoskorostnyye magistrali [Russia needs high-speed lines]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2016, Iss. 5(66), pp. 16–20. (In Russian)
3. *Postanovlenie Soveta Federatsii Federal'nogo sobraniya RF "O perspektivakh razvitiya zheleznodorozhnogo transporta" ot 12 aprelya 2023 g. № 156-SF* [Resolution of the Federation Council of the Federal Assembly of the Russian Federation "On the prospects for the development of railway transport" dated April 12, 2023 № 156-SF]. (In Russian)
4. Misharin A. S. Vysokoskorostnoy zheleznodorozhnyy transport kak klyuchevoy faktor razvitiya transportnoy sistemy Rossii [High-speed railway transport as a key factor in the development of the Russian transport system]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2015, Iss. 7(57), pp. 7–10. (In Russian)
5. Dorohina E. S. *Analiz metodov kontrolya teplovogo sostoyaniya asinkhronnogo tyagovogo elektrodvigatelya pri ispytaniyakh i ekspluatatsii* [Analysis of methods for monitoring the thermal state of an asynchronous traction motor

during testing and operation]. Available at: <http://www.rcit.su/article079.html> (accessed: August 25, 2023). (In Russian)

6. Shevkunova A. V., Miroshnichenko E. E. Povysheniye effektivnosti zavodskogo remonta tyagovykh elektrodvigateley [Improving the efficiency of factory repair of traction motors]. *Izvestiya TulGU* [News of TulGU]. 2023, Iss. 4, pp. 564–569. (In Russian)

7. Vrenken R. H. S. et al Switched reluctance motor drive for full electric vehicles. Part II: Practical implementation. Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monte Carlo, Monaco, 2013. pp. 1–7. DOI: 10.1109/EVER.2013.6521606.

8. Voron O. A., Petrushin A. D. Improving the Energy Efficiency of Electric Machines For Specialized Railway Rolling Stock. XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED), Ekaterinburg, Russia, 2021, pp 1–4. DOI: 10.1109/ACED50605.2021.9462273.

9. Gaber M., Yousef R., Hamad M. S. Novel Two-phase 4/6 Switched Reluctance Motor Configuration used in All Electric Ships. 23rd International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, Egypt, 2022, pp. 1–6. DOI: 10.1109/MEPCON55441.2022.10021713.

10. Thakre M., Mane J., Hadke V. Performance Analysis of SRM Based on Asymmetrical Bridge Converter For Plug-in Hybrid Electric Vehicle. International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS), Chennai, India, 2020, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICPECTS49113.2020.9337059.

11. Skrezhendevsky V. V., Gulevich A. A. Ventil'no-induktornyy tyagovyy elektrodvigatel' dlya teplovoza [Switched reluctance traction electric motor for diesel locomotive]. *Problemy bezopasnosti na transporte. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems of safety in transport. Materials of the international scientific-practical conference. Belarusian State University of Transport]. 2015, pp. 80–81.

12. *Modernizatsiya teplovoza TGM6 (TEMP 1tt)* [Modernization of diesel locomotive TGM6 (TEMP 1tt)]. Available at: <http://promelcom.com/modernizatsiya-teplovoza-temp-1tt/> (accessed: August 25, 2023). (In Russian).

13. Anuchin A. S. *Razrabotka tsifrovyykh sistem effektivnogo upravleniya komplektov tyagovogo elektrooborudovaniya gibridnykh elektricheskikh transportnykh sredstv: diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Development of digital systems for effective control of traction electrical equipment for hybrid electric

vehicles: diss. ... dr. tech. sciences]. Moscow, 2018, 445 p. (In Russian)

14. Chun G., Jianhua W., Mengjie S. et al. Investigation of Skewing Effects on the Vibration Reduction of Three-Phase Switched Reluctance Motors. *IEEE Transactions on Magnetic*, 2015, vol. 51, Iss. 9, pp. 1–9.

15. Isfahani A. H., Fahimi B. Comparison of Mechanical Vibration Between a Double-Stator Switched Reluctance Machine and a Conventional Switched Reluctance Machine. *IEEE Transactions on Magnetic*, 2014, vol. 50, Iss. 2, pp. 293–296.

16. Zhu Z. Q., Liu X. Pan Analytical model for predicting maximum reduction levels of vibration and noise in switched reluctance machine by active vibration cancellation. *IEEE Trans. Energy Convers*, 2011, vol. 26, Iss. 1, pp. 36–45.

17. Makino H., Kosaka T., Matsui N. Digital PWM-control-based active vibration cancellation for switched reluctance motors. *IEEE Trans. Ind*, 2015, vol. 51, Iss. 6, pp. 4521–4530.

18. Cao X., Deng Z., Yang G. et al. Independent control of average torque and radial force in bearingless switched-reluctance motors with hybrid excitations. *IEEE Trans. Power Electron*, 2009, vol. 24, Iss. 5, pp. 1376–1385.

19. Mogila V. S., Korolek T. S. Osobennosti rascheta ventil'no-induktornykh dvigateley [Features of calculation traction switched reluctance motors]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: Nauka i transport* [Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport]. 2011, Iss. 2(23), pp. 21–25.

20. Miroshnichenko E. E. Otsenka vliyaniya sil odnostoronnego magnitnogo prityazheniya na nadezhnost' podshipnikovogo uzla ventil'no-induktornoy elektricheskoy mashiny [Evaluation of the influence of the forces of one-sided magnetic attraction on the reliability of the bearing assembly of a switched reluctance electric machine]. *Vestnik YUUrGU. Seriya "Energetika"* [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering]. 2022, vol. 22, Iss. 3, pp. 39–51. (In Russian)

Received: August 28, 2023

Accepted: October 30, 2023

Author's information:

Ekaterina E. MIROSHNICHENKO —
PhD in Engineering, Associate Professor;
ekaterinailjasova@rambler.ru