

ВЫСОКОНАДЕЖНЫЙ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Создание условий для применения вентильно-индукторного двигателя в системе тягового электропривода подвижного состава железных дорог за счет повышения надежности работы его подшипников служит основной целью данной научной статьи. Разработка алгоритма, позволяющего проводить расчеты характеристик тягового вентильно-индукторного двигателя на этапах конструирования и производства, учитывающего силы одностороннего магнитного притяжения, является основной задачей исследований. Изучены силы одностороннего магнитного притяжения, возникающие в воздушном зазоре электропривода при двух видах его неравномерности. Отличительная особенность статьи состоит в предложении об ограничении величины силы одностороннего магнитного притяжения величиной силы при предельно допустимом остаточном дисбалансе. По итогам работы получен алгоритм определения характеристик тягового вентильно-индукторного двигателя уникальный в своем роде, позволяющий снизить влияние сил одностороннего магнитного притяжения на подшипники. Заключено, что использование вентильно-индукторного двигателя с длительным сроком службы подшипников в системе тягового электропривода создаст предпосылки для получения нового конкурентоспособного железнодорожного подвижного состава.

Ключевые слова: железнодорожный подвижной состав, тяговый вентильно-индукторный электродвигатель, сила одностороннего электромагнитного притяжения, сила дисбаланса, подшипники, надежность.

Введение. Безопасность и стабильность процесса перевозок на железнодорожном транспорте возможна при обеспечении бесперебойной работы такого важного узла, как тяговый электродвигатель (ТЭД). Использование в системе тяги энергоэффективного и надежного ТЭД, обладающего высокой ремонтпригодностью, даст предпосылки для создания принципиально нового и конкурентоспособного подвижного состава.

Применение вентильно-индукторного двигателя (ВИД) в составе тягового электропривода железнодорожного подвижного состава довольно перспективно, на что указывает ряд его преимуществ. Так, ВИД прост при изготовлении, ремонтпригоден и надежен, имеет высокое значение КПД, возможность работы при высоких температурах и в агрессивных средах (при условии герметизации ротора). Помимо этого, данный тип двигателя обладает оптимальной для тягового электропривода естественной механической характеристикой. Затраты на производство ВИД значительно ниже аналогичных затрат на производство традиционных ТЭД в связи с невысокой стоимостью их материалов. Известны примеры практического использования вентильно-индукторных электрических машин (ВИМ) большой

мощности, превышающей 500 кВт [1, 2]. Имеются разработки, связанные с применением ВИМ в составе электропривода транспортных средств, в том числе подвижного состава железных дорог [3].

Высокий уровень шума и вибраций, а также износ подшипниковых узлов (ПУ) — основные недостатки данного типа электрических машин, препятствующие их серийному производству и широкому применению [4, 5]. Практика эксплуатации ВИМ общепромышленного назначения показывает, что их «слабым местом» является подшипниковый узел. Так, из 100 двухфазных ВИД мощностью 2,2 кВт, предназначенных для приводов насосов горячего водоснабжения, все вышли из строя спустя год работы по причине отказа подшипников. Другим примером является ВИД привода шаровой мельницы, мощность которого соответствовала 1,2 МВт. Период работы данного экземпляра составил 9 месяцев, а выход из строя также был обусловлен отказом подшипников [6].

Следовательно, цель данной научной статьи состоит в создании условий для применения ВИД в системе тягового электропривода подвижного состава за счет повышения надежности работы его подшипников.

Для того, чтобы ВИД имел высокие энергетические показатели, при проектировании величину зазора стремятся минимизировать. Однако на производстве, в связи с невозможностью абсолютно точного изготовления деталей электрической машины, а также наличием погрешностей при сборке, в том числе отклонений при размещении ротора, имеется неравномерность воздушного зазора. Тогда, вследствие данной неравномерности, происходит возникновение сил одностороннего магнитного притяжения (ОМП) в зазоре между статором и ротором электрической машины. Под воздействием данных сил скорость износа подшипников возрастает, увеличиваются шум и вибрации.

Исследованию сил ОМП в ВИМ, а также поиску способов и средств по уменьшению их влияния посвящены научные труды российских и зарубежных ученых. Все они направлены либо на совершенствование и оптимизацию конструкции ВИМ, либо системы управления.

Имеется достаточный объем публикаций, где представлены различные варианты конструкции статора и ротора. Так, эффективным способом снижения сил ОМП, а следовательно, и вибрации, является использование статора с перекосом в конструкции ВИМ [7]. Снизить влияние сил ОМП позволяет конструкция ВИМ, содержащего двойной статор [8].

Подход, связанный с совершенствованием технологии систем управления, проще в реализации. Так, в [9, 10] представлен способ контроля силы ОМП путем независимого управления полюсными токами. Здесь для получения уменьшенной величины силы ОМП предложена схема возбуждения фазы синусоидальным током. Недостатком данного способа является использование большого числа переключателей питания, что, в свою очередь, снижает эффективность всей системы, а также увеличивает ее стоимость.

Снизить значение сил ОМП, вызывающих вибрацию и износ подшипников, в [11, 12] предлагается путем применения двухступенчатой коммутации. Также управлять величиной силы ОМП в ВИМ возможно за счет использования так называемого «гибридного возбуждения» [13], особенностью которого является наличие дополнительной обмотки левитации.

Основная часть. Задача исследований, представленных в данной работе, состоит в разработке алгоритма расчета параметров и характеристик тяговых ВИД, позволяющего совершенствовать их технологию изготовления, повысить надежность подшипников и улучшить виброакустические показатели. При этом необходимо провести исследования сил ОМП, возникающих в воздушном зазоре при его неравномерности, которые, в свою очередь, оказывают воздействие на подшипники электрической машины.

В качестве объекта исследования был выбран ВИД, магнитная система которого (рис. 1) спроектирована в корпусе электродвигателя типа ДТА-1200А, предназначенного для тягового привода электровоза двойного питания ЭП20. В номинальном одноимпульсном режиме работы тяговый ВИД имеет следующие параметры: мощность на валу $P_{ном} = 1300$ кВт; напряжение составляет $U_d = 2200$ В; частота вращения принята $n_{ном} = 1766$ об/мин.

Перед тем как проводить расчеты, необходимо принять ряд ограничений и допущений: магнитное поле в электрической машине плоскопараллельно

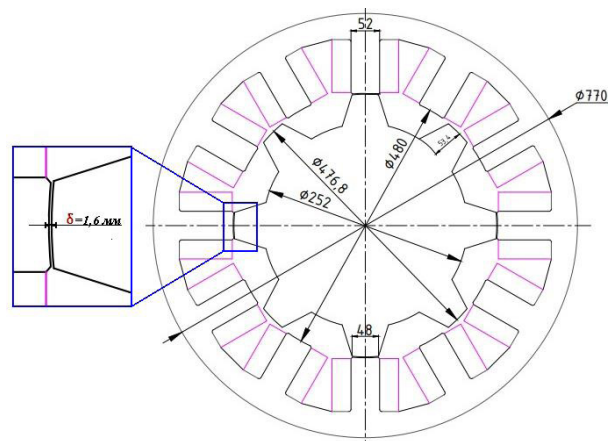


Рис. 1. Конфигурация магнитной системы тягового ВИД

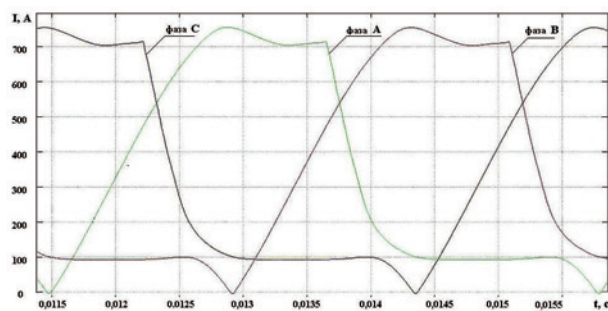


Рис. 2. Фазные токи обмотки тягового ВИД

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.

Неравномерность зазора тягового ВИД может иметь различный характер и проявляться по причинам, связанным с изготовлением элементов его конструкции, а также в процессе эксплуатации. Поэтому, остановимся на исследовании двух идеализированных видов смещения ротора тягового ВИД. Первый вид заключается в смещении ротора и вращении относительно его оси симметрии. Второй — происходит смещении ротора и вращение уже относительно оси симметрии статора. Значение величины смещения по осям X и Y декартовой системы координат примем равным 0,4 мм [14].

Нахождение сил ОМП при заданном смещении происходит в определенной последовательности. Вначале для расчетов используется метод конечных элементов. Представленный метод дает возможность определить матрицу потокосцепления $\psi = f(i, \theta)$ для фазы тягового ВИД при выше принятых допущениях (рис. 1). Затем с использованием матрицы потокосцепления в программе MATLAB (SIMULINK) определяются фазные токи в зависимости от момента времени $i(t)$, данные на рис. 2. Далее, в программе FEMM происходит расчет сил ОМП и электромагнитного момента при заданной неравномерности, используются при этом фазные токи в зависимости от углового положения в формате $i(\theta)$ (рис. 3).

На рис. 3 даны результаты расчета сил ОМП и момента на валу тягового ВИД для случая, когда ось вращения перемещается вместе с осью симме-

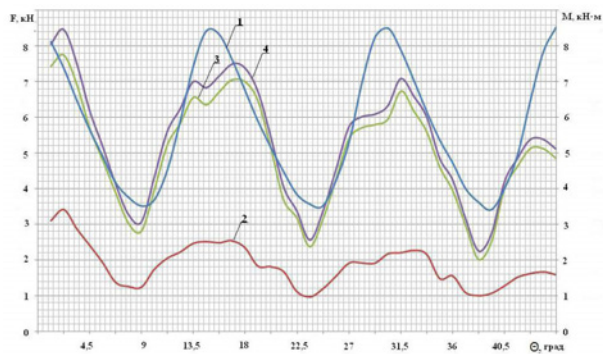


Рис. 3. Характеристики тягового ВИД со смещением ротора и вращением относительно его оси: 1 — электромагнитный момент; 2,3 — силы ОМП по осям X и Y; 4 — результирующая сила ОМП (значение по модулю)

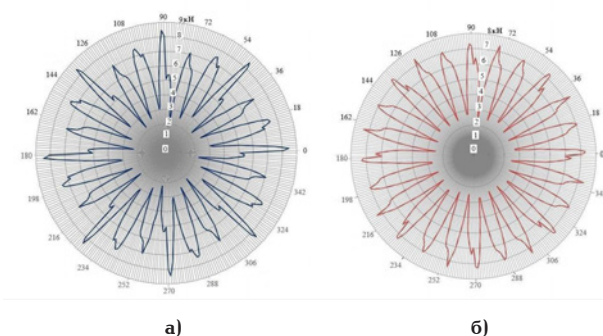


Рис. 4. Результирующая сила ОМП в полярной системе координат при смещении ротора, вращающегося относительно оси симметрии: а) ротора; б) статора

трии смещенного ротора по осям X и Y на 0,4 мм. Так, величина силы ОМП по оси X на интервале от рассогласованного к согласованному положению уменьшается, но в незначительной степени. Иначе ведет себя составляющая силы ОМП по оси Y и, соответственно, результирующее значение сил ОМП. Их величины значительно изменяются на всем рассматриваемом интервале. Максимальные значения результирующей силы приходятся как раз на завершение периода коммутации фазы.

На рис. 4а найденные значения результирующей силы ОМП (в кН), для наглядности, изображаем в полярной системе координат. Такие же расчеты были проведены для второго варианта неравномерности зазора, когда вращение смещенного ротора осуществляется относительно оси симметрии статора. Значения результирующей силы ОМП (в кН) для данного случая в полярной системе координат показаны на рис. 4б.

В первом случае (рис. 4а) величина смещения будет зависеть от допусков на изготовление элементов конструкции тягового ВИД. Второй случай смещения (рис. 4б) связан с зазором в подшипнике, возрастающим постепенно в связи с износом элементов подшипника. Из рис. 4 следует, что первый случай смещения ротора, вращающегося относительно его оси вращения, является худшим по отношению ко второму и приводит к возрастающему износу подшипников и их выводу из строя.

Под воздействием сил ОМП растет неравномерность воздушного зазора, а также создаются динамические усилия, влияющие на подшипники тягового ВИД. Аналогичное воздействие на подшип-

ники оказывают силы дисбаланса. Хотя силы дисбаланса и силы ОМП имеют разное происхождение характер их действия на подшипники один. Предположим, что возможно ограничить амплитудное значение силы 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. 1) класс точности балансировки соответствует G 2,5 по ГОСТ ИСО 1940-1-2007 [15]

$$e_{\text{пер}} \cdot \omega = 2,5 \text{ мм/с.}$$

Тогда, значение допустимого остаточного дисбаланса определяется:

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

где ω — угловая частота вращения, $\text{рад} \cdot \text{с}^{-1}$;
 m — масса ротора тягового ВИД, $m = 415 \text{ кг}$.

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3,14 \cdot 1766}{30} = 184,84 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}.$$

$$U_{\text{пер}} = 1000 \frac{2,5 \cdot 415}{184,84} =$$

$$= 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ г} \cdot \text{мм} = 5,6 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}.$$

Следовательно, сила при предельно допустимом остаточном дисбалансе:

$$F = U_{\text{пер}} \cdot \omega,$$

$$F = 5,6 \cdot 10^{-3} \cdot 184,84^2 = 191,3 \text{ Н}.$$

Значит, допустимая величина силы ОМП:

$$F_{\text{ОМП}} = F = 191,3 \text{ Н}.$$

По результатам, представленным на рис. 3 и рис. 4, можно заключить, что значения сил, полученных расчетным путем, намного превышают их допустимые значения. Тогда важно проработать особенности производственного процесса тягового ВИД для получения на выходе электрических машин с равномерным воздушным зазором.

Для получения тягового ВИД с равномерным воздушным зазором далее в работе приведен алгоритм, позволяющий рассчитывать характеристики электрической машины на этапах конструирования и производства, при этом ведется учет сил ОМП (рис. 5).

Особенность предложенного в работе алгоритма заключается в том, что он нацелен на решение задач, связанных с производственным процессом тяговых ВИД.

Новизна данного алгоритма состоит в его особых блоках. Наличие блока, где происходит определение направления смещения ротора в сторону действия силы тяжести, является его особенностью. На этом этапе проверяется вся размерная цепь путем анализирования информации о допусках,

КД – конструкторская документация;
 $\Delta_{\text{тек}}$ – текущее значение допусков;
 $\Delta_{\text{пр.доп}}$ – предельно допустимое значение допусков;
 $F_{\text{тяж}}$ – сила тяжести;
 $\psi(i, \theta)$ – потокосцепление фазы;
 $F_{\text{ОМП расч}}$ – расчетное значение силы ОМП;
 $F_{\text{ОМП доп}}$ – допустимая величина силы ОМП;
 F – сила при предельно допустимом остаточном дисбалансе;
 $\eta_{\text{тек}}$ – текущее значение КПД;
 $\eta_{\text{доп}}$ – допустимое значение КПД;
 $\sigma_{\text{тек}}$ – текущее значение смещения;
 σ_{max} – максимально возможное смещение;
 $L_{\text{доп}}$ – допустимый уровень шума;
 $L_{\text{тек}}$ – текущее значение шума.

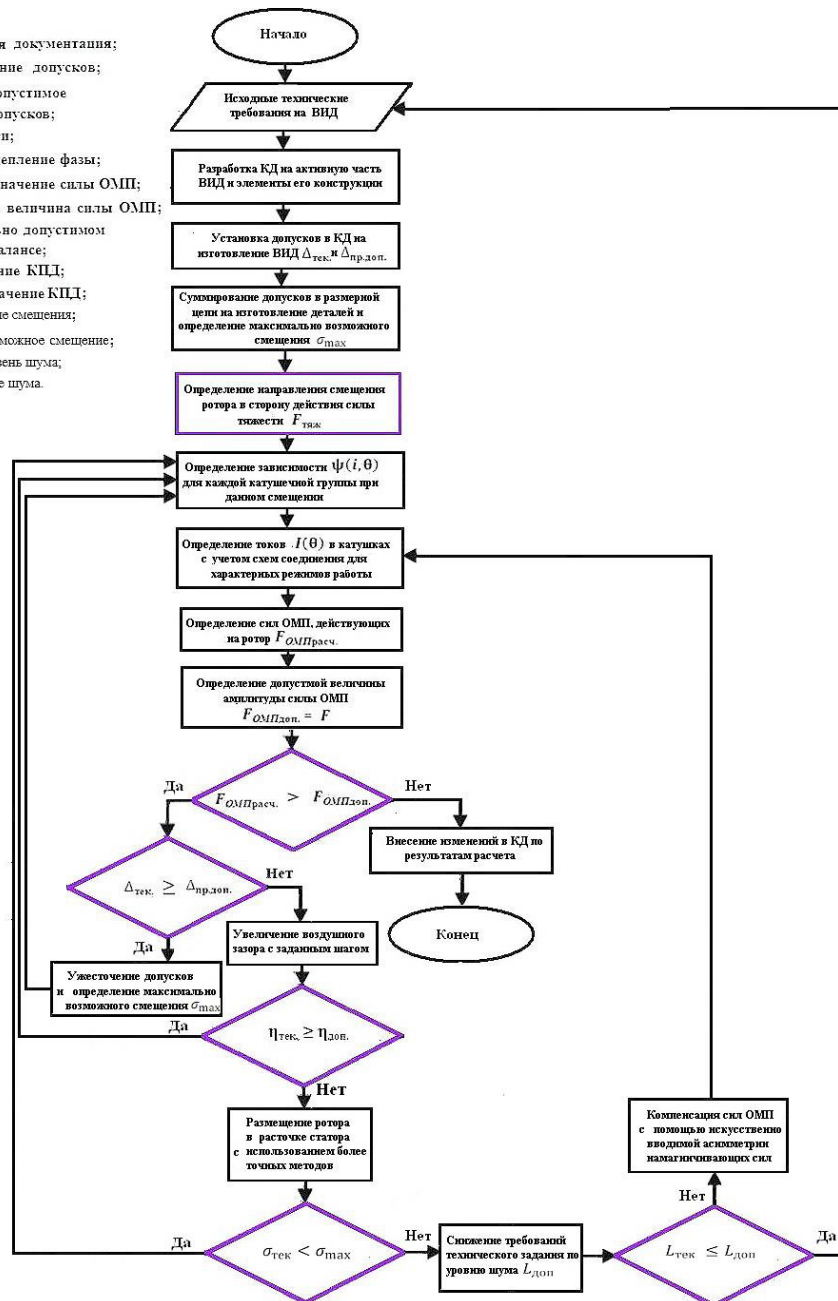


Рис. 5. Алгоритм определения характеристик тягового ВИД

указанных в конструкторской документации (КД), а затем определяется наиболее неблагоприятный вариант сборки тягового ВИД (случай, при котором ротор перемещается в сторону действия силы тяжести).

Следующая особенность алгоритма заключается в блоке, позволяющем судить о влиянии полученных расчетных значений сил ОМП на период эксплуатации тягового ВИД. На данном этапе предлагается производить сравнение расчетной силы ОМП с амплитудным значением силы, оказывающей влияние на ПУ при остаточном дисбалансе [16]. Так, известен ГОСТ ИСО 1940-1-2007, который позволяет регламентировать силу дисбаланса [15]. Из него заключено, что, если сила дисбаланса не будет превышать допустимую величину, тогда тяговый ВИД будет находиться в работоспособном состоянии достаточно длительный период времени.

Данный алгоритм итеративен. Так, в случае если значение сил ОМП не соответствует требуемым условиям, следует установить более жесткие требова-

ния, а затем проводить процедуру итерации, пока значение сил ОМП, полученных расчетным путем, не будет соответствовать условию:

$$F_{\text{ОМП расч.}} \leq F_{\text{ОМП доп.}} \quad (1)$$

где $F_{\text{ОМП расч.}}$ — расчетное значение сил ОМП;
 $F_{\text{ОМП доп.}}$ — допустимое значение сил ОМП.

Если данное условие не выполняется, происходит переход к следующему блоку (рис. 5).

В нем сравниваются текущее и предельно допустимое значения допусков на элементы конструкции. Если условие

$$\Delta_{\text{тек}} \geq \Delta_{\text{пр.доп.}} \quad (2)$$

где $\Delta_{\text{тек}}$ — текущее значение допусков; $\Delta_{\text{пр.доп}}$ — предельно допустимое значение допусков выполняется, то следует ужесточать допуски и определять максимально возможное смещение. Далее процесс повторяется (рис. 5).

В случае невыполнения условия (2), когда отсутствует возможность ужесточения допусков по производственным причинам, следует увеличивать воздушный зазор с определенным шагом между ротором и статором тягового ВИД. Обратной стороной данных действий является уменьшение КПД электрической машины. При выполнении условия

$$\eta_{\text{тек.}} \geq \eta_{\text{доп.}} \quad (3)$$

где $\eta_{\text{тек.}}$ — текущее значение КПД; $\eta_{\text{доп.}}$ — допустимое значение КПД, для тягового ВИД с увеличенным воздушным зазором весь алгоритм необходимо пройти заново, пока условие (1) не выполнится.

В случае невыполнения условия (3), согласно представленному алгоритму, имеются три варианта дальнейших действий. Во-первых, возможно изменить требования по уровню КПД в сторону его уменьшения, если это устраивает сторону заказчика. Во-вторых, использовать методы, позволяющие как можно точнее разместить ротор в расточке статора тягового ВИД [17]. В-третьих, произвести компенсацию сил ОМП, используя вводимую искусственным способом асимметрию намагничивающих сил [15, 16].

Заключение. Предложенный в работе алгоритм уникален в своем роде. Он позволяет контролировать точность изготовления элементов конструкции тягового ВИД и обеспечивать равномерность воздушного зазора путем внесения изменений в технологический цикл на производстве. Это даст возможность снизить влияние сил ОМП на подшипники, повысив их надежность.

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

Библиографический список

1. Романовский В. В., Никифоров Б. В., Макаров А. М. Вентильно-индукторный привод ВИП-1000-1100 в системе электродвижения // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала Макарова. 2019. Т. 11, № 3. С. 573–580. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-573-581.
2. Темиров А. П., Нгуен К. К. Исследование вентильно-индукторного двигателя большой мощности двухпакетной конструкции для пульповых насосов ГРАТ-1800/67 горнорудного оборудования // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 1. С. 54–62.
3. Никифоров Н. В., Пахомин С. А., Птах Г. К. Вентильно-индукторные двигатели для тяговых электроприводов // Электричество. 2007. № 2. С. 34–38.
4. Fang G., Scalcon F. P., Xiao D. [et al.] Advance control of switched reluctance motors (SRMs): a review on current regulation, torque control and vibration suppression // IEEE Open Journal of Industrial Electronics Society. 2021. № 2. P. 280–301. DOI: 10.1109/OJIES.2021.3076807.
5. Бруслиновский Б. В., Евтодий А. А. Снижение шума вентильно-индукторного двигателя при широтно-импульсном управлении со случайным изменением параметров // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 8. С. 38–46.
6. Анучин А. С. Разработка цифровых систем эффективного управления комплектов тягового электрооборудования гибридных электрических транспортных средств: дис. ... д-ра. техн. наук. Москва, 2018. 445 с.
7. 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, № 9. P. 1–9. DOI: 10.1109/TMAG.2015.2441035.

8. 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, № 2. P. 293–296. DOI: 10.1109/TMAG.2013.2286569.

9. Lin F.-C., Yang S.-M. Analysis and modeling of the radial force in a switched reluctance motor with sinusoidal excitations // The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems. 2003. Vol. 2. P. 938–943. DOI: 10.1109/PEDS.2003.1283094.

10. Lin F.-C., Yang S.-M. Instantaneous Shaft Radial Force Control with Sinusoidal Excitations for Switched Reluctance Motors // Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Seattle, WA, USA. 2004. P. 424–430. DOI: 10.1109/IAS.2004.1348442.

11. Zhu Z. Q., Liu X., Pan Z. 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, № 1. P. 36–45. DOI: 0.1109/TEC.2010.2087336.

12. Makino H., Kosaka T., Matsui N. Digital PWM-control-based active vibration cancellation for switched reluctance motors // IEEE Transactions on Industry Applications. 2015. Vol. 51, № 6. P. 4521–4530. DOI: 10.1109/TIA.2015.2448065.

13. 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 Transactions on Power Electronics. 2009. Vol. 24, № 5. P. 1376–1385. DOI: 10.1109/TPEL.2009.2016568.

14. ГОСТ 24810-2013. Подшипники качения. Внутренние зазоры. Введ. 2015–01–01. Москва: Стандартинформ, 2014. 19 с.

15. ГОСТ ИСО1940-1-2007. Вибрация. Требования к качеству балансировки жестких роторов. Часть 1. Определение допустимого дисбаланса. Введ. 2008–07–01. Москва: Стандартинформ. 2008. 27 с.

16. Глинкин С. А., Захаров А. В. Опыт конструирования и освоения производства опытно-промышленной партии вентильно-индукторных двигателей // Вестник ИГЭУ. 2015. Вып. 1. С. 14–19.

17. Мирошниченко Е. Е. Оценка влияния сил одностроннего магнитного притяжения на надежность подшипникового узла вентильно-индукторной электрической машины // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2022. Т. 22, № 3. С. 39–51. DOI: 10.14529/power220305.

МИРОШНИЧЕНКО Екатерина Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Тяговый подвижной состав» Ростовского государственного университета путей сообщения, г. Ростов-на-Дону.
SPIN-код: 1498-5371
AuthorID (РИНЦ): 1097933
ORCID: 0000-0002-8883-8021
AuthorID (SCOPUS): 56584045300
Адрес для переписки: ekaterinailjasova@rambler.ru

Для цитирования

Мирошниченко Е. Е. Высоконадежный вентильно-индукторный двигатель для системы тягового электропривода железнодорожного подвижного состава // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 70–76. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-70-76.

Статья поступила в редакцию 02.05.2023 г.
© Е. Е. Мирошниченко

HIGHLY RELIABLE SWITCHED RELUCTANCE MOTOR FOR THE TRACTION ELECTRIC DRIVE SYSTEM OF RAILWAY ROLLING STOCK

The main purpose of this work is to create conditions for the use of switched reluctance motor in the traction electric drive system of rolling stock by increasing the reliability of its bearings. The object of the study is the traction switched reluctance motor. The task has been set, which consists in developing an algorithm that allows to calculate the characteristics of the traction switched reluctance motor at the stages of design and production, taking into account the forces of a one-way magnetic attraction. The forces of one-way magnetic attraction, arising in the air gap of the electric motor with two types of its non-uniformity are studied. A proposal has been made to limit the force of the one-way magnetic attraction to a force at a permissible residual imbalance. As a result, an algorithm for determining the characteristics of the traction switched reluctance motor is unique in its kind, which makes it possible to reduce the effect of forces of the one-way magnetic attraction on bearings. The use of switched reluctance motor with a long service life of bearings in the traction drive system will make it possible to obtain a new competitive rolling stock.

Keywords: railway rolling stock, traction switched reluctance electric motor, force of a one-way magnetic attraction, unbalance force, bearings, reliability.

References

1. Romanovskiy V. V., Nikiforov B. V., Makarov A. M. Ventil'no-indukturnyy privod VIP-1000-1100 v sisteme elektrodvizheniya [Switched reluctance drive SRD-1000-1100 in the electromotive systems] // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala Makarova. *Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral Makarov*. 2019. Vol. 11, no 3. P. 573–580. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-573-581. (In Russ.).
2. Temirev A. P., Nguyen K. K. Issledovaniye ventil'no-indukturnogo dvigatelya bol'shoy moshchnosti dvukhpaketnoy konstruksii dlya pul'povykh nasosov GRAT-1800/67 gomornudnogo oborudovaniya [Research of the high power two-package switched reluctance motor for pulp pumps GRAT-1800/67 of a mining equipment] // Izvestiya SPbGETU «LETI». *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*. 2017. No. 1. P. 54–62. (In Russ.).
3. Nikiforov N. V., Pakhomin S. A., Ptakh G. K. Ventil'no-indukturnyye dvigateli dlya tyagovykh elektropriwodov [Switched reluctance motor for traction electric drives] // *Elektrichestvo. Electricity*. 2007. No. 2. P. 34–38. (In Russ.).
4. Fang G., Scalcon F. P., Xiao D. [et al.] Advance control of switched reluctance motors (SRMs): a review on current regulation, torque control and vibration suppression // *IEEE Open Journal of Industrial Electronics Society*. 2021. № 2. P. 280–301. DOI: 10.1109/OJIES.2021.3076807. (In Engl.).
5. Bruslinovskiy B. V., Evtodiy A. A. Snizheniye shchuma ventil'no-indukturnogo dvigatelya pri shirotno-impul'snom upravlenii so sluchaynym izmeneniyem parametrov [Acoustic noise reduction in the switched reluctance motors using the pulse-width modulation with the random switching strategy] // *Izvestiya*

SPbGETU «LETI». *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*. 2015. No 8. P. 38–46. (In Russ.).

6. Anuchin A. S. Razrabotka tsifrovyykh sistem effektivnogo upravleniya komplektov tyagovogo elektrooborudovaniya gibridnykh elektricheskikh transportnykh sredstv [Development of digital systems for effective control of traction electrical equipment for hybrid electric vehicles]. Moscow, 2018. 445 p. (In Russ.).
7. 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, no. 9. P. 1–9. DOI: 10.1109/TMAG.2015.2441035. (In Engl.).
8. 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, no. 2. P. 293–296. DOI: 10.1109/TMAG.2013.2286569. (In Engl.).
9. Lin F.-C., Yang S.-M. Analysis and modeling of the radial force in a switched reluctance motor with sinusoidal excitations // *The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems*. 2003. Vol. 2. P. 938–943. DOI: 10.1109/PEDS.2003.1283094. (In Engl.).
10. Lin F.-C., Yang S.-M. Instantaneous Shaft Radial Force Control with Sinusoidal Excitations for Switched Reluctance Motors // *Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting*. Seattle, WA, USA. 2004. P. 424–430. DOI: 10.1109/IAS.2004.1348442. (In Engl.).
11. Zhu Z. Q., Liu X., Pan Z. 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, no. 1. P. 36–45. DOI: 0.1109/TEC.2010.2087336. (In Engl.).

12. Makino H., Kosaka T., Matsui N. Digital PWM-control-based active vibration cancellation for switched reluctance motors // IEEE Transactions on Industry Applications. 2015. Vol. 51, no. 6. P. 4521–4530. DOI: 10.1109/TIA.2015.2448065. (In Engl.).

13. 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 Transactions on Power Electronics. 2009. Vol. 24, no. 5. P. 1376–1385. DOI: 10.1109/TPEL.2009.2016568. (In Engl.).

14. GOST 24810-2013. Podshipniki kacheniya. Vnutrenniye zatory [Rolling bearings. Internal clearances]. Moscow, 2014. 19 p. (In Russ.).

15. GOST ISO 1940-1-2007. Vibratsiya. Trebovaniya k kachestvu balansirovki zhestkikh rotorov. Chast' 1. Opredeleniye dopustimogo disbalansa [Vibration. Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state. Part 1. Specification and verification of balance tolerances]. Moscow, 2008. 27 p. (In Russ.).

16. Glinkin S. A., Zakharov A. V. Opyt konstruirovaniya i osvoyeniya proizvodstva opytно-promyshlennoy partii ventil'no-induktornykh dvigateley [Experience of designing and mastering the production of a pilot-batch of switched-reluctance motors] // Vestnik IGEEU. Vestnik ISPEU. 2015. No. 1. P. 14–19. (In Russ.).

17. Miroshnichenko E. E. Otsenka vliyaniya sil odnostoronnegо magnitnogo prityazheniya na nadezhnost' podshipnikovogo uzla ventil'no-induktornoй elektricheskoy mashiny [Assessing the

influence of one-way magnetic attraction forces on the reliability of the bearing unit of a switched reluctance electric machine] // Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika. Bulletin of the South Ural State University. Series Power Engineering. 2022. Vol. 22, no. 3. P. 39–51. DOI: 10.14529/power220305. (In Russ.).

MIROSHNICHENKO Ekaterina Evgenievna,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of Traction Rolling Stock Department, Rostov State
Transport University of Communications, Rostov-on-
Don.

SPIN-code: 1498-5371

AuthorID (RSCI): 1097933

ORCID: 0000-0002-8883-8021

AuthorID (SCOPUS): 56584045300

Correspondence address: ekaterinailjasova@rambler.ru

For citations

Miroshnichenko E. E. Highly reliable switched reluctance motor for the traction electric drive system of railway rolling stock // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 4 (188). P. 70–76. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-70-76.

Received May 02, 2023.

© E. E. Miroshnichenko