

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехнология и электрофизика

УДК [UDC] 621.313.13

DOI 10.17816/transsyst20228458-73

© В.В. Сироткин, Д.А. Пигалев, И.В. Больших, С.С. Черняев

Ростовский государственный университет путей сообщения

(Ростов-на-Дону, Россия)

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ВИТКАХ ОБМОТКИ СТАТОРА ВЕНТИЛЬНО- ИНДУКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Обоснование: В статье дано описание процесса возникновения дополнительных потерь в крайних витках медных обмоток статора, базирующееся на физических законах. Приведены причины возникновения скин-эффекта в обмотках статора вентильно-индукторного двигателя (ВИД), а также выполнена оценка степени влияния скин-эффекта на дополнительные потери в ВИД средней и большой мощности. Построена 2D-модель сектора ВИД в программном пакете (ПП) «COMSOL Multiphysics» для дальнейшего уточнения распределения магнитного поля в витках обмотки статора и определения количественных значений дополнительных потерь. Для оценки достоверности полученных результатов приведено сравнение распределения магнитного поля ВИД конфигурации 12/8, полученного в программе «FEMM», и распределения магнитного поля сектора ВИД, построенного в ПП «COMSOL Multiphysics».

Цель: Расчет распределения магнитного поля в витках обмотки статора путем поэтапного построения 2D-модели сектора (полусного деления) ВИД в ПП «COMSOL Multiphysics» для дальнейшего определения количественных значений дополнительных потерь, вызванных вихревыми токами в обмотках.

Методы: Для построения 2D-модели сектора ВИД использовался ПП «COMSOL Multiphysics». Для нахождения решения по распределению электромагнитных полей внутри моделируемой области использовался метод конечных элементов (МКЭ), для оценки корректности полученных результатов – метод сравнения с расчетами в программе «FEMM».

Результаты: Картины распределения магнитного поля ВИД, полученные в ПП «COMSOL Multiphysics» и в программе «FEMM», подтверждают наличие скин-эффекта в крайних витках обмотки статора, способного снизить энергоэффективность ВИД и вызвать локальный перегрев витков обмотки. В результате проведения моделирования картина распределения магнитного поля ВИД, полученная в программе «FEMM», аналогична картине распределения магнитного поля ВИД, полученной в ПП «COMSOL Multiphysics». Относительная погрешность значений магнитной индукции разных частей ВИД находится в пределах 3–7 %, что является допустимым и свидетельствует о корректности компьютерного моделирования в ПП «COMSOL Multiphysics».

Заключение: Картины распределения магнитного поля ВИД в ПП «COMSOL Multiphysics» и в программе «FEMM» подтверждают наличие скин-эффекта в крайних витках обмотки статора, что позволит проводить дальнейшие исследования в области определения численных значений дополнительных потерь с использованием 2D-модели, а также перейти от 2D-модели к 3D-модели ВИД.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, потери в крайних витках обмотки, скин-эффект, вентильно-индукторный двигатель, распределение магнитного поля.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field – Electrotechnology and Electrophysics

© V.V. Sirotkin, D.A. Pigalev, I.V. Bol'shikh, S.S. Chernyaev

Rostov State Transport University

(Rostov-on-Don, Russia)

APPLICATION OF SPECIALIZED SOFTWARE FOR CALCULATION OF MAGNETIC FIELD IN THE TURNS OF SWITCHED RELUCTANCE MOTORS STATOR WINDINGS

Background: The article describes the process of occurrence of additional losses in the extreme turns of the copper stator windings, based on physical laws. The causes of the skin effect in the stator windings of a switched reluctance motor (SRM) are presented, an assessment of the skin effect influence degree on additional losses in the SRM of medium and high power. 2D-model of the SRM sector in “COMSOL Multiphysics” software package is created to specify distribution of magnetic field in the SRM stator windings and to quantify the amount of additional losses. A comparison of the magnetic field distribution of the SRM configuration 12/8 obtained in the “FEMM” program and the SRM magnetic field distribution built in “COMSOL Multiphysics” software package is presented to assess the reliability of the results.

Aim: Calculation of the magnetic field distribution in the turns of the stator winding by building a phased 2D-model of the SRM sector (pole division) in “COMSOL Multiphysics” software package to quantify the amount of additional losses caused by eddy currents in the windings.

Methods: “COMSOL Multiphysics” software package is used to build 2D-sector of the SRM. To obtain results on the distribution of electromagnetic fields within the simulated area, finite element methods (FEM) are used to estimate income adjustments, the results are compared with calculations in the “FEMM” program.

Results: The patterns of the magnetic field distribution of the SRM obtained in “COMSOL Multiphysics” software package and in “FEMM” program confirm the presence of a skin-effect in the extreme turns of the stator winding. It can reduce the energy efficiency of the SRM and cause local overheating of the winding turns. As a result of the simulation, the picture of the magnetic field distribution of the SRM obtained in the “FEMM” program is similar to the picture of the magnetic field distribution of the SRM obtained in “COMSOL Multiphysics” software package. Ratio error of the values of the magnetic induction of different parts of the SRM is 3–7 %. It is acceptable and it indicates the correctness of computer modeling in “COMSOL Multiphysics” software package.

Conclusion: The patterns of the magnetic field distribution SRM in “COMSOL Multiphysics” software package and in the “FEMM” program confirm the presence of the skin-effect in the extreme turns of the stator winding, which will allow further research in the field of determining the numerical values of additional losses using 2D-model, and proceed from 2D-model to 3D-model of the SRM.

Key words: computer modeling, losses at extreme turns of a winding, skin-effect, switched reluctance motor, magnetic field distribution.

ВВЕДЕНИЕ

Вентильно-индукторные двигатели обладают более высоким КПД по сравнению с применяемыми в настоящее время асинхронными и коллекторными электродвигателями. Поэтому интенсивное изучение, анализ, модернизация конструкции и улучшение технико-экономических показателей являются актуальными задачами. Помимо высокого КПД вентильно-индукторные двигатели (ВИД) обладают следующими существенными преимуществами, представленными на Рис. 1 [1].

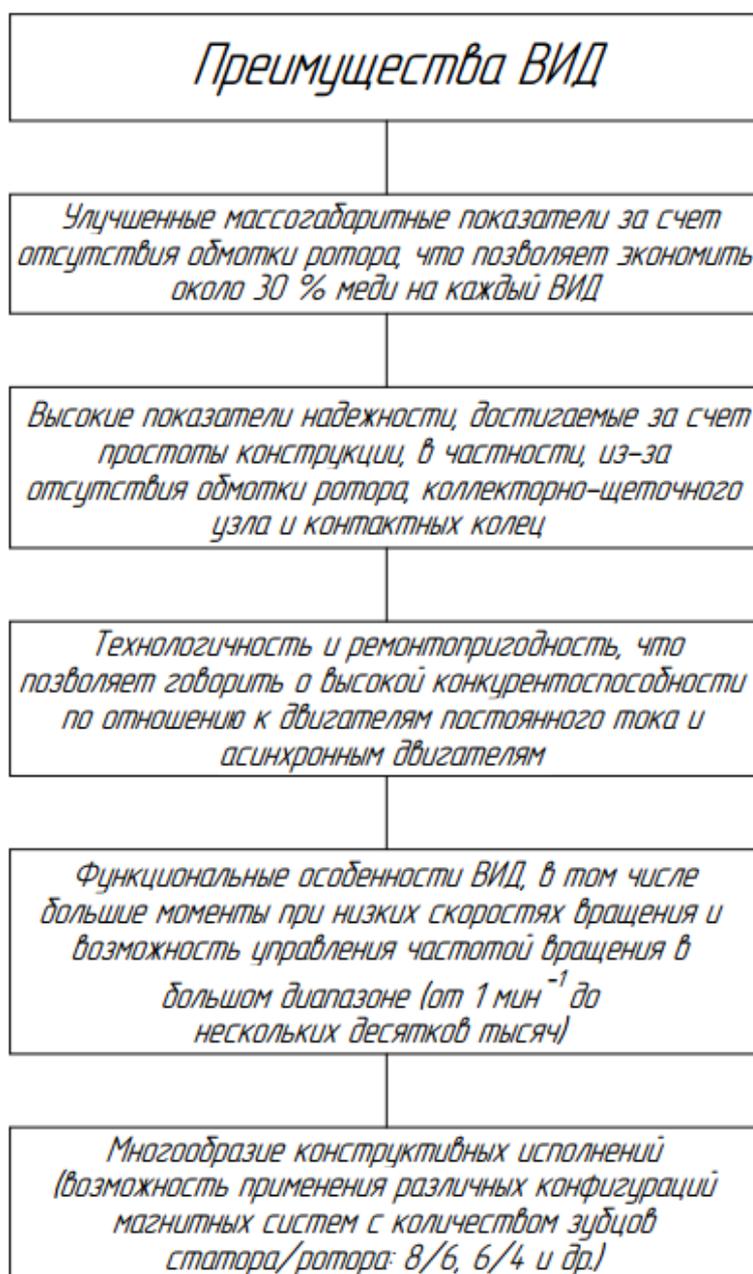


Рис. 1. Преимущества вентильно-индукторного двигателя

Одной из перспективных задач при совершенствовании ВИД является получение значений параметров с достаточно высокой точностью в тех случаях, когда имеющиеся методики эту точность не обеспечивают. В настоящее время ВИД является перспективной, уже достаточно хорошо изученной электрической машиной (ЭМ), находящей все более широкое применение. Важным направлением ее дальнейшего совершенствования, в том числе модернизации конструкции, является определение дополнительных потерь в обмотках статора, вызванных вихревыми токами. Точный расчет этих потерь осложняется трудностями математического характера по причине быстро меняющейся формы магнитного поля, пронизывающего проводники обмотки, которые расположены близко к воздушному зазору, где концентрируется основная энергия магнитного поля. Эта проблема была обозначена в [2], где приведены: природа возникновения дополнительных потерь и негативные последствия, к которым они приводят. Также даны рекомендации по снижению влияния этих потерь на эффективную работу электрической машины. Одним из предложенных вариантов является изменение расстояния витков обмотки до воздушного зазора. Существенное внимание уделено описанию вихревых токов, которые являются одной из причин, вызывающей дополнительные потери, ввиду высокой проводимости меди. Получены зависимости коэффициента $K_{\text{доб}}$ от толщины проводников и расстояния от крайних витков обмотки до воздушного зазора. Особенно интересен тот факт, что данная мера помогает снизить $K_{\text{доб}}$ в 2,4 раза. Однако при выполнении расчетов в [2] были сделаны следующие допущения, для достижения достаточной точности, исходя из поставленной цели – практического внедрения данной машины: не учитывалось насыщение магнитопровода; ротор неподвижен.

Неучет данных факторов оказывает существенное влияние на электроприводы, работающие в широких диапазонах изменения частоты вращения. При насыщении коронок зубцов возрастает магнитное сопротивление для части потока рассеяния, магнитные линии которого замыкаются через верхнюю часть паза. Поэтому коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния уменьшается, снижается и магнитная проводимость дифференциального рассеяния. Чтобы увеличить точность расчетов, необходимо использовать современное специализированное программное обеспечение. Рационально будет провести расчеты, приняв различные положения зуба и затем усреднить полученные результаты.

Суть рассматриваемых физических процессов. Витки в обмотке статора изолированы друг от друга, а так как теплопроводность меди на порядок превышает теплопроводность изоляции, то изоляция витков, прилегающая к медному проводнику обмотки, подвергается значительному перегреву. Такая особенность характерна при работе тягового двигателя

НТИ-350. Перегрев характерен для витков, расположенных с набегающей части ротора, где наблюдается повышенная плотность магнитного потока [2]. Когда зубцы ротора начинают перекрывать зубцы статора (стремятся к согласованному положению), будет наблюдаться резкое увеличение индуктивности фазы и сцепленного с ней магнитного потока, который «выпучивается» наружу по отношению к магнитной системе. Данный эффект характерен именно для тяговых ВИД и ВИД средней и большой мощности, где медные обмотки наматываются на ребро. Магнитное поле проникает в эту плоскую грань, вызывая дополнительные потери.

Дополнительные потери [2] являются одним из тех факторов, которые снижают надежность ВИД. Эти дополнительные потери вызывают значительный перегрев (на несколько десятков градусов), что может привести к выходу машины из строя (в режимах пуска и торможения). Данная область ВИД также обладает рядом физических явлений, которые способствуют существенному увеличению дополнительных потерь. К таким явлениям относится скин-эффект, характерный для переменного магнитного поля. Изменяющееся магнитное поле по закону электромагнитной индукции создает электрическое индукционное поле. Вектор напряженности индукционного поля в областях, расположенных ближе к оси проводника, направлен противоположно вектору напряженности электрического поля, создающего ток, а в более дальних – совпадает с ним. В результате плотность тока уменьшается в приосевых областях и увеличивается вблизи поверхности проводника, то есть возникает скин-эффект, который вызывает проблемы из-за неравномерного распределения переменного тока по проводнику. Стоит также отметить, что скин-эффект возникает во всех витках, подверженных влиянию переменного магнитного поля. Однако наибольший интерес представляют именно крайние витки, так как на них оказывают влияние вихревые токи. Физическая картина скин-эффекта показана на Рис. 2 [3].

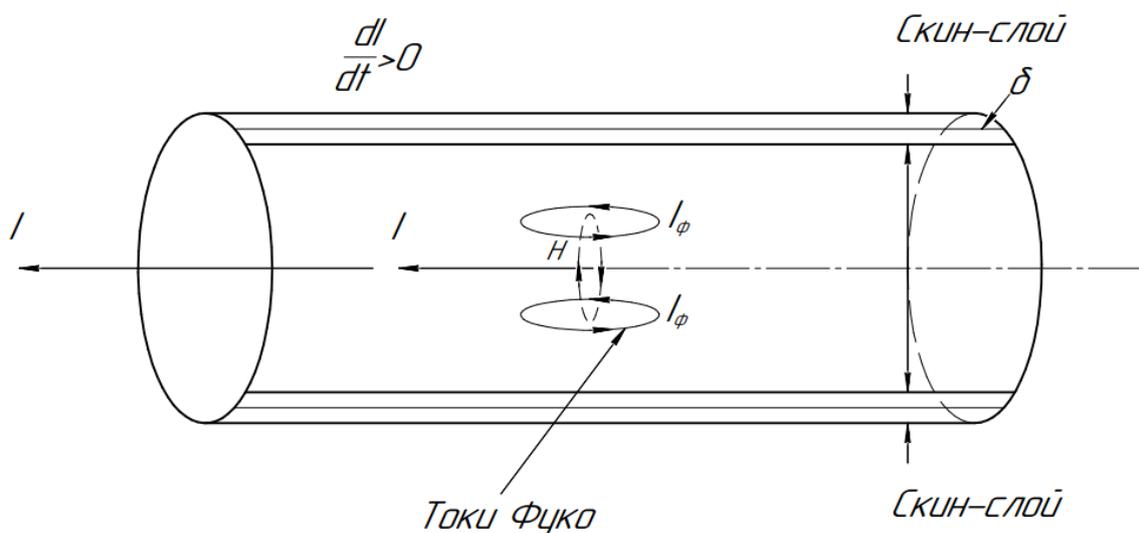


Рис. 2. Физическая картина возникновения скин-эффекта

ПОСТРОЕНИЕ 2D-МОДЕЛИ СЕКТОРА (ПОЛЮСНОГО ДЕЛЕНИЯ) ВИД В ПП «COMSOL MULTIPHYSICS»

Современные программные средства позволяют выполнять расчеты (особенно расчеты, связанные с определением физических параметров вентильно-индукторных двигателей) с точностью, соизмеримой, а в некоторых случаях выше, чем при экспериментальных исследованиях, где точность ограничена средствами измерения. Расчет электромагнитных полей методом конечных элементов (МКЭ) дает такую возможность. С развитием теории и практики использования ЭМ все чаще требуются более точные методы их расчета. Одним из таких методов является компьютерное моделирование с использованием таких программ как «MATLAB/Simulink» и «ELCUT» [4, 5], «ANSYS Maxwell» [6], «FEMM» [7–10], «COMSOL Multiphysics» [11, 12] и др. Следует отметить, что программный пакет (ПП) «COMSOL Multiphysics», предназначенный для мультифизического моделирования, обладает рядом преимуществ в сравнении с ранее перечисленными программами, а именно:

- 1) возможностью 2D- и 3D-моделирования различных процессов, протекающих при работе ЭМ;
- 2) возможностью одновременного моделирования нескольких физических процессов (например, теплового и энергетического расчетов);
- 3) наличием узла «Results», позволяющего отобразить результаты моделирования в табличной, графической и числовой формах;
- 4) удобным интерфейсом (наличие конструктора моделей, в котором наглядно отражены все составляющие «дерева модели»). Конструктор моделей является немаловажным преимуществом данного ПП, так как позволяет отобразить структуру мультифизической модели – геометрическое построение, физические процессы, параметры «решателя» – и мгновенно конкретизировать ошибки в задании тех или иных параметров;
- 5) поэтапным расчетом задач (узел «Study» позволяет настроить оптимальную последовательность решения операций, а также сформировать пакет выходных данных, например изображений и групп графиков).

В связи с перечисленными выше преимуществами в рамках данных исследований было принято решение использовать ПП «COMSOL Multiphysics» для определения потерь на крайних витках обмотки, что является особенно актуальной задачей для крупных тяговых ЭМ [2, 13–16], а проведенные исследования в публикации [17] действительно доказывают наличие скин-эффекта, что подтверждает необходимость дальнейшего изучения вопроса ввиду неравномерного распределения магнитного поля по сечению проводника.

Также отметим, что при изучении скин-эффекта (Рис. 3) были взяты во внимание следующие факторы:

- геометрические размеры ЭМ (в том числе пазов);
- геометрические размеры обмотки статора;
- номинальная мощность ЭМ.

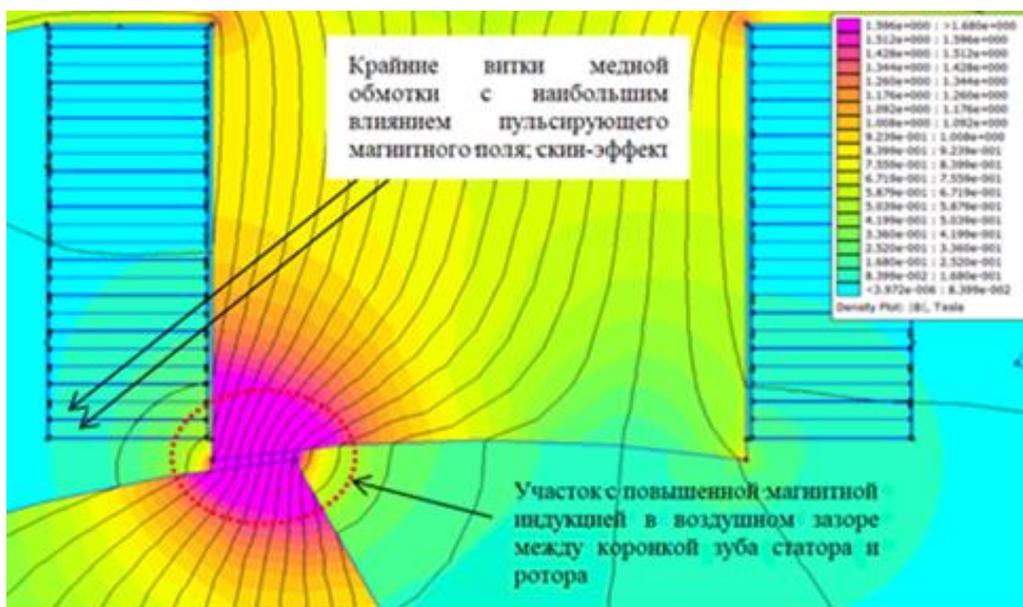


Рис. 3. Область возникновения скин-эффекта в крайних витках обмотки статора вентильно-индукторного двигателя

К величинам, являющимся основополагающими при расчетах ЭМ и оказывающим значительное влияние на их эксплуатационные характеристики, относятся суммарные потери. В ходе данных исследований особое внимание уделено дополнительным потерям ЭМ [2, 13, 14], в основном, из-за сложности их определения ввиду того, что магнитное поле быстро меняется, а крайние витки обмотки статора подвержены скин-эффекту [14].

К ним относятся потери в медных обмотках, а основной причиной их возникновения являются вихревые токи.

Данные факторы в совокупности значительно затрудняют расчеты, а эмпирические соотношения не позволяют получить данные с необходимой степенью точности. В связи с этим невозможно корректно определить величины дополнительных потерь, вызванных вихревыми токами без картины распределения магнитного поля в проводнике.

Для достижения цели, поставленной в работе, и более детального отображения конструкции ЭМ в ПП «COMSOL Multiphysics» был построен сектор ВИД (90 эл. град.). В дальнейшем ПП «COMSOL Multiphysics» позволит достаточно быстро отобразить полноразмерную

2D-модель, что является еще одним принципиальным преимуществом данного ПП.

На Рис. 4 представлена структурная схема поэтапного построения разработанной 2D-модели сектора ВИД.

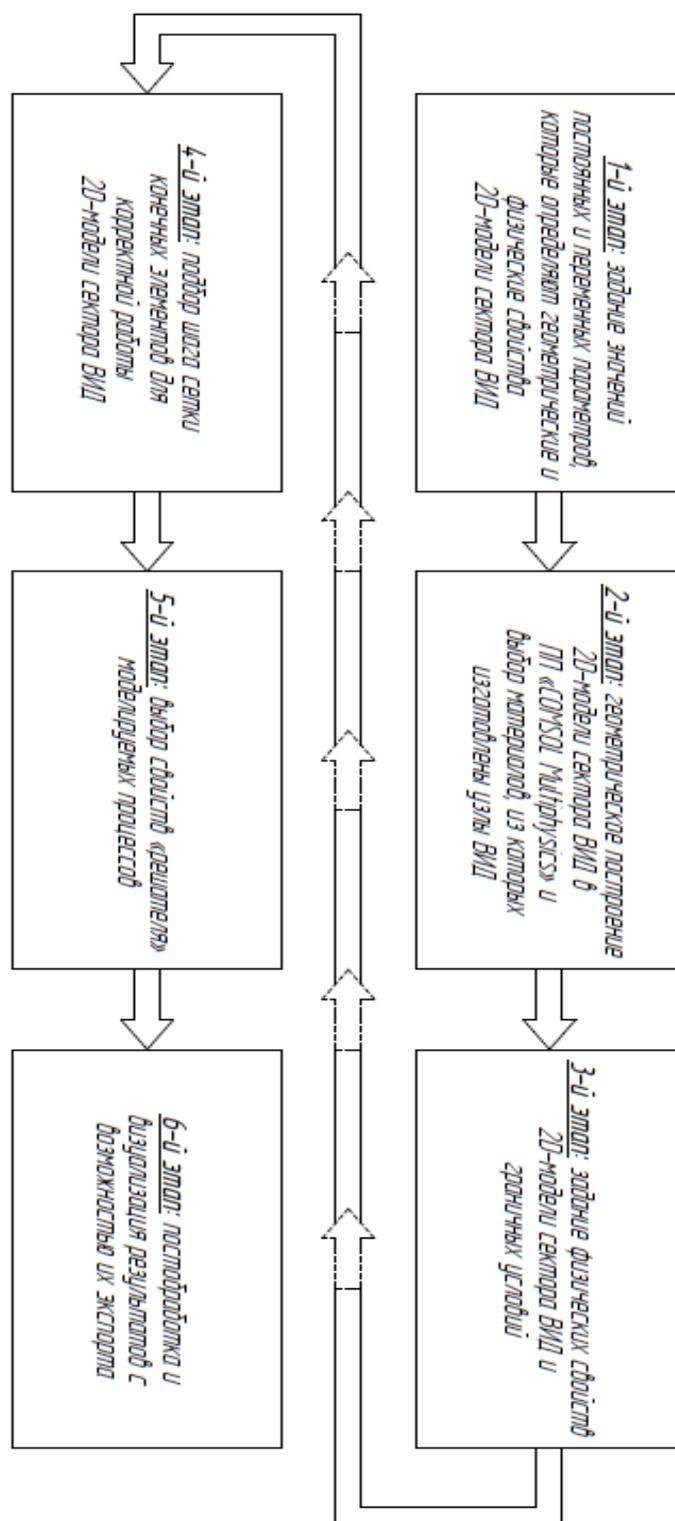


Рис. 4. Структурная схема поэтапного построения 2D-модели сектора ВИД

В процессе настройки модели использовались положения теории электрических машин [14–16].

Для корректной работы 2D-модели сектора ВИД авторами был выполнен подбор шага сетки конечных элементов (Рис. 5).

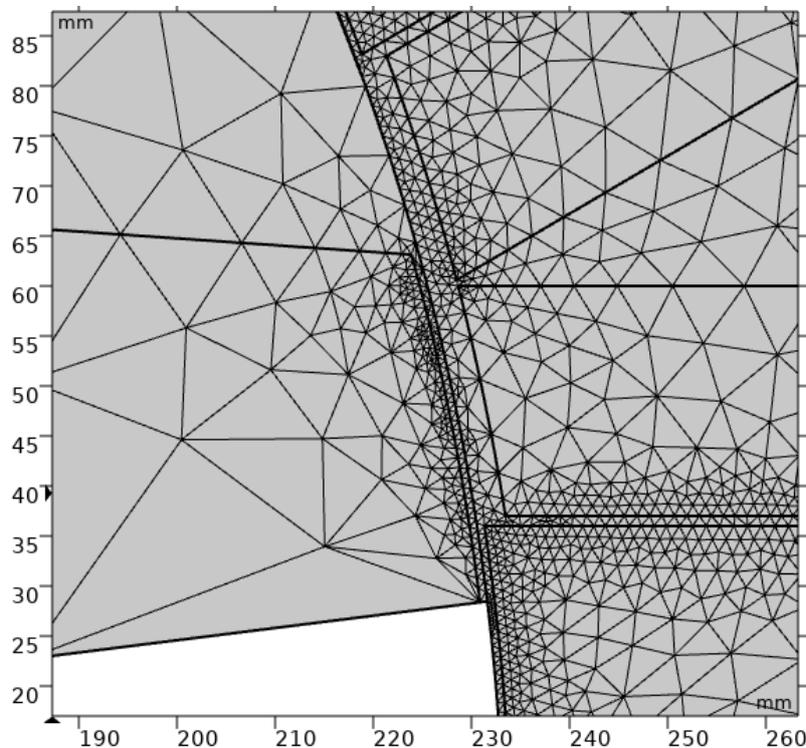


Рис. 5. Подбор шага сетки конечных элементов для корректной работы 2D-модели сектора ВИД в зависимости от конструктивных особенностей

Для уточнения степени влияния скин-эффекта в программе «FEMM» была разработана компьютерная модель ВИД конфигурации 12/8 [17]. Расстояние между витками обмотки статора и воздушным зазором задано согласно технической документации на двигатель НТИ-350 [18]. В дальнейшем его численное значение необходимо скорректировать таким образом, чтобы минимизировать дополнительные потери вследствие возникновения скин-эффекта.

Применение данной модели актуально при расчете тяговых электрических машин средней и большой мощности (тяговых электродвигателей). Используя компьютерную модель, представленную в статье, станет возможным определить оптимальное расстояние до воздушного зазора с учетом имеющихся по ГОСТу диаметров сечения проводников после получения количественных значений дополнительных потерь. В свою очередь более точное определение этих потерь позволит избегать перегрева крайних витков, что значительно повысит надежность работы электрической машины.

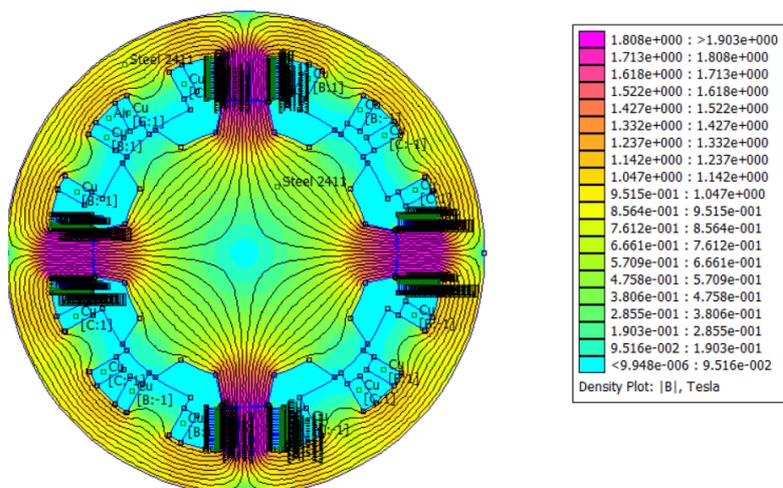
Далее представлено сравнение компьютерных моделей сектора ВИД

и магнитной системы ВИД конфигурации 12/8, разработанных в ПП «COMSOL Multiphysics» и в программе «FEMM».

АНАЛИЗ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ В ХОДЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для оценки достоверности полученных результатов приведем сравнение распределения магнитного поля ВИД конфигурации 12/8, полученного в программе «FEMM» (Рис. 6а, Рис. 7а) и распределения магнитного поля сектора ВИД, построенного в ПП «COMSOL Multiphysics» (Рис. 6б, Рис. 7б) [19].

а)



б)

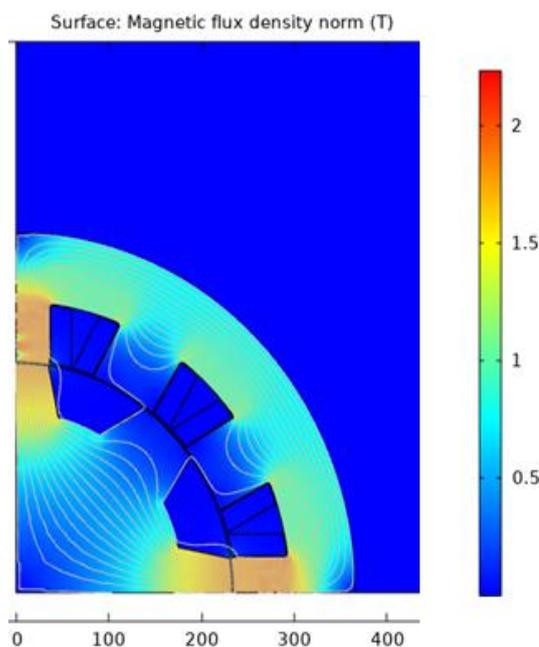
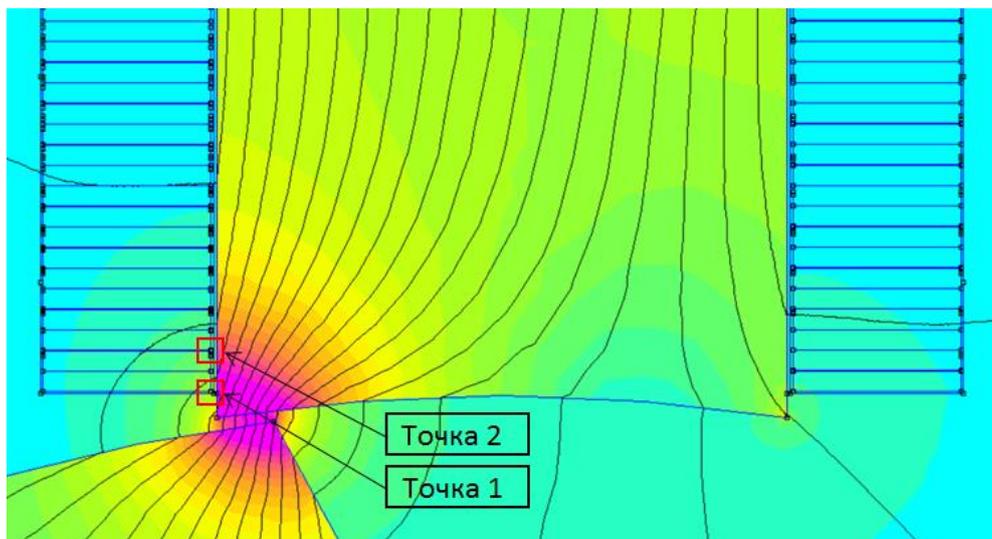


Рис. 6. Распределение магнитного поля ВИД, полученное в программе «FEMM» и в ПП «COMSOL Multiphysics»: а – в программе «FEMM»; б – в ПП «COMSOL Multiphysics» (сектор ВИД)

а)



б)

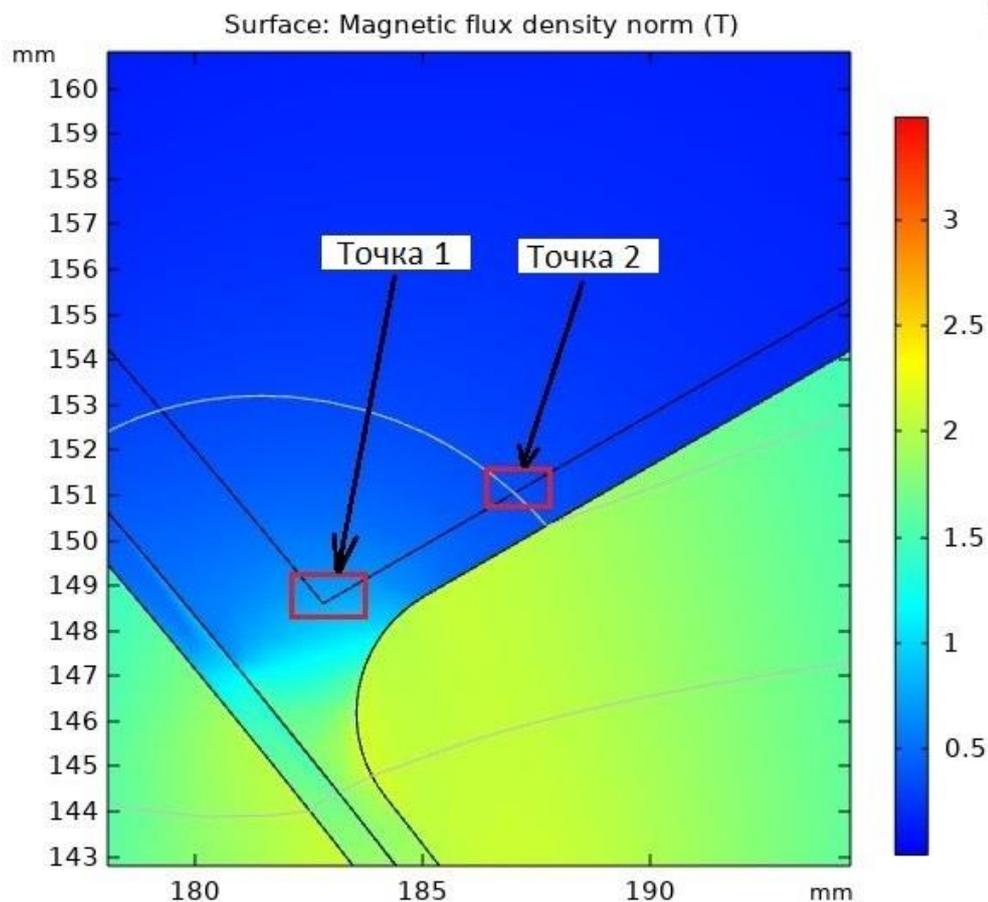


Рис. 7. Сравнение численных значений магнитной индукции в двух точках в зависимости от расстояния до воздушного зазора между статором и ротором ВИД:
а – в программе «FEMM»; б – в ПП «COMSOL Multiphysics» (сектор ВИД)

Анализируя Рис. 6, Рис. 7, приходим к выводу о том, что картина распределения магнитного поля ВИД, полученная в программе «FEMM», аналогична картине распределения магнитного поля сектора ВИД, полученной в ПП «COMSOL Multiphysics». Значения магнитной индукции в точке 1, рассчитанные в программе «FEMM» и в ПП «COMSOL Multiphysics» ($|B_1| = 0,634$ Тл, $|B_3| = 0,678$ Тл), значительно превосходят значения магнитной индукции в точке 2 ($|B_2| = 0,371$ Тл, $|B_4| = 0,360$ Тл), что наглядно показывает наличие скин-эффекта.

В соответствии с формулами (1), (2) были вычислены относительные погрешности значений магнитной индукции для точек 1 и 2:

$$\delta_1 = \frac{|B_3| - |B_1|}{|B_1|} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где B_3 – значение магнитной индукции в точке 1, полученное в ПП «COMSOL Multiphysics», Тл;

B_1 – значение магнитной индукции в точке 1, полученное в программе «FEMM», Тл.

$$\delta_2 = \frac{|B_2| - |B_4|}{|B_4|} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где B_4 – значение магнитной индукции в точке 2, полученное в ПП «COMSOL Multiphysics», Тл;

B_2 – значение магнитной индукции в точке 2, полученное в программе «FEMM», Тл.

Относительная погрешность значений магнитной индукции для точки 1 составила 6,94 %, для точки 2 – 3,06 %. Таким образом, результаты расчетов свидетельствуют о корректности компьютерного моделирования в ПП «COMSOL Multiphysics».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение ВИД становится все более актуальным из-за ряда преимуществ по сравнению с используемыми в настоящее время электродвигателями (в том числе более высокий КПД). В ходе изучения данного типа ЭМ были проанализированы причины возникновения дополнительных потерь, имеющих непосредственное влияние на целостное состояние изоляции обмоток статора. Также описана природа

возникновения скин-эффекта, возникающего под влиянием переменного магнитного поля.

Картины распределения магнитного поля сектора ВИД в ПП «COMSOL Multiphysics» и в программе «FEMM» подтверждают наличие скин-эффекта в витках обмотки статора, что позволит проводить дальнейшие исследования в области определения численных значений дополнительных потерь с использованием 2D-модели, а также перейти от 2D-модели к 3D-модели ВИД.

Учет скин-эффекта в крайних витках обмотки статора даст возможность скорректировать значения дополнительных потерь и на основе полученных результатов определить оптимальное расстояние от этих крайних витков обмотки до воздушного зазора, что актуально для электрических машин средней и большой мощности.

Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Петрушин А.Д., Ворон О.А, Смачный Ю.П. Вентильно-индукторные машины для железнодорожного подвижного состава // Вестник «ВЭЛНИИ». – 2005. – Вып. 1 (48). – С. 147–159. [Petrushin AD, Voron OA, Smachny YuP. Switched reluctance motors for railway rolling stock. *Vestnik VEINII*. 2005;1(48):147-159. (In Russ.)]. Ссылка активна на 13.11.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11717765>
2. Пахомин С.А., Прокопец А.И., Щербаков В.Г., Захаров В.И. К расчету добавочных потерь в тяговом индукторном двигателе // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2010. – № 5. – С. 39–42. [Pakhomin SA, Prokopets AI, Shcherbakov VG, Zakharov VI. To the problem of calculation of additional losses in a traction switched reluctance motor. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika. Electromechanics*. 2010;5:39-42. (In Russ.)]. Ссылка активна на 13.11.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17059154>
3. Сироткин В.В., Пигалев Д.А., Колмыкова М.Ю. Компьютерная модель для определения дополнительных потерь в крайних витках обмотки статора вентильно-индукторного двигателя // Сборник статей «Механика и трибология транспортных систем (МехТрибоТранс–2021)». Ростов-на-Дону: ФГБОУ ВО РГУПС, 2021. – С. 141–145. [Sirotkin VV, Pigalev DA, Kolmykova MYu. Computer model for calculation of supplementary losses in the end winding turns of the stator of the switched reluctance motor. Collection of articles “Mechanics and tribology of transport systems” (MechTriboTrans-2021). Rostov-on-Don: RSTU; 2021. pp. 141-145. (In Russ.)]. doi: 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_141
4. Нгуен Куанг Кхоа. Методика моделирования вентильно-индукторных двигателей с помощью программ Elcut и Matlab Simulink // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2016. – № 2. – С. 73–79. [Nguyen Quang Khoa. Method of modeling of switched reluctance motor using Elcut and Matlab Simulink.

- Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika. Electromechanics.* 2016;2:73-79. (In Russ.). Ссылка активна на 13.11.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25767917>
5. Кашуба А.В. Оптимизационный метод формирования геометрических размеров зубцовой зоны вентильно-индукторного двигателя // *Транспортные системы и технологии.* – 2020 – Т. 6 – № 1 – С. 30–47. doi: 10.17816/transsyst20206130-47. [Kashuba AV. Optimization Method for calculating the Geometrical Dimensions of the tooth Zone of the switched reluctance motor. *Transportation Systems and Technology.* 2020;6(1):30-47. (In Russ.). doi: 10.17816/transsyst20206130-47
 6. Чавычалов М.В., Черняев С.С., Пигалев Д.А. Моделирование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в программе MAXWELL ANSOFT // *Труды Ростовского государственного университета путей сообщения.* – 2018. – № 3 (спецвыпуск). – С. 38–44. [Chavychalov MV, Chernyaev SS, Pigalev DA. Modeling of an asynchronous motor with a squirrel-cage rotor in the MAXWELL ANSOFT program. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya.* 2018;3(special issue):38-44. (In Russ.). Ссылка активна на 13.11.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36474361>
 7. Кашуба А.В. Особенности компьютерного моделирования электромагнитных процессов в вентильно-индукторном двигателе // *Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство» («Транспорт-2017»).* Т. 1. Технические науки. – Ростов-на-Дону: ФГБОУ ВО РГУПС, 2017. – С. 145–149. [Kashuba AV. Features of computer modeling of electromagnetic processes in a switched reluctance motor. Collection of scientific papers “Transport: science, education, production” (“Transport-2017”). Т. 1. Technical sciences. Rostov-on-Don: RSTU; 2017. pp. 145-149. (In Russ.). Ссылка активна на 13.11.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32624906&pff=1>
 8. Сироткин В.В. Исследование статических характеристик магнитных систем вентильно-индукторных двигателей // *Труды Ростовского государственного университета путей сообщения.* – 2020. – № 3 (52). – С. 38–44. [Sirotkin VV. Research of static characteristics of magnetic systems of switched reluctance motor. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya.* 2020;3(52):38-44. (In Russ.). Ссылка активна на 13.11.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44013146>
 9. Grebennikov NV, Talakhadze TZ, Kashuba AV. Equivalent magnetic circuit for switched reluctance motor with strong mutual coupling between phases, 2019. *26th International workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives (IWED);* Moscow, Russia; 2019. pp. 1-5. doi: 10.1109/IWED.2019.8664226
 10. Finite Element Method Magnetics: HomePage [Internet]. [cited 2022 november 13]. Available from: <http://www.femm.info/wiki/HomePage>
 11. Шабанов А.С., Нейман В.Ю. Применение пакетов программ FEMM и COMSOL Multiphysics в задачах расчета линейных электромагнитных двигателей // *Современные материалы, техника и технологии.* – 2017. – № 5 (13). – С. 96–100. [Shabanov AS, Neiman VYu. Application of FEMM and COMSOL Multiphysics software packages in the problems of calculating linear electromagnetic motors. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii.* 2017;5(13):96-100. (In Russ.). Ссылка активна на 13.11.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30363053>
 12. Сайт компании COMSOL. [COMSOL website. [Internet]. (In Russ.). Ссылка активна на 23.10.2022. Доступно по: <http://www.comsol.ru>
 13. Щербаков В.Г., Петрушин А.Д., Хоменко Б.И. и др. Тяговые электрические

машины: учеб. пособие. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. – 641 с. [Shherbakov VG, Petrushin AD, Homenko BI, et al. *Tjagovye jelektricheskie mashiny*. Moscow: “Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte”; 2015. 641 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 13.11.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29343796>

14. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: учебник для вузов. – М.: Юрайт, 2012. – 767 с. [Kopylov IP. *Proektirovanie elektricheskikh mashin: uchebnik dlya vuzov*. Moscow: YUrajt; 2012. 767 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 13.11.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20243677>
15. Krishnan R. Switched reluctance motor drives. Modeling, simulation, analysis, design, and applications. Virginia: The Bradley Department of Electrical and Computer Engineering; 2001. 416 p. Ссылка активна на 13.11.2022. Доступно по: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.473.45&rep=rep1&type=pdf>
16. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели: учеб. пособие. – М.: МЭИ, 2003. – 70 с. [Kuznetsov VA, Kuzmichev VA. *Ventil'no-induktornyye dvigateli: uchebnoe posobie*. Moscow: MEI; 2003. 70 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на 13.11.2022. Доступно по: https://www.studmed.ru/kuznecov-va-kuzmichev-va-ventilno-induktornye-dvigateli_5961d6f8f15.html
17. Пигалев Д.А., Сироткин В.В., Черняев С.С. Определение дополнительных потерь в обмотках вентильно-индукторных машин // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство» («Транспорт-2020»). Т. 2. Технические науки. Ростов-на-Дону: ФГБОУ ВО РГУПС, 2020. – С. 159–162. [Pigalev DA, Sirotkin VV, Chernyaev SS. Determination of additional losses in the windings of switched reluctance motors. Collection of scientific papers “Transport: science, education, production” (“Transport-2020”). Т. 2. Technical sciences. Rostov-on-Don: RSTU; 2020. pp. 159-162. (In Russ.)]. Ссылка активна на 13.11.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44143256&pff=1>
18. Каталог электродвигателей Новочеркасского электроvozостроительного завода. [Katalog elektrodvigatelej Novoчерkasskogo elektrovostroitel'nogo zavoda. (In Russ.)]. Ссылка активна на 13.11.2022. Доступна по: <http://www.rcit.su/techinfoE0.html>

Сведения об авторах:

Сироткин Вячеслав Викторович, ассистент;
eLibrary SPIN: 5002-6276; ORCID: 0000-0002-8645-0154;
E-mail: viachieslav.sirotkin.93@mail.ru

Пигалев Дмитрий Александрович, инженер;
eLibrary SPIN: 1212-0696; ORCID: 0000-0001-6463-3390;
E-mail: dima.pigaliiov@yandex.ru

Больших Иван Валерьевич, кандидат технических наук, доцент;
eLibrary SPIN: 9332-6389; ORCID: 0000-0001-9433-3356;
E-mail: ivan.bolshih@yandex.ru

Черняев Семен Сергеевич, аспирант;
eLibrary SPIN: 2234-9333; ORCID: 0000-0001-7882-6185;
E-mail: MrZemen@yandex.ru

Information about the authors:**Vyacheslav Sirotkin;** Assistant;

eLibrary SPIN: 5002-6276; ORCID: 0000-0002-8645-0154;

E-mail: viachieslav.sirotkin.93@mail.ru

Dmitriy Pigaley; Engineer;

eLibrary SPIN: 1212-0696; ORCID: 0000-0001-6463-3390;

E-mail: dima.pigaliov@yandex.ru

Bol'shikh Ivan Valerievich; Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,

eLibrary SPIN: 9332-6389; ORCID: 0000-0001-9433-3356;

E-mail: ivan.bolshih@yandex.ru

Semyon Chernyaev; Postgraduate;

eLibrary SPIN: 2234-9333; ORCID: 0000-0001-7882-6185;

E-mail: MrZemen@yandex.ru

Цитировать:

Сироткин В.В., Пигалев Д.А., Больших И.В., Черняев С.С. Применение специализированного программного обеспечения для расчета распределения магнитного поля в витках обмотки статора вентильно-индукторных электродвигателей // *Инновационные транспортные системы и технологии*. – 2022. – Т. 8. – № 4. – С. 58–73. doi: 10.17816/transsyst20228458-73

To cite this article:

Sirotkin VV, Pigaley DA, Bol'shikh IV, Chernyaev SS. Application of specialized software for calculation of magnetic field in the turns of switched reluctance motors stator windings. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(4):58-73. doi: 10.17816/transsyst20228458-73