

Применение метода конечных элементов для расчета активного сопротивления обмоток электрических машин

ГРАЧЕВ П.Ю., ТАБАЧИНСКИЙ А.С.

Обосновывается перспективность применения инновационных электрических машин переменного тока с компактной обмоткой статора. Предложена методика расчета активных сопротивлений фаз машин, в которых прямоугольное сечение проводников обмотки статора изменяется. Применена кусочно-плоскопараллельная аппроксимация поля витков, сечение перемычек между активными и лобовыми проводниками которых уменьшено. Методика расчета базируется на уравнениях Лапласа для электростатических полей и методе конечных элементов, реализованных в среде ELCUT. Приведены результаты моделирования распределения плотности тока на участках витка с переменным сечением. Иллюстрируется применение методики поэтапного определения активного сопротивления фазы обмотки инновационной электрической машины. Обмотка выполнена из прямоугольного провода с циклически изменяющимся по длине провода сечением. Рассмотрена необходимость учета влияния неравномерного растекания тока в витках с изменяющимся сечением при расчете электрических машин с различными значениями соотношения длины и диаметра сердечника. Приведен пример оценки погрешностей при расчете активных сопротивлений фаз предлагаемой обмотки.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электрические машины, проводники переменного сечения, активное сопротивление, метод конечных элементов, расчет

Исследования российских ученых в области повышения энергоэффективности асинхронных машин за счет изменения конструкции обмоток [1–3] показали перспективность ухода от традиционных решений в области электрических машин средней мощности, когда обмотки ротора выполнены из алюминия, а обмотки статора – из провода круглого постоянного сечения. Зарубежные исследования доказали, что применение обмоток из проводов прямоугольного сечения позволяет значительно уменьшить вылет лобовых частей обмоток и, как следствие, габариты электрических машин, а также сократить затраты активных и конструктивных материалов при их производстве. Например, в [4] предлагается специальная технология изготовления обмоток машин переменного тока с проводом прямоугольного сечения. Исследования позволяют оценить, как увеличивается коэффициент заполнения паза статора, а также степень сокращения вылета лобовых частей обмотки статора при такой технологии. Разработка [4] предназначена преимущественно для снижения объема и массы трехфазных электрических машин комбинированных силовых установок (КЭУ) гибридных автомобилей, но может быть применена в электромеханической части электротрансмиссий транспортных средств различного назначения [5, 6].

К инновационным электрическим машинам переменного тока, имеющим патентную защиту, могут быть отнесены машины с «интеллектуальным»

статором, позволяющие минимизировать вылет лобовых частей обмотки и автоматически изменять число полюсов, а также машины с «компактной» обмоткой статора с проводниками переменного сечения. Первый тип машин разработан учеными Германии [7]. Статор имеет короткозамкнутую обмотку, соединенную с многофазным вентильным преобразователем. В случае выполнения обмотки статора короткозамкнутой с одного торца статора, с другого торца статора к каждому из стержней этой обмотки подключают электронный управляемый ключ, предназначенный для изменения направления тока в стержне и управления значением этого тока. Такой вентильный преобразователь формирует в многофазной обмотке волны тока, создающие вращающийся магнитный поток с необходимым числом полюсов.

Короткозамкнутая обмотка статора при этом выполняется со стержнями в пазах из алюминия или из специального проводящего материала. Предполагается работа обмотки статора при «сверхнизких» напряжениях. Из-за малого значения сопротивлений стержней обмотки токи в них значительны даже при напряжениях в единицы вольт. Такая машина переменного тока имеет нетрадиционно большое число фаз (например, 60). При этом достигается максимальный коэффициент заполнения паза и сокращается длина вылета лобовых частей до размера высоты короткозамыкающего кольца обмотки статора. Однако выполнить

электрическую машину с коротким сердечником для КЭУ затруднительно, так как необходимо, чтобы напряжения на выводах стержней были соизмеримы со значениями падения напряжения на вентилях. К тому же существенное увеличение числа электронных управляемых ключей приводит к увеличению объема и массы КЭУ. В случае выполнения обмотки статора без короткозамыкающего кольца электронные управляемые ключи подключают к двум выводам каждого из стержней этой обмотки. Тогда лобовые части обмотки статора отсутствуют, а их роль выполняют два электронных преобразователя, соединенные со стержнями обмотки статора с двух торцов машины. Число электронных управляемых ключей растет, что увеличивает габариты КЭУ и снижает КПД. Его значение также будет снижаться при высокой частоте токов обмотки статора за счет вытеснения тока в массивных стержнях этой обмотки.

Электрические машины с «компактной» обмоткой статора переменного сечения разработаны в Самарском государственном техническом университете под руководством и при участии авторов статьи [8]. Компактные обмотки статора включают участки прямоугольного провода с дискретно изменяющимся при выходе из паза поперечным сечением. Это позволяет выполнить лобовые части обмоток компактными: плоскими, с небольшим вылетом [9].

Теоретически между такими обмотками и короткозамкнутыми обмотками статора [7] общим является необходимость исследования электромагнитных и тепловых процессов в участках с переменным сечением. Известно, что изменение сечения на участке проводника приводит к неравномерному распределению плотности тока на этом участке [10]. Это влияет на значение активного сопротивления такого участка и распределение температуры на этом участке [10]. Для расчета КПД инновационных электрических машин рассмотренных типов важна информация о значении активных сопротивлений фаз их обмоток.

Поэтому в настоящей статье представлена методика расчета активного сопротивления фазы обмотки с дискретно изменяющимся поперечным сечением проводников. Она базируется на моделировании методом конечных элементов (МКЭ) изменений плотности тока в объемных проводниках сложной конфигурации. МКЭ успешно применяется при математическом моделировании электромагнитных полей в электромеханических преобразователях [11–13]. В настоящей статье рассмотрена возможность применения в методике расчета активного сопротивления фазы обмотки метода кусочно-плоскопараллельной аппроксимации электрического поля витка [14], предложенного автора-

ми в связи с разработкой инновационных машин переменного тока, обмотки которых включают участки прямоугольного провода с дискретно изменяющимся поперечным сечением.

Рассмотрим вариант моделирования распределения плотности тока в объемном витке обмотки электрической машины, прямоугольные сечения отдельных проводников которого различны. Используем метод кусочно-плоскопараллельной аппроксимации электрического поля витка, создаваемого токами в проводниках, для расчета активных сопротивлений фаз. Сущность метода – в разбиении витка на отдельные участки, на каждом из которых электрическое поле можно считать плоскопараллельным. Одна часть участков имеет неизменную форму и сечение, плотность тока на них постоянна. Сечение другой части участков объекта ступенчато меняется, что приводит к неравномерному распределению плотности тока на этих участках [14]. Границы раздела участков проходят в поперечных сечениях, где изменение плотности тока близко к нулю. Это позволяет при переходе границ раздела перейти от одного к другому плоскопараллельному полю в другой плоскости продольного сечения.

Применим этот метод для расчета активного сопротивления фазы конкретной конструкции обмотки машины переменного тока для автономных объектов [8]. Повышение эффективности инновационных машин основано на концепции выполнения их обмоток из проводов с циклически меняющимся прямоугольным сечением. На статоре или роторе расположена двухслойная обмотка с прямоугольными активными (пазовыми) и лобовыми проводниками, соединенными перемычками уменьшенного сечения. Так удастся существенно уменьшить вылет лобовых частей обмоток машин, снизить металлоемкость и повысить КПД. Виток обмотки статора такой машины изображен на рис. 1.

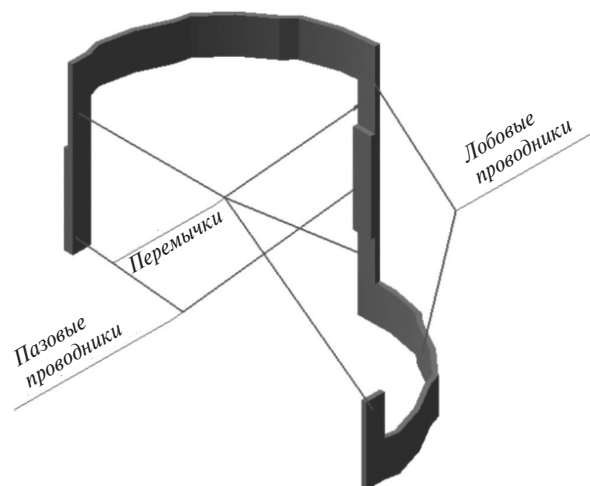


Рис. 1. 3D-модель витка обмотки инновационной машины

Расчет активного сопротивления такого витка нельзя в общем случае вести, суммируя результаты расчета активного сопротивления отдельных участков. Это связано с тем, что вблизи мест соединения перемычек с проводниками большего сечения находятся проводящие ток участки с неравномерной плотностью тока. Таким образом, новая конструкция обмотки определяет необходимость разработки новой методики расчета активного сопротивления витка и, следовательно, фазы обмотки инновационной машины.

Далее описана методика, предложенная авторами и позволяющая заменить решение задачи расчета активных сопротивлений фаз обмоток путем моделирования объемного электрического поля витка моделированием плоскопараллельного поля и токов отдельных его участков.

Положим, что сечения проводников витка и частота тока таковы, что вытеснением тока в массивных проводниках (поверхностным эффектом) можно пренебречь. Тогда можно решить задачу распределения плотности тока вдоль проводников ступенчато меняющегося сечения, пользуясь уравнениями для анализа линейных электростатических полей в трехмерной или плоскопараллельной постановке.

В общем случае нужно пользоваться эллиптическим уравнением Лапласа для трехмерного вектора плотности тока j и скалярного электрического потенциала U :

$$\nabla^2 j = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\rho_x} \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\rho_y} \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho_z} \frac{\partial U}{\partial z} \right) = 0. \quad (1)$$

В нашем случае компоненты тензора удельного электрического сопротивления равны $\rho_x = \rho_y = \rho_z$.

Распределение плотности тока по проводникам обмотки определяется уравнением для вектора плотности тока j_3 , включающем параметр ρ_3^{-1} – величину, обратную тензору удельного электрического сопротивления проводника:

$$j_3 = -\rho_3^{-1} \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial U}{\partial z} \right). \quad (2)$$

В плоскопараллельной постановке задачи уравнение Лапласа для вектора плотности тока j_2 , лежащего в плоскости, и скалярного электрического потенциала U записывается в виде:

$$\nabla^2 j = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\rho_x} \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\rho_y} \frac{\partial U}{\partial y} \right) = 0. \quad (3)$$

Распределение плотности тока в этом случае описывается уравнением (2), в котором вектор

плотности тока j_2 и параметр ρ_2^{-1} являются двумерными величинами:

$$j_2 = -\rho_2^{-1} \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \right) = -\rho_2^{-1} \text{grad} U. \quad (4)$$

Картину распределения тока в проводниках обмотки удобно моделировать, пользуясь методом конечных элементов. Например, пользуясь пакетом конечно-элементного анализа ANSYS по (1), (2) или пакетом ELCUT, позволяющим решать плоскопараллельные задачи по (3), (4). С целью уменьшения времени решения задач, что важно при расчетах инновационных машин в системах автоматизированного проектирования (САПР), предложена методика расчета сопротивления витков обмоток с переменным сечением отдельных проводников с применением моделирования в пакете прикладных программ ELCUT 5.1, позволяющим решать плоскопараллельные задачи.

Поскольку виток каждой ветви обмотки можно разбить на четыре части одинаковой формы, для расчета активного сопротивления ветви достаточно рассчитать сопротивление четверти витка этой ветви. Рассечь четверть витка одной плоскостью для плоскопараллельного моделирования не представляется возможным.

На рис. 2 показана часть витка, разделенная на участки с постоянной плотностью тока и участки с соединением проводников различного сечения, плотность тока в которых изменяется. Для расчета сопротивления участков с постоянной плотностью тока можно воспользоваться обычной формулой:

$$R_y = \rho l_y / S_y,$$

где ρ – удельное сопротивление материала проводника; l – длина участка с постоянным сечением; S_y – площадь поперечного сечения этого участка.

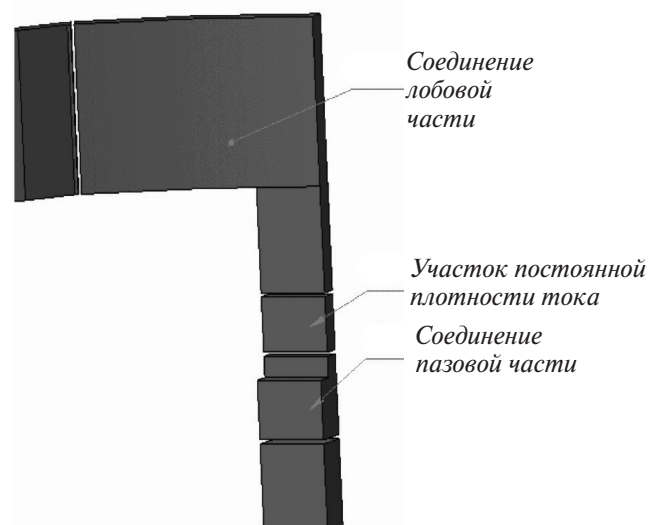


Рис. 2. Участки витка

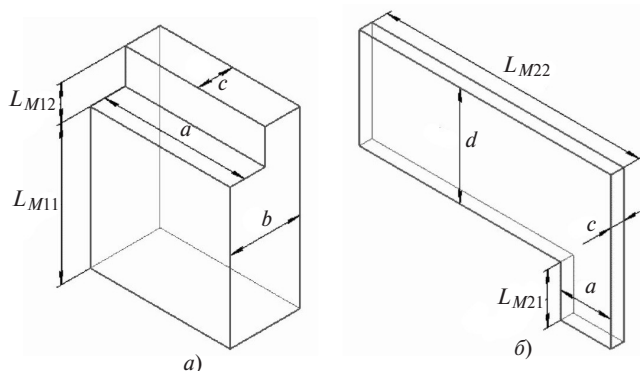


Рис. 3. Размеры участков с переменной плотностью тока

Для участков с изменяющейся плотностью тока, границы которых принимаются в пределах сечений, где изменение плотности тока превышает 3%, активные сопротивления рассчитываются с учетом неравномерного распределения плотности тока путем моделирования этих участков в пакете ELCUT 5.1. На рис. 3 показана геометрия участков с изменяющейся плотностью тока. В данном случае площадь сечения перемычки обмотки равна половине площади сечения активного проводника.

Результаты моделирования (рис. 4) показали, что размеры участков, на которых изменение плотности тока превышает 3%, для случая вдвое уменьшенного сечения перемычек соответствуют следующим соотношениям. Длины моделируемых частей активного проводника L_{M11} и перемычки L_{M12} первого участка составляют $L_{M11} = 2b$, $L_{M12} = 0,5b = c$. Длины моделируемых частей лобового проводника и перемычки второго участка $L_{M22} = 2,5d$, $L_{M21} = a$.

Картина распределений плотности тока в моделируемых участках витков, показанная на рис. 4,

позволяет сделать вывод, что наиболее высокая плотность тока — в точках сопряжения перемычек с лобовыми и активными проводниками. Также можно наблюдать низкую плотность тока в прямоугольных частях проводников, не соединенных с соседними. Можно предположить, что, удалив участки проводников с низкой плотностью тока, можно сократить расход меди и улучшить картину распределения плотности тока.

Предлагается методика расчета активного сопротивления фаз обмоток инновационных электрических машин:

выделение ветвей обмотки с одинаковой формой витков;

выделение в каждой ветви участков витка с переменной плотностью тока, отличающиеся формой соединения проводников разного сечения;

расчет активных сопротивлений этих участков, пользуясь результатами плоскопараллельного моделирования поля в пакете ELCUT 5.1;

расчет активного сопротивления витка каждой ветви, отличающейся формой витков обмотки;

определение активного сопротивления фазы обмотки с учетом схемы соединения ветвей.

Приведем выражение для расчета активного сопротивления витка обмотки с разным сечением проводников для случая одинаковой площади сечений активных и лобовых проводников и при вдвое уменьшенных сечениях перемычек:

$$R_{\text{вит}} = 4(\bar{R}_a + \bar{R}_l + \bar{R}_{\text{пер}} + \tilde{R}_1 + \tilde{R}_2) =$$

$$= 4 \left[\frac{\rho_{\text{меди}}}{q} (\bar{I}_a + \bar{I}_l + \bar{I}_{\text{пер}}) + \tilde{R}_1 + \tilde{R}_2 \right] =$$

Плотность тока j (10^7 А/м²)



Рис. 4. Распределение плотности тока на участках витка

$$=4 \left[\frac{\rho_{\text{меди}}}{q} [0,5(l_a - 4b) + 0,5(l_{\text{л}} - 5d) + 2(l_{\text{пер}} - c - a)] + \tilde{R}_1 + \tilde{R}_2 \right], \quad (5)$$

где q – площадь сечения активных и лобовых проводников; \tilde{R} , \tilde{l} с индексами «а», «л» и «пер» – сопротивления и длины проводников витка с равномерной плотностью тока; a , b , c , d – размеры участков витка, указанные на рис. 3; l_a , $l_{\text{л}}$, $l_{\text{пер}}$ – длины активных и лобовых проводников, а также переемычек; \tilde{R}_1 , \tilde{R}_2 – сопротивления участков витка, полученные по результатам моделирования первого и второго участков с неравномерной плотностью тока (рис. 4).

Для проверки достоверности разработанной методики было проведено 3D-моделирование части витка в программе ELCUT 6.2, результаты которого приведены на рис. 5. Шкала значений плотности тока соответствует рис. 4. Вытеснение тока на частоте 50 Гц незначительно, поэтому не было учтено в модели. Результаты расчета по разработанной методике подобны результатам 3D-моделирования с погрешностью менее 1%, что приемлемо для расчета активного сопротивления фазы.

Проверим влияние неравномерного распределения плотности тока на активное сопротивление фазы обмотки при изменении длины активной части электрической машины. Размеры активных и лобовых проводников для машины с $D_a = 131$ мм в соответствии с рис. 3:

$$a = 1,7 \text{ мм}; b = 3,4 \text{ мм}; c = 1,7 \text{ мм}; d = 3,4 \text{ мм};$$

$$l_a = 131 \text{ мм}; l_{\text{л}} = 42,3 \text{ мм}; l_{\text{пер}} = 6,4 \text{ мм}.$$

В соответствии с (5) вычисляем активное сопротивление витка фазы статора: $R_{\text{вит}} = 1,254$ мОм, без учета неравномерного распределения плотности тока в участках с переменным сечением:

$$R_{\text{вит}} = 1,239 \text{ мОм}.$$

Таким образом, для машины с длиной сердечника $l_a < D_a$ погрешность от пренебрежения нерав-

Относительная погрешность, %

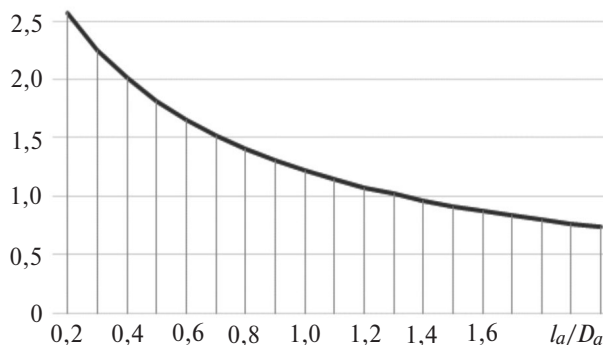


Рис. 6. Зависимость погрешности расчета активного сопротивления от длины активной части статора

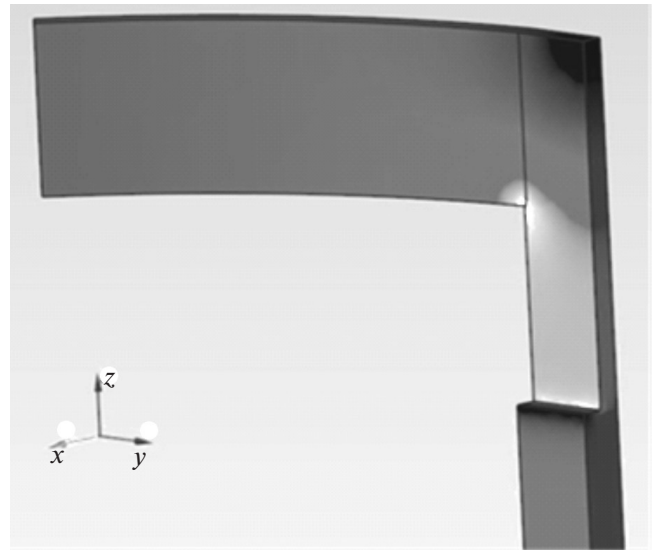


Рис. 5. 3D-моделирование растекания тока в проводнике переменной сечением

номерной плотностью тока при расчете активного сопротивления фазы (при уменьшенном вдвое сечении переемычек) составляет более 1,2%.

Расчетное значение активного сопротивления участка витка с переменным сечением при учете неравномерной плотности увеличивается относительно значения с пренебрежением этого явления. Относительная погрешность вычислений:

$$\Delta \tilde{R}_1 = \frac{\tilde{R}_{1cl} - \tilde{R}_{1app}}{\tilde{R}_{1cl}} = 7,1\%;$$

$$\Delta \tilde{R}_2 = \frac{\tilde{R}_{2cl} - \tilde{R}_{2app}}{\tilde{R}_{2cl}} = 3,5\%.$$

Зависимость относительной погрешности расчета активного сопротивления фазы при пренебрежении неравномерным распределением плотности тока от размеров активной части статора (при уменьшенном вдвое сечении переемычек) приведена на рис. 6.

Выводы. 1. Разрабатываемые сегодня в мире новые типы электрических машин требуют создания новых методик расчета и проектирования.

2. Предлагаемая авторами статьи инновационная конструкция электрических машин с переменным прямоугольным сечением проводников обмоток позволяет сократить габариты машины и объем активных материалов.

3. С целью сокращения времени активных сопротивлений фаз обмоток таких машин с учетом неравномерного растекания тока целесообразно применять предложенный авторами и реализованный в ELCUT 5.1 метод кусочно-плоскопараллельной аппроксимации поля витка.

4. Разработанная методика расчета активного сопротивления фаз статора инновационных машин с изменяющимся прямоугольным сечением проводников включает аналитическое выражение, использующее результаты моделирования неравномерного растекания тока.

5. Пренебрежение неравномерностью растекания тока в проводниках обмоток прямоугольного сечения с уменьшенным вдвое сечением переемычек дает погрешность более 1,2% при расчетах активного сопротивления фаз машин с длиной активной зоны l_a менее диаметра сердечника D_a .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ставинский А.А., Авдеева Е.А., Пальчиков О.О., Ставинский Р.А. Обобщенный метод структурно-параметрического синтеза электромагнитных систем электрических машин и индукционных аппаратов. Ч. 2. Результаты сравнительного анализа основных вариантов электромагнитной системы асинхронного короткозамкнутого двигателя. — *Электричество*, 2017, № 5, с. 18–27.
2. Шумов Ю.Н., Сафонов А.С. Энергоэффективные асинхронные двигатели с медной обмоткой ротора, отлитой под давлением (обзор зарубежных публикаций). — *Электричество*, 2014, № 8, с. 56–61.
3. Грачев П.Ю., Беспалов В.Я., Табачинский А.С., Стрижкова Е.В. Энергоэффективные асинхронные машины с нетрадиционным электромагнитным ядром. — *Электротехника*, 2018, № 2, с. 7–12.
4. Ishigami T., Tanaka Y., Nomma H. Motor stator with thick rectangular wire lap winding for HEVs. — *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, iss. 4, 2015, pp. 2917–2923.
5. Беспалов В.Я., Красовский А.Б., Панихин М.В., Фисенко В.Г. Исследование многополюсного асинхронного тягового частотно-регулируемого двигателя. — *Наука и образование: научное изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 5, с. 295–307.
6. Ганджа С.А., Киесш И.Е. Электротрансмиссия транспортных средств на базе вентильных машин комбинированного возбуждения. — *Электричество*, 2016, № 2, с. 52–57.
7. Patzak A., Bachheibl F., Baumgardt A., Dajaku G. et al. ISCAD Electric High Performance Drive for Individual Mobility at ExtraLow Voltages. *SAE Int. J. Alt. Power.* 5(1):148156, 2016, DOI:10.4271/2016011179.
8. Grachev P.Y., Bazarov A.A., Tabachinskiy A.S. Variable cross-section windings for efficiency improvement of electric machines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Ser. «International Conference «Actual Problem of Electromechanics and Electrotechnology»*, 2018, С 012004.
9. Грачев П.Ю., Горбачев Е.Е., Макаров Д.В. Энергоэффективные электрические машины с компактными лобовыми частями обмоток. — *Известия вузов. — Электромеханика*, 2014, № 5, с. 47–51.
10. Герасименко Т.Н., Поляков П.А. Особенности распределений температуры в плоских проводниках различной конфигурации. — *Известия РАН. Сер. Физическая*, 2018, т. 82, № 2, с. 237–243.
11. Макаричев Ю.А., Зубков Ю.В., Ануфриев А.С., Певчев В.П. Математическая модель синхронного генератора ветроэнергетической установки малой мощности. — *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки*, 2017, № 3 (55), с. 66–74.
12. Богуславский И.З., Кручинина И.Ю., Любимцев А.С., Штайнле Л.Ю. Метод расчета нелинейных искажений электродвижущей силы явнополюсного генератора. — *Электричество*, 2017, № 2, с. 27–32.
13. Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Сравнение методов расчета потерь в стали вентильно-индукторных двигателей. — *Электричество*, 2016, № 6, с. 41–46.
14. Грачев П.Ю., Табачинский А.С. Метод кусочно-плоскопараллельной аппроксимации поля витка с током в приложении к электромеханике. — *Математические методы в технике и технологиях*, 2016, № 12 (94), с. 305–307.

[05.06.2019]

А в т о р ы: Грачев Павел Юрьевич — доктор техн. наук, профессор Самарского государственного технического университета, диссертацию защитил в 2010 г.

Табачинский Алексей Сергеевич — аспирант, старший преподаватель кафедры Самарского государственного технического университета.

Electrichestvo, 2019, No. 12, pp. 35–41

DOI:10.24160/0013-5380-2019-12-35-41

Applying the Finite Element Method for Calculating the Resistance of Electrical Machine Windings

GRACHEV Pavel Yu. (Samara State Technical University (SSTU), Samara, Russia) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)

TABACHINSKY Aleksey S. (SSTU, Samara, Russia) — Senior Lecturer, Ph.D.-student

Good prospects expected from using innovative AC electrical machines equipped with a compact stator winding are substantiated. A procedure for calculating the resistances of machine winding phases with a

variable rectangular cross-section of the stator winding conductors is proposed. A piecewise plane-parallel approximation of the field of turns with a decreased cross-section area of partitions between their active and end-face conductors is applied. The calculation procedure is based on the Laplace equations for electrostatic fields and the finite element method, both implemented in the ELCUT environment. The results from modeling the current density distribution in the turn parts with a variable cross section are given. Application of the procedure for stage-wise determination of the innovative electrical machine's phase winding resistance is illustrated. The winding is made of a rectangular conductor with the cross section cyclically varying over the conductor length. The necessity of taking into account the influence of nonuniform current spreading in the turns with a variable cross-section in carrying out design calculations of electrical machines with the cores having different length to diameter ratios is considered. An example of estimating the errors in calculating the proposed winding's phase resistances is given.

Key words: *electrical machines, variable cross-section windings, resistance, calculation procedure, finite element method*

REFERENCES

1. Stavinsky A.A., Avdeyeva Ye.A., Pal'chikov O.O., Stavinsky R.A. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 5, pp. 18–27.
2. Shumov Yu.N., Safonov A.S. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2014, No. 8, pp. 56–61.
3. Grachev P.Yu., Bespalov V.Ya., Tabachinsky A.S., Strizhakova Ye.V. *Elektrotehnika – in Russ. (Electrical Engineering)*, 2018, No. 2, pp. 7–12.
4. Ishigami T., Tanaka Y., Homma H. Motor stator with thick rectangular wire lap winding for HEVs. – *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, iss. 4, 2015, pp. 2917–2923.
5. Bespalov V.Ya., Krasovsky A.B., Panikhin M.V., Fisenko V.G. *Nauka i obrazovaniye: nauchnoe izd. MGTU im. N.E. Baumana – in Russ. (Science and Education: scientific publ. of MGTU named N.E. Bauman)*, 2014, No. 5, pp. 295–307.
6. Gandzha S.A., Kuyessh I.Ye. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2016, No. 2, pp. 52–57.
7. Patzak A., Bachheibl F., Baumgardt A., Dajaku G. et al. ISCAD Electric High Performance Drive for Individual Mobility at ExtraLow Voltages. *SAE Int. J. Alt. Power*. 5(1):148156, 2016, DOI:10.4271/2016011179.
8. Grachev P.Y., Bazarov A.A., Tabachinsky A.S. Variable cross-section windings for efficiency improvement of electric machines. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering Ser. «International Conf. «Actual Problem of Electromechanics and Electrotechnology»*, 2018, pp. 012004.
9. Grachev P.Yu., Gorbachev Ye.Ye., Makarov D.V. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika – in Russ. (News of higher educational establishments. Electromechanics)*, 2014, No. 5, pp. 47–51.
10. Gerasimenko T.N., Polyakov P.A. *Izvestiya RAN. Ser. Fizicheskaya – in Russ. (News of RAS. Ser. Physical)*, 2018, vol. 82, No. 2, pp. 237–243.
11. Makarichev Yu.A., Zubkov Yu.V., Anufriyev A.S., Pevchev V.P. *Vestnik Samarskogo gos. tekhn. universiteta. Tekhnicheskiye nauki – in Russ. (Bulletin of Samara State Technical University. Technical sciences)*, 2017, No. 3 (55), pp. 66–74.
12. Boguslavsky I.Z., Kruchinina I.Yu., Lyubimtsev A.S., Shtainle L.Yu. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 2, pp. 27–32.
13. Antipov V.N., Grozov A.D., Ivanova A.V. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2016, No. 6, pp. 41–46.
14. Grachev P.Yu., Tabachinsky A.S. *Matematicheskiye metody v tekhnike i tekhnologiyakh – in Russ. (Mathematical methods in technique and technologies)*, 2016, No. 12 (94), pp. 305–307.

[05.06.2019]