

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.321

Андрей Ильич Тихонов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики, Россия, Иваново, e-mail: aitispu@mail.ru

Алексей Вадимович Стулов

ООО «НПК «АВТОПРИБОР»», кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научной работе, Россия, Владимир, e-mail: alxstl@mail.ru

Анна Валентиновна Лихачева

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель, Россия, Иваново, e-mail: a.net.a@ya.ru

Михаил Игоревич Никифоров

ООО «НПК «АВТОПРИБОР»», ассистент, Россия, Владимир, e-mail: mejoke@mail.ru

Илья Витальевич Еремин

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель, Россия, Иваново, e-mail: bkmzzzzz@yandex.ru

Разработка методики проектирования торцевых синхронных двигателей из аморфной стали с использованием технологии цифровых двойников¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. Современные технологии порождающего проектирования и цифровых двойников электротехнических устройств строятся на основе использования полевых моделей, как правило трехмерных. Также имеется опыт решения задач проектирования и точного имитационного моделирования электрических машин и аппаратов на основе совокупности 2D-моделей физических полей. Использование в современных системах инженерного анализа автоматически генерируемых полевых моделей при проектировании и оптимизации электрических машин и аппаратов позволяет избавиться от многих допущений и устаревающих эмпирических и полуэмпирических зависимостей, а также выйти на новый методологический уровень теории проектирования, отличающийся унифицированным подходом к расчету различных устройств. В связи с этим актуальной является разработка методики проектирования синхронного двигателя нетиповой конструкции, опирающейся на использование

¹ Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ, региональный конкурс Ивановской области, проект № 20-48-370001 от 19.01.2021.

The research is carried out with financial support of RFFFR, regional contest of Ivanovo region, project № 20-48-370001 dated 19.01.2021.

двухмерных моделей стационарного магнитного поля на разных этапах проектирования и позволяющей получать решение даже в условиях отсутствия предварительных исследований и рекомендаций.

Материалы и методы. Использован метод конечных элементов, реализованный средствами библиотеки EMLib (авторская разработка), позволяющей рассчитывать магнитные поля в 2D-постановке, а также методы теории синхронных машин и объектно-ориентированного программирования на VBA в среде MSExcel. При разработке методики и системы проектирования использованы элементы технологии цифровых двойников и порождающего проектирования.

Результаты. Разработана методика проектирования торцевого синхронного двигателя с использованием автоматически генерируемых серий полевых моделей на этапах выбора высоты постоянного магнита, расчета параметров схемы замещения, построения угловой характеристики. На базе популярного пакета MSExcel создана система проектирования торцевого синхронного двигателя, в которую внедрена библиотека EMLib, позволяющая использовать результаты расчета магнитного поля в основных проектных операциях. С помощью созданной системы спроектирован и испытан вариант торцевого синхронного двигателя.

Выводы. Полученные результаты могут быть использованы при разработке методик проектирования электрических машин и аппаратов произвольной, в том числе нетиповой, конструкции, для которых отсутствуют апробированные алгоритмы инженерного анализа.

Ключевые слова: проектирование торцевых синхронных двигателей, цифровые двойники, порождающее проектирование, метод конечных элементов

Andrey Ilyich Tikhonov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Physics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: aitispu@mail.ru

Aleksey Vadimovich Stulov

LTD "NPK AVTOPRIBOR", Candidate of Engineering Sciences, Deputy Chief Executive Officer for Research, Russia, Vladimir, e-mail: alxsti@mail.ru

Anna Valentinovna Likhachova

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer, Russia, Ivanovo, e-mail: a.net.a@ya.ru

Michael Igorevich Nikiforov

LTD "NPK AVTOPRIBOR", Assistant, Russia, Vladimir, e-mail: mejoke@mail.ru

Ilya Vitalievich Eryomin

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer, Russia, Ivanovo, e-mail: bkmzzzzz@yandex.ru

Development of method to design end-face synchronous motors made of amorphous steel using digital twin technology

Abstract

Background. Modern technologies of generative design and digital twins of electrical devices are based on the use of field models, as a rule, three-dimensional ones. Also, it is possible to solve design problems and to simulate accurately electrical machines and devices based on a set of 2D models of physical fields. Application of automatically generated field models in modern systems of engineering analysis during the design and optimization of electrical machines and devices makes it possible to get rid of many assumptions and outdated empirical and semi-empirical dependencies, as well as to reach a new methodological level of design theory, characterized by a unified approach to the calculation of various devices. Therefore, the purpose of this article is to develop a methodology to design a synchronous motor of an atypical design, based on the use of two-dimensional models of a stationary magnetic field at different design stages and allowing a solution to be obtained even in the absence of preliminary studies and recommendations.

Materials and methods. The finite element method is used implemented by means of the EMLib library (author's development), which allows calculating magnetic fields in a 2D formulation. Also, methods of the theory of synchronous machines and object-oriented programming in VBA in the MSExcel environment are used. Elements of digital twin technology and generative design are used while developing the methodology and design system.

Results. A method to design an end-face synchronous motor has been developed using automatically generated set of field models at the stages of choosing the height of a permanent magnet, calculating the parameters of an equivalent circuit, and an angular characteristic. Based on the popular MSExcel package, a system to design an end-face synchronous motor has been developed. The EMLib library has been imple-

mented into the system, it allows using the results of calculating the magnetic field in the key design operations. The end-face synchronous motor has been designed and tested on the base of the developed system. **Conclusions.** The results of the research can be used during the development of methods to design electrical machines and devices of arbitrary, including non-standard design, for which approved algorithms for engineering analysis do not exist.

Key words: design of end-face synchronous motors, digital twins, generative design, finite element method

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.4.038-046

Введение. Особенности технологии цифровых двойников и порождающего проектирования электромеханических устройств на основе 2D-моделей магнитного поля, разрабатываемой в ИГЭУ, описаны на примере силовых трансформаторах, в частности, в [1]. Однако данная технология может быть применена не только для трансформаторов, но и для электрических машин произвольного типа и произвольно-го исполнения.

В [1] также отмечено, что, несмотря на традиционное использование для порождающего проектирования 3D-моделей физических полей, создание точных полевых моделей электрических машин и трансформаторов произвольной конструкции может быть осуществлено и с использованием 2D-моделей, которые не только проще и доступней, но и зачастую точнее 3D-моделей. Так, в случае трансформаторов задачу точного расчета параметров электромагнитных процессов удается свести к нескольким 2D-моделям магнитного поля, реализованным в плоскопараллельной и осесимметричной постановках.

В [2] приведен пример реализации методики расчета электромагнитных процессов на основе 2D-моделей магнитного поля для случая торцевого синхронного генератора. Данная модель строится в виде двумерной развертки торцевой машины по средней линии статора. Это позволяет избавиться от необходимости рекомендуемого в таких случаях перехода к 3D-моделированию магнитного поля.

Данные положения были заложены в основу разработки методики проектирования торцевого синхронного двигателя (ТСД), способного работать в широком диапазоне скоростей от 1000 до 10000 об/мин с питанием от источника переменного тока с регулируемой частотой.

Как известно, частота вращения синхронного двигателя, об/мин, определяется выражением

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}, \quad (1)$$

где f – частота питающего напряжения; p – число пар полюсов.

Этот значит, что даже при $p = 1$ для обеспечения частоты вращения $n = 10000$ об/мин частота питающего напряжения должна составлять $f = 167$ Гц. Удельные потери в электротехнической стали зависят от частоты f и магнитной индукции B в соответствии выражением

$$p = p_{1/50} B^m \left(\frac{f}{50} \right)^n, \quad (2)$$

где $p_{1/50}$ – удельные потери в стали при индукции $B = 1$ Тл и частоте $f = 50$ Гц; m и n – коэффициенты, значения которых определяются эмпирическим путем (например, согласно [3], для электрических машин в большинстве случаев принимается $n = 1,3$; $m = 2$).

Из этого следует, что с ростом частоты растут потери в стали. И уже при $f = 167$ Гц эти потери возрастают почти в 5 раз по сравнению с промышленной частотой 50 Гц. Если же машина выполнена с $p > 1$, то потери возрастают настолько, что использование обычной электротехнической стали зачастую становится нецелесообразным.

В этом смысле интересен вариант конструкции машины, статор которой изготавливается из аморфной электротехнической стали толщиной 20–25 мкм, характеризующейся пониженными удельными потерями.

Аморфная сталь получается с использованием особых технологий путем охлаждения расплавленного железа и аморфообразующих элементов (В, С, Si) со скоростями, при которых не успевает сформироваться кристаллическая структура [4]. Электрическое сопротивление таких сталей в 3–5 раз выше, чем у кристаллических аналогов. Придание определенной (практически прямоугольной и узкой) формы петли гистерезиса достигается термической или термомагнитной обработкой [5].

Все это позволяет использовать данную сталь в устройствах, работающих на повышенных частотах.

Возможные варианты различных исполнений ТСД приведены, в частности, в [6, 7]. Элементы методик расчета ТСД отражены в многочисленных трудах зарубежных и российских ученых², в частности в трудах ученых ИГЭУ [8, 9]. Например, в [9], как и в [2], для анализа магнитного поля торцевой машины была использована 2D-модель.

В качестве прототипов для конструктивного исполнения ТСД выбраны машины компании YASA (Великобритания) [10, 11]. Разработка конструкции ТСД с сердечником из аморфной стали, способной работать на высокой частоте, была осуществлена в ООО «НПК АВТОПРИБОР». Детали конструкции являются коммерческой тайной завода. Принципиальным здесь является то, что статор выполнен с $p = 3$ или $p = 4$ и состоит из $Z = m \cdot 2p$ сегментов, имеющих трапецеидальное сечение, набранных из листов аморфной стали разной ширины (здесь $m = 3$ – количество фаз машины). Обмотка статора наматывается на сегменты в осевом направлении. Два ротора, выполненных в виде дисков из конструкционной стали с приклеенными на них постоянными магнитами, располагаются по обе стороны сегментированного статора.

Методы исследования. В основе методики проектирования ТСД лежит расчет стационарного магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами в режиме холостого хода (ХХ) и под нагрузкой. Расчет выполнялся с использованием разработанной в ИГЭУ библиотеки конечно-элементного моделирования магнитных полей в 2D-постановке EMLib [12, 13]. Особенность данной библиотеки состоит в том, что она способна внедряться в открытые приложения со встроенными системами программирования, поставляя в них функции построения модели, а также функции, позволяющие осуществить численное исследование созданной модели.

В качестве основы для реализации методик проектирования ТСД был выбран пакет MSExcel, имеющий встроенную си-

стему программирования VBA. Параметрический генератор полевой модели ТСД представляет собой программный код VBA, позволяющий по заданному списку величин, характеризующих конструкцию машины, строить конечно-элементную двумерную модель развертки цилиндрического сечения машины по средней окружности активной части при разных положениях ротора относительно статора.

На рис. 1 представлена модель однополюсного деления машины в режиме идеального ХХ. Полюсное деление статора представлено тремя сегментами, на которые намотаны катушки фазных обмоток. Собственно форма сегментов статора показана на рис. 2.

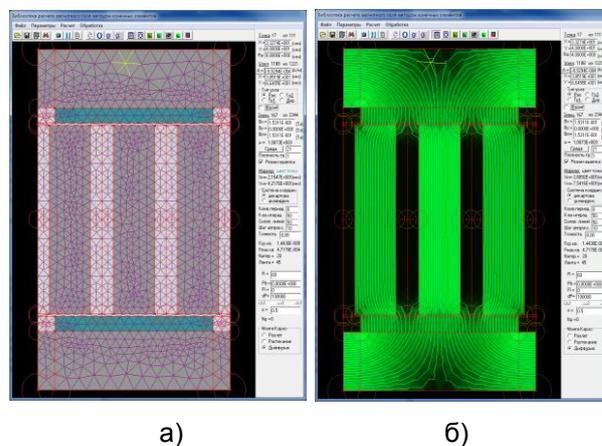


Рис. 1. Модель ТСД (а) и результаты расчета магнитного поля (б) в режиме идеального ХХ

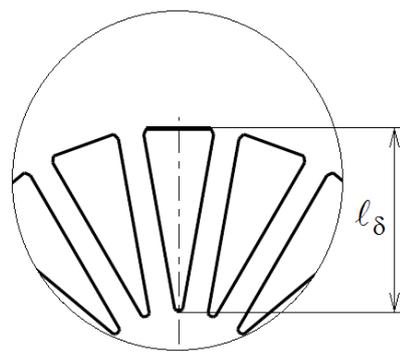


Рис. 2. Форма сегментов статора ТСД

По результатам расчета магнитного поля в режиме идеального ХХ (ток в обмотке статора (ОС) равен нулю, угол нагрузки $\Theta = 0$) рассчитывается величина основного магнитного потока на полюсном делении:

$$\Phi = \frac{|A_1 - A_2 + A_3 - A_4|}{2} l_s, \quad (3)$$

где A_i – значения векторного магнитного потенциала на границах полюсного деле-

² См., например: Ганжа С.А. Вентильные электрические машины с аксиальным магнитным потоком. Анализ, синтез, внедрение в производство дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.01: защищена 21.12.12. – Екатеринбург, 2012. – 271 с.

ния, т. е. в 4 крайних точках модели, выбранных на внутренних границах нижнего и верхнего роторов (по рис. 1); ℓ_δ – расчетная длина машины, равная высоте сегментов статора (по рис. 2).

Максимальное значение магнитной индукции в сегментах статора B определяется для точки, находящейся в центре среднего сегмента. Максимальное значение потокосцепления фазной обмотки статора определяется в обмотке, расположенной на среднем сегменте статора, по средневзвешенному значению векторного магнитного потенциала:

$$\Psi_1 = \frac{\ell_\delta w_1}{3} \left(\frac{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^3 S_{\Delta i} A_{ij}}{\sum_{i=1}^{N_1} S_{\Delta i}} - \frac{\sum_{i=1}^{N_2} \sum_{j=1}^3 S_{\Delta i} A_{ij}}{\sum_{i=1}^{N_2} S_{\Delta i}} \right), \quad (4)$$

где w_1 – число витков ОС; N_1, N_2 – число элементов конечно-элементной сетки, покрывающих сечения соответственно левой и правой сторон катушки, намотанной на среднем сегменте статора; $S_{\Delta i}$ – площадь i -го элемента; A_{ij} – значения векторного магнитного потенциала в узлах i -го элемента.

ЭДС обмотки статора вычисляем по формуле

$$E'_1 = 4,44 \cdot f \Psi_1. \quad (5)$$

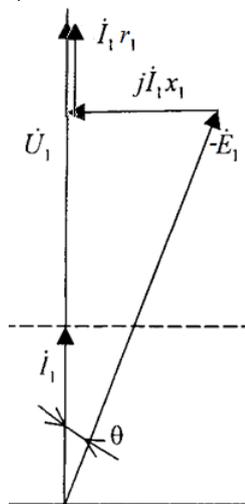


Рис. 3. Векторная диаграмма ТСД для случая $\cos \varphi = 1$

В случае использования постоянных магнитов степень возбуждения ТСД задается маркой и толщиной магнита. Принимаем, что спроектированный двигатель должен обладать возбуждением, соответствующим варианту $\cos \varphi = 1$. Векторная диаграмма для этого случая с учетом па-

дения напряжения в активном сопротивлении приведена на рис. 3.

При заданной ОС ее сопротивление r_1 рассчитывается традиционным способом [3]. Индуктивное сопротивление ОС определяем по формуле

$$X_1 = X_{1\sigma} + X_a, \quad (6)$$

где $X_{1\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния ОС; X_a – индуктивное сопротивление реакции якоря.

Сопротивление $X_{1\sigma}$ складывается из трех составляющих:

$$X_{1\sigma} = X_{1п} + X_{1л} + X_{1д},$$

где $X_{1п}$ – сопротивление пазового рассеяния; $X_{1л}$ – сопротивление лобового рассеяния; $X_{1д}$ – сопротивление дифференциального рассеяния.

Сопротивление $X_{1п}$ можно принять равным нулю, так как анализ картины магнитного поля пазового рассеяния показывает, что силовые линии магнитного поля, уходящие в соседний сегмент статора через паз, замыкаются через соседний сегмент по путям основного потока, т. е. являются его частью. А линии магнитного поля, которые, выходя из сегмента, обратно возвращаются в него, обеспечивают нулевое потокосцепление поля пазового рассеяния с обмоткой статора.

Сопротивления $X_{1л}$ и $X_{1д}$ рассчитываются в соответствии с [3].

Для расчета X_a в конечно-элементной модели магнитного поля, представленной на рис. 1, постоянные магниты заменяются воздухом (рис. 4,а), а в обмотках статора задаются токи, соответствующие мгновенным значениям токов фазных обмоток статора в номинальном режиме в момент времени, когда в средней обмотке протекает максимальный ток при допущении о симметрии системы токов статора:

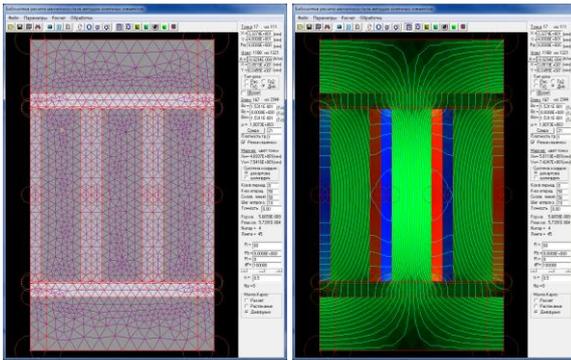
$$i_{11} = \frac{\sqrt{2}}{2} I_{1н}, \quad i_{12} = \sqrt{2} I_{1н}, \quad i_{13} = \frac{\sqrt{2}}{2} I_{1н}, \quad (7)$$

где

$$I_{1н} = \frac{P_2}{m_1 U_1 \cos \varphi \cdot \eta}. \quad (8)$$

При этом

$$X_a = 2\pi f \frac{\Psi'_{12}}{i_{12}} 2p. \quad (9)$$



а) б)

Рис. 4. Модель ТСД для расчета индуктивного сопротивления реакции якоря (а) и результаты расчета магнитного поля (б)

Полученные данные (рис. 3) позволяют рассчитать угол нагрузки ТСД при заданном напряжении сети U_1 по формуле

$$\Theta = \arctg \left(\frac{I_1 x_1}{U_1 - I_1 r_1} \right) \quad (10)$$

и величину ЭДС ОС по формуле

$$E_1 = \sqrt{(U_1 - I_1 r_1)^2 + (I_1 x_1)^2} \quad (11)$$

Сравнивая значения ЭДС ОС, полученные по (11) и (5), оцениваем их расхождение:

$$\Delta = \frac{|E_1 - E'_1|}{E_1} 100\% \quad (12)$$

Если данное расхождение больше заданной достаточно малой величины $|\Delta|$, то изменяем высоту магнита, перестраиваем конечно-элементную модель и повторяем расчет. Серия расчетов подбора высоты постоянного магнита реализуется автоматически в цикле с помощью макроса VBA.

Для построения угловой характеристики ТСД реализуется серия расчетов машины при разных углах поворота ротора относительно статора (рис. 5). При этом на каждом шаге данной серии модель полностью перестраивается в соответствии с текущим положением ротора. Ток ОС при этом пересчитывается по формуле

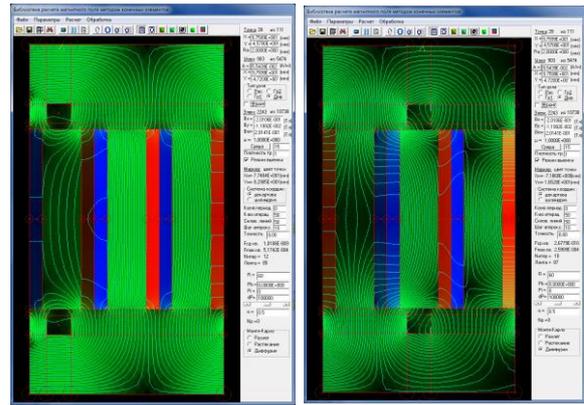
$$i_1 = \frac{\dot{E}_1 + \dot{U}_1}{Z_1} = \frac{E_1 e^{j\Theta} + U_1 e^{j0}}{r_1 + jx_1} \quad (13)$$

При этом

$$I_1 = |i_1|, \quad \varphi_1 = \arg(i_1), \quad (14)$$

а ток в k -й фазе равен

$$i_{1k} = I_1 \cos \left(\varphi_1 + \begin{cases} \pi/3, & \text{при } k = 1, \\ 0, & \text{при } k = 2, \\ -\pi/3, & \text{при } k = 3 \end{cases} \right). \quad (15)$$



а) б)

Рис. 5. Результаты расчета магнитного поля ТСД при разных углах нагрузки

Электромагнитный момент, действующий на ротор, определяется из расчета магнитного поля средствами библиотеки EMLib по формуле

$$M = F_x \cdot 2p \cdot R_s, \quad (16)$$

где p – число пар полюсов; R_s – радиус средней окружности торцевой машины.

Проекция на ось Ox электромагнитной силы, действующей на каждую половину торцевого ротора, вычисляется по формуле

$$F_x = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_3} \begin{bmatrix} H_x (n_x H_x + n_y H_y) + \\ + B_x (n_x H_x + n_y H_y) - \\ - n_x (H_x B_x + H_y B_y) \end{bmatrix} \Delta L \cdot L_\delta, \quad (17)$$

которая выводится из уравнения [14]

$$\vec{F} = \frac{1}{2} \oint (\vec{H}(\vec{n}\vec{B}) + \vec{B}(\vec{n}\vec{H}) - \vec{n}(\vec{H}\vec{B})) dS, \quad (18)$$

где \vec{n} – вектор нормали к поверхности, ограничивающей выделенный объем, на который действует искомая сила; N_3 – количество сторон элементов, которые образуют границу выделенного объема.

Результаты исследований. В качестве результатов проведенного исследования можно представить систему проектирования ТСД, созданную на базе пакета MSExcel (рис. 6), в которой реализована приведенная выше методика.

С помощью набора макросов, написанных в системе программирования VBA, осуществляется предварительный проектный расчет, автоматически генерируется серия конечно-элементных моделей магнитного поля, с помощью которых определяется толщина магнита, обеспечивающая требуемую ЭДС в обмотке статора (рис. 7). Затем вычисляются магнитные и электри-

ческие потери, после чего в серии расчетов поля при разных положениях ротора строится угловая характеристика (рис. 8) (сложный характер кривой на рис. 8 объясняется тем, что в алгоритме расчета угловой характеристики магнитное поле рассчитывается при допущении о неподвижном роторе, поэтому на характер расчетной кривой влияет зубчатость статора; реальная угловая характеристика будет более гладкой).

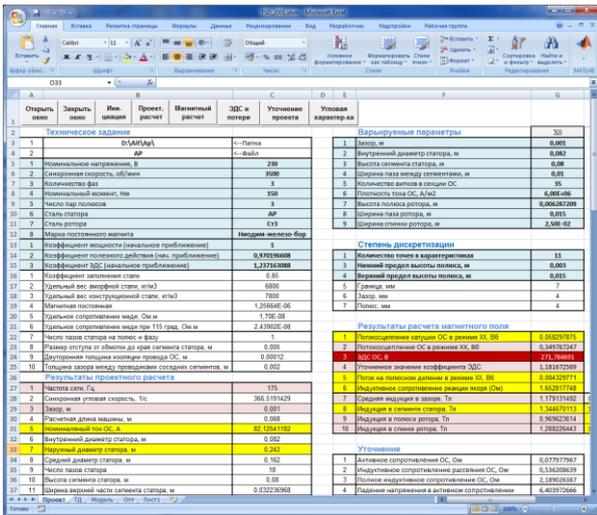


Рис. 6. Система проектирования ТСД

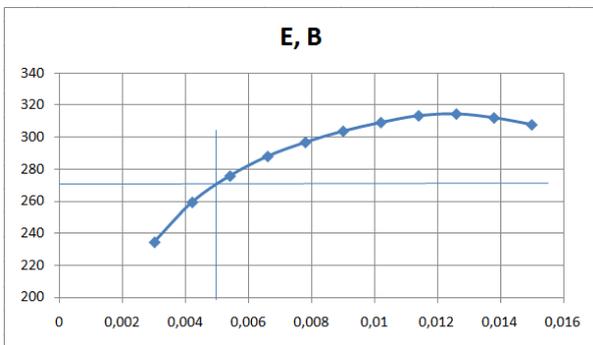


Рис. 7. Выбор требуемой толщины магнита для обеспечения требуемой величины ЭДС обмотки статора ТСД

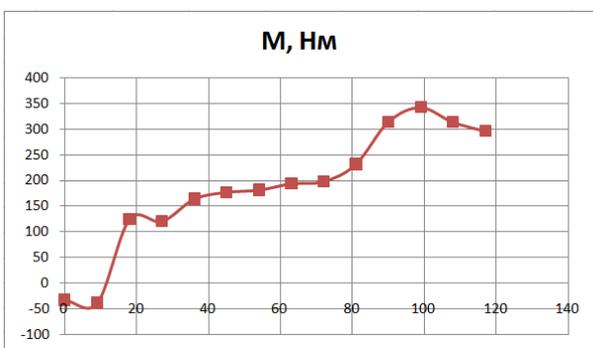


Рис. 8. Угловая характеристика ТСД, построенная по результатам расчета магнитного поля на серии полевых моделей

Результаты работы системы проектирования были опробованы при разработке машины, внешний вид которой показан на рис. 9.

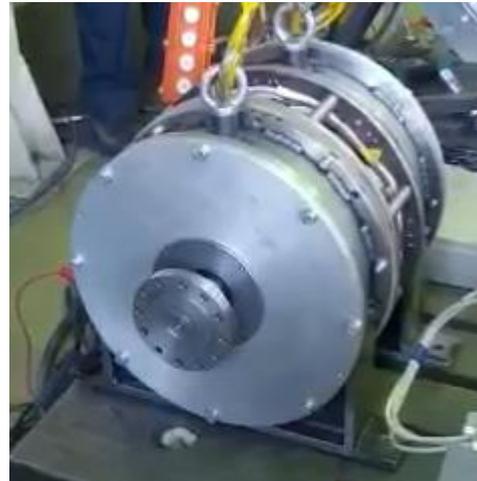


Рис. 9. Опытный образец спроектированного ТСД

Выводы. При разработке системы проектирования торцевых синхронных двигателей была использована технология цифровых двойников, построенная на основе 2D-моделей стационарного магнитного поля, которая хорошо оправдала себя при моделировании процессов в силовых трансформаторах и порождающем проектировании машин постоянного тока. При проектировании ТСД также удается свести задачу расчета магнитного поля к 2D-постановке. При этом модуль расчета магнитного поля реализован с использованием динамически подключаемой библиотеки, которая внедряется в систему программирования VBA, встроенную в пакет MSExcel. Это позволяет использовать функции параметрической генерации и расчета полевой модели в алгоритмах, требующих многократного обращения к полевой модели, в том числе с полной ее перестройкой на каждом шаге численного эксперимента. В результате была разработана оригинальная методика проектирования, позволяющая избавиться от многих допущений и полуэмпирических формул, а также создана система проектирования ТСД. Спроектированный с ее помощью ТСД подтвердил корректность разработанной методики.

Список литературы

1. Разработка 2D-моделей магнитного поля для реализации технологии цифровых

двойников и порождающего проектирования силовых трансформаторов / А.И. Тихонов, А.В. Стулов, И.С. Снит'ко, А.В. Подобный // Вестник ИГЭУ. – 2020. – Вып. 3. – С. 32–41.

2. **Тихонов А.И., Шишкин В.П., Рубцов Д.В.** Поиск оптимальной конструкции торцевого ветрогенератора с использованием динамической полевой модели // Вестник ИГЭУ. – 2005. – Вып. 3. – С. 43–47.

3. **Проектирование** электрических машин: учебник для вузов / под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2011. – 767 с.

4. **Золотухин И.В.** Физические свойства аморфных металлических материалов. – М.: Metallurgiya, 1986. – 176 с.

5. **Исследование** изменения микроструктуры аморфных металлических сплавов, после низкотемпературной обработки, методом нейтронной дифракции / А.И. Бескровный, Е.Б. Докукин, М.Е. Докукин, Н.С. Перов // Совещание по исследованиям на реакторе ИБР-2. – Дубна, 2002. – С. 72.

6. **Ганджа С.А.** Сравнительный анализ различных конструктивных исполнений вентиляционных машин с аксиальным магнитным потоком по развиваемой электромагнитной мощности // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 2. – С. 5–11.

7. **Hincapié J.S.L., Sandoval A.V., Parra J.Z.** Axial Flux Eelectric Monor // Military University of New Granada. Mechatronics Engineering. – URL: <https://www.emworks.com/ckfinder/userfiles/files/Axial%20Flux%20Motor.pdf>

8. **Шишкин В.В., Казаков Ю.Б.** Определение ЭДС и главных размеров торцевых магнитоэлектрических генераторов с беспазовым сердечником статора и кольцевой обмоткой якоря // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 6. – С. 63–67.

9. **Корнилов Д.С., Казаков Ю.Б., Шишкин В.В.** Моделирование магнитного поля и совершенствование конструкции магнитной системы торцевого генератора с постоянными магнитами // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 2. – С. 29–32.

10. **YASA P400 R Series** // YASA Y. – URL: https://www.yasa.com/wp-content/uploads/2018/01/YASA_P400_Product_Sheet.pdf

11. **YASA 750 R** // YASA Y. – URL: <https://www.yasa.com/wp-content/uploads/2018/01/YASA-750-Product-Sheet.pdf>

12. **Тихонов А.И., Тамьярова М.В.** Использование библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля EMLib в задачах анализа и синтеза электромеханических устройств // Электромагнитное поле и материалы (фундаментальные физические исследования): материалы XXVI Междунар. конф., НИУ МЭИ. – М.: ИНФРА-М, 2018. – С. 562–575.

13. **Шмелев А.С., Пайков И.А., Булатов Л.Н.** Методика организации численного

исследования электротехнических устройств с использованием библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 1. – С. 55–61.

14. **EICut.** Моделирование двумерных полей методом конечных элементов: руководство пользователя. – СПб.: Производственный кооператив TOP, 2007. – 297 с.

References

1. Tikhonov, A.I., Stulov, A.V., Snit'ko, I.S., Podobnyy, A.V. Razrabotka 2D-modeley magnitnogo polya dlya realizatsii tekhnologii tsifrovyykh dvoynikov i porozhdayushchego proektirovaniya silovykh transformatorov [Development of 2D magnetic field models for the implementation of digital twin technology and generative design of power transformers]. *Vestnik IGEU*, 2020, issue 3, pp. 32–41.

2. Tikhonov, A.I., Shishkin, V.P., Rubtsov, D.V. Poisk optimal'noy konstruksii tortsevogo vetrogeneratora s ispol'zovaniem dinamicheskoy polevoy modeli [Search for the optimal design of the end wind turbine using a dynamic field model]. *Vestnik IGEU*, 2005, issue 3, pp. 43–47.

3. Kopylova, I.P. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Design of electrical machines: textbook for universities]. Moscow: Yurayt, 2011. 767 p.

4. Zolotukhin, I.V. *Fizicheskie svoystva amorfnykh metallicheskih materialov* [Physical properties of amorphous metallic materials]. Moscow: Metallurgiya, 1986. 176 p.

5. Beskrovnyy, A.I., Dokukin, E.B., Dokukin, M.E., Perov, N.S. Issledovanie izmeneniya mikrostrukturny amorfnykh metallicheskih splavov, posle nizkotemperaturnoy obrabotki, metodom neytronnoy difraktsii [Study of changes in the microstructure of amorphous metal alloys after low-temperature treatment by neutron diffraction]. *Soveshchanie po issledovaniyam na reaktore IBR-2* [Meeting on research at the IBR-2 reactor]. Dubna, 2002, p. 72.

6. Gandzha, S.A. Sravnitel'nyy analiz razlichnykh konstruktivnykh ispolneniy ventil'nykh mashin s aksial'nym magnitnym potokom po razvivaemoy elektromagnitnoy moshchnosti [Comparative analysis of various designs of valve machines with axial magnetic flux based on the developed electromagnetic power]. *Izvestiya vuzov. Electromechanics*, 2012, no. 2, pp. 5–11.

7. Hincapié, J.S.L., Sandoval, A.V., Parra, J.Z. Axial Flux Eelectric Monor. Military University of New Granada. Mechatronics Engineering. – Available at: <https://www.emworks.com/ckfinder/userfiles/files/Axial%20Flux%20Motor.pdf>

8. Shishkin, V.V., Kazakov, Yu.B. Opredelenie EDS i glavnykh razmerov tortsevyykh magnitoelektricheskikh generatorov s bespazovym serdechnikom statora i kol'tsevoy obmotkoy yakorya [Determination of EMF and main dimensions of end magnetoelectric generators with a slotless

stator core and an annular armature winding]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 6, pp. 63–67.

9. Kornilov, D.S., Kazakov, Yu.B., Shishkin, V.V. Modelirovanie magnitnogo polya i sovershenstvovanie konstruksii magnitnoy sistemy tortsevogo generatora s postoyannymi magnitami [Modeling the magnetic field and improving the design of the magnetic system of the end-face generator with permanent magnets]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 2, pp. 29–32.

10. YASA P400 R Series. YASA Y. Available at: https://www.yasa.com/wp-content/uploads/2018/01/YASA_P400_Product_Sheet.pdf

11. YASA 750 R // YASA Y. Available at: <https://www.yasa.com/wp-content/uploads/2018/01/YASA-750-Product-Sheet.pdf>

12. Tikhonov, A.I., Tam'yarova, M.V. Ispol'zovanie biblioteki konechno-elementnogo modelirovaniya magnitnogo polya EMLib v zadachakh analiza i sinteza elektromekhanicheskikh ustroystv [Use of the library of finite element modeling of the magnetic field EMLib in the prob-

lems of analysis and synthesis of electromechanical devices]. *Materialy XXVI Mezhdunarodnoy konferentsii «Elektromagnitnoe pole i materialy (fundamental'nye fizicheskie issledovaniya)»*. NIU MEI [Materials XXVI international conference “Electromagnetic field and materials (fundamental physical research)”. NRU MPEI]. Moscow: INFRA-M, 2018, pp. 562–575.

13. Shmelev, A.S., Paykov, I.A., Bulatov, L.N. Metodika organizatsii chislennogo issledovaniya elektrotekhnicheskikh ustroystv s ispol'zovaniem biblioteki konechno-elementnogo modelirovaniya magnitnogo polya [Methods for organizing the numerical study of electrical devices using the library of finite element modeling of the magnetic field]. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 1, pp. 55–61.

14. *EICut. Modelirovanie dvumernykh poley metodom konechnykh elementov: rukovodstvo pol'zovatelya* [Finite Element Modeling of 2D Fields: A User's Guide]. Saint-Petersburg: Production cooperative TOP, 2007. 297 p.