

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.321

Методика структурно-параметрической оптимизации коллекторных машин с использованием модели магнитного поля и генетического алгоритма

М.В. Тамьярова¹, А.И. Тихонов²

¹ ФГБОУВО «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск, Российская Федерация

² ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: stprepod@mail.ru, aitispu@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Современное автоматизированное проектирование электрических машин предполагает наличие этапа параметрической оптимизации, в том числе, с использованием полевых моделей, реализуемых с помощью пакетов инженерных расчетов, таких как ANSYS Maxwell. Однако параметрическая оптимизация не позволяет осуществить выход на новые технические решения, учитывающие особенности распределения неподвижного относительно статора магнитного поля коллекторных машин. Несмотря на свою актуальность, задача структурной оптимизации конструкции коллекторной машины на сегодня не решена. В связи с этим актуальным является разработка методики структурно-параметрической оптимизации коллекторных машин.

Материалы и методы. Поиск оптимальной конструкции коллекторной машины осуществляется с использованием генетического алгоритма с обращением к конечно-элементной модели магнитного поля на каждом шаге оптимизации. Использован пакет MS Excel, в который внедрена библиотека моделирования магнитного поля EMLib. Макросы генерации полевой модели и поиска оптимального решения написаны на языке VBA. Для анализа динамических характеристик машины использован пакет MatLab Simulink.

Результаты. Разработан параметрический генератор конечно-элементной модели, позволяющий в рамках одного программного кода строить модели магнитного поля коллекторных машин произвольных типоразмеров, что позволило организовать процесс оптимизации, в котором при варьировании аргументов изменяются не только параметры машины, но и ее конструкция, что подходит под определение структурно-параметрической оптимизации. Проведена декомпозиция расчетной области коллекторной машины, разработаны принципы стыковки типовых фрагментов. Полученные в ходе оптимизации варианты конструкции машины исследуются с помощью полевой динамической модели. Разработана методика структурно-параметрической оптимизации коллекторных машин, позволяющая получать существенную экономию активных материалов при их проектировании за счет выхода на новые структурные решения.

Выводы. Разработанная методика ориентирована на использование доступных программных средств и может быть использована в мелкосерийном и штучном производстве электрических машин даже в условиях малого и среднего бизнеса.

Ключевые слова: коллекторная машина, структурно-параметрическая оптимизация, генетические алгоритмы, метод конечных элементов, полевая динамическая модель коллекторной машины

Method of structural-parametric optimization of collector machines using a magnetic field model and a genetic algorithm

M.V. Tamyarova¹, A.I. Tikhonov²

¹ Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russian Federation

² Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

E-mail: stprepod@mail.ru, aitispu@mail.ru

Abstract

Background. An essential requirement of modern automated design of electrical machines is the stage of parametric optimization, including by using field models realized with engineering calculation packages, such as ANSYS Maxwell.

However, parametric optimization does not allow us to find new technical solutions that take into account the distribution of collector machine magnetic field that is stationary relative to the stator. Despite its relevance, the problem of structural optimization of a collector machine has not been solved yet. The purpose of this study is to develop a methodology of structural and parametric optimization of collector machines.

Materials and methods. The search for the optimal design of the collector machine is carried out using a genetic algorithm with reference to the finite element model of the magnetic field at each optimization step. The MSExcel package is used, in which the EMLib magnetic field modeling library is implemented. The macros of the generation of the field model and the search for the optimal solution are written in the VBA language. To analyze the dynamic characteristics of the machine, MatLab Simulink is used.

Results. A parametric generator of the finite element model has been developed, which makes it possible, in the framework of one program code, to build models of magnetic field of collector machines of arbitrary types. This allowed us to organize an optimization process in which variations in the arguments change both the machine parameters and its design, which quite well corresponds to the definition of structural-parametric optimization. To this end, we have carried out decomposition of the computational domain of the collector and developed principles of joining the typical fragments. The variants of machine design obtained during the optimization process are investigated using a field dynamic model. A technique of structural-parametric optimization of collector machines has been developed. The technique makes it possible to save substantially active materials at the design stage by finding new structural solutions.

Conclusions. The developed methodology is focused on the use of available software and can be used in small-scale and single-piece production of electrical machines, even in small and medium-sized businesses.

Key words: collector machine, structural-parametric optimization, genetic algorithms, finite element method, field dynamic model of a collector machine

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.5.046-055

Введение. История электротехники свидетельствует, что, несмотря на многократные попытки исключить коллекторную машину (КМ) из систем электропривода, она постоянно находит все новые области применения, о чем говорил еще Э. Арнольд в начале XX века. Помимо достоинств в плане регулировочных свойств и перегрузочной способности, КМ имеет замечательное свойство, состоящее в относительной неподвижности магнитного потока главных полюсов относительно статора. Это дает возможность учитывать особенности распределения магнитного поля в элементах индуктора путем оптимизации его формы. Особенно большим многообразием конструктивных решений отличаются микромашины и машины специального назначения, в частности нереверсивные.

В связи с этим актуальной является проблема разработки новых методик проектирования коллекторных машин, позволяющих решать не только задачи параметрической оптимизации, но и задачи структурно-параметрического синтеза с возможностью выхода на изначально непредсказуемые варианты конструкции. В периодической литературе встречаются работы по структурно-параметрическому синтезу систем электропитания, электроприводов, радиотехнических устройств и т.п. [1, 2, 3]. Имеются также работы и по синтезу конструкции электрических машин [4]. Однако работы по структурно-параметрическому синтезу электрических машин с использованием полевых моделей отсутствуют.

Современное проектирование электрических машин в России отличается от традиционного проектирования, характерного для конца XX века, ориентацией на мелкооптовое и даже штучное производство, характеризую-

щееся большим номенклатурным разнообразием. При этом в условиях конкуренции большое внимание обращается на снижение себестоимости выпускаемой продукции при сохранении эксплуатационных характеристик.

Данное требование может быть обеспечено путем учета особенностей условий эксплуатации машины на стадии проектирования и конструирования, например, путем выхода на нетрадиционные варианты конструкции машины, для которых не существует апробированных методик расчета. При этом предварительные опытно-конструкторские исследования зачастую реализовать не удастся как по срокам, так и по финансовым соображениям. В связи с этим повышенные требования предъявляются к системам проектирования, которые должны обеспечить адекватность поверочных расчетов даже в случае оригинальных вариантов конструкции.

Выход в данном случае ищется путем использования пакетов, обеспечивающих инженерные расчеты на основе полевых моделей физических процессов, позволяющих учесть в расчетах все особенности конструкции спроектированного устройства. В частности, к наиболее популярным пакетам такого рода в электромеханике можно отнести пакет ANSYS Maxwell [5].

Как правило, подобные пакеты снабжают проектировщика и инструментальными средствами для параметрической оптимизации машины. Однако параметрическая оптимизация не позволяет осуществить выход на новые технические решения, что позволило бы в полной мере реализовать достоинства КМ. Так как конструкция КМ может включать в себя нетрадиционные элементы и заранее не определена, САПР КМ должна включать в себя элементы структурно-параметрической оптимиза-

ции. Разработка оптимизационной модели, способной решать задачи структурно-параметрического синтеза конструкции КМ, является актуальной задачей.

Для создания такой модели необходимо разработать приложение, способное по ограниченному набору исходных параметров автоматически генерировать и рассчитывать серии полевых моделей с изначально непредсказуемой конфигурацией расчетной области. Данные модели могут использоваться в качестве ядра, обеспечивающего расчет функции цели при оптимизации КМ. Необходимо так организовать процесс оптимизации, чтобы появилась возможность выхода на произвольные конструкции КМ, что переводит оптимизационную задачу в класс задач структурно-параметрического синтеза.

Методы исследования. Как отмечается, например, в [6], топология целевых функций, характерных для электромеханики, имеет ряд особенностей, таких как многопараметричность, многоэкстремальность, овражность с сильной вытянутостью и пологостью. Кроме того, зачастую не удается избавиться и от дискретности, особенно если речь идет о структурно-параметрическом синтезе. Для решения поставленной задачи целесообразно использовать генетические алгоритмы. Например, богатый инструментарий генетических алгоритмов имеется в пакете MatLab [7]. Однако задачу можно решить и без привлечения MatLab. В частности, в нашем случае была использована версия комбинированного параллельного генетического алгоритма, изначально разработанного для САПР силовых трансформаторов [8], адаптированная к поиску оптимума произвольной целевой функции. Данная версия основана на комбинации островной модели генетического алгоритма с несколькими параллельно развивающимися популяциями с алгоритмом Нелдера-Мида, более точно доводящим найденное лучшее решение до оптимума.

Для построения методики структурно-параметрической оптимизации КМ была использована библиотека конечно-элементного моделирования магнитного поля EMLib, разработанная в ИГЭУ и способная интегрироваться в произвольные открытые приложения, поставляя в них функции для программируемой генерации полевой модели и программируемого численного эксперимента с ее использованием. Технология численного исследования произвольных электротехнических устройств с использованием данной библиотеки в настоящее время хорошо отработана на ряде практических производственных задач [9].

Методика структурно-параметрической оптимизации КМ включает в себя следующие этапы:

1. Предварительный расчет КМ по существующей инженерной методике, выступающей в качестве стартовой точки оптимизации.

2. Анализ вариантов изменения конструкции машины с учетом особенностей ее эксплуатации.

3. Формулировка задачи структурно-параметрической оптимизации машины с учетом выявленных перспектив совершенствования ее конструкции.

4. Поиск оптимального варианта конструкции КМ с использованием комбинации генетических алгоритмов с методом Нелдера-Мида. Обращение к полевой модели машины осуществляется на каждом шаге оптимизации.

5. Исследование полевой динамической модели оптимальной КМ в различных режимах работы, анализ результатов, выявление и устранение недостатков конструкции.

Структурная схема модели, обеспечивающей структурно-параметрический синтез КМ, представлена на рис. 1.

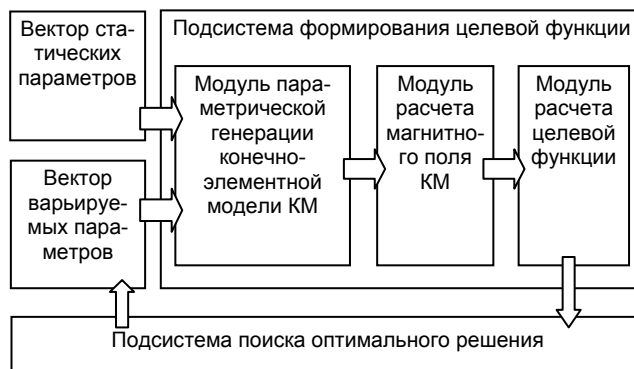


Рис. 1. Структура оптимизационной модели КМ

Исходные данные группируются в двух векторах:

- 1) векторе статических параметров, значения которых в процессе оптимизации не изменяются;
- 2) векторе варьируемых параметров.

На вектор варьируемых параметров \vec{X} накладываются параметрические ограничения вида

$$\vec{X}_{\min} \leq \vec{X} \leq \vec{X}_{\max}. \quad (1)$$

Ядром оптимизационной модели КМ является разработанный нами модуль, позволяющий осуществлять генерацию двумерной модели квазистационарного магнитного поля КМ по заданному набору параметров, определяющих конструкцию машины. Расчет магнитного поля на данной модели позволяет определить величины, входящие в состав вектора критериев оптимальности КМ $\vec{Y}(\vec{X})$: номинальный магнитный поток, электромагнитный момент, частоту вращения, коэффициент полезного действия, массогабаритные показате-

ли машины, ее себестоимость и т.п.). На некоторые из этих величин накладываются критериальные ограничения вида

$$\bar{Y}_{\min} \leq \bar{Y} \leq \bar{Y}_{\max} \quad (2)$$

Данные ограничения учитываются в виде штрафов функции цели, имеющей следующий вид:

$$F(\bar{X}) = f(\bar{X}) + \sum_{j=1}^{N_y} \begin{cases} k_{j\max} (Y_j - Y_{j\max}) \forall Y_j > Y_{j\max}, \\ k_{j\min} (Y_{j\min} - Y_j) \forall Y_j < Y_{j\min}, \\ 0 \forall Y_{j\min} < Y_j < Y_{j\max}, \end{cases} \quad (3)$$

где $f(\bar{X})$ – минимизируемая функция (как правило, это себестоимость КМ); $k_{j\min}$ и $k_{j\max}$ – весовые коэффициенты, значения которых подбирается из опыта проектирования.

Для решения задачи структурно-параметрической оптимизации модуль параметрической генерации конечно-элементной модели КМ должен обеспечить построение максимального количества известных исполнений КМ, а также возможность произвольной комбинации структурных элементов с выходом на изначально не запланированные варианты конструкции. Анализ вариантов исполнений КМ позволил выделить минимальный набор элементов КМ, представленный в виде схемы на рис. 2.

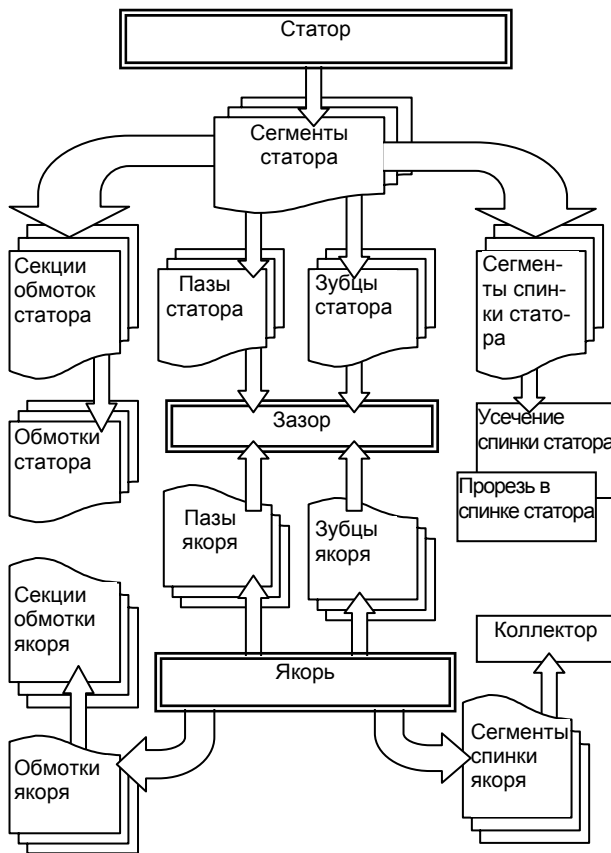


Рис. 2. Декомпозиция расчетной области КМ

Ввиду наличия неподвижного относительно статора магнитного потока КМ, разнообразие вариантов конструкции определяется в первую очередь именно конструкцией статора. Наличие полюсной периодичности КМ говорит о том, что статор можно построить из одинаковых сегментов, ассоциированных с полюсными делениями. При этом при оптимизации можно ограничиться построением одного полюсного деления, что уменьшает расчетное время.

Сегмент статора (полюсное деление), в свою очередь, состоит из типовых сегментов, соответствующих пазам и зубцам, стыкующимся друг с другом посредством интерфейсных опорных точек графических примитивов границ сегментов (рис. 3). К ним сверху пристыковывается аналогичный слой сегментов, образующих спинку статора. На оси главного полюса может быть построена прорезь с перемычкой или без нее. Спинка статора может выполняться с усечением, которое выравнивает магнитное поле, или без него.

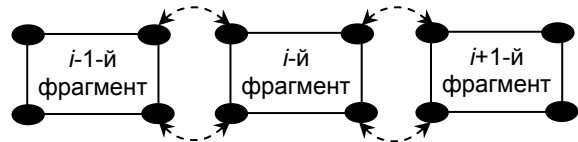


Рис. 3. Схема стыковки сегментов

Самым сложным в плане разнообразия исполнений является такой элемент структуры, как паз. Анализ показывает, что большинство пазов, используемых в КМ, может быть построено путем комбинации нескольких типовых элементов. Для этого паз разбивается на четыре области, каждая из которых может быть оформлена в виде нескольких вариантов:

- 1) область шлица (рис. 4);

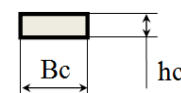


Рис. 4. Область шлица

- 2) область клина, имеющая четыре варианта исполнения (рис. 5);

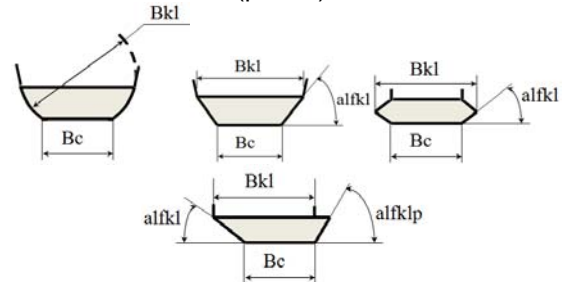


Рис. 5. Варианты области клина

- 3) область дна, имеющая четыре варианта исполнения (рис. 6);

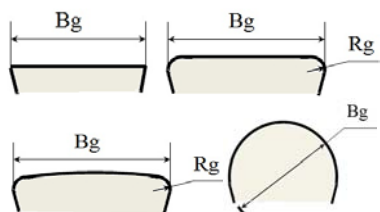


Рис. 6. Варианты области дна паза

4) область обмотки, имеющая два варианта исполнения (стенки паза могут быть параллельными или коническими) (рис. 7).



Рис. 7. Варианты области обмотки

Каждый элемент паза оформляется в виде фрагмента, в котором предусмотрены по четыре интерфейсные точки для связи его с другими элементами (рис. 8). Весь паз как комбинированный фрагмент имеет свои интерфейсные точки, посредством которых он стыкуется с соседними зубцами, а также с сегментами спинки статора и зазором.

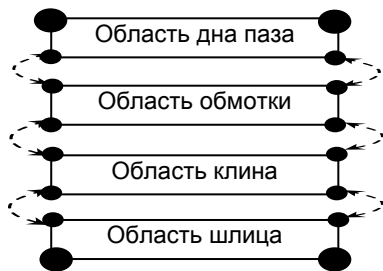


Рис. 8. Структура паза

Построенный паз поворачивается на заданный угол относительно оси вращения. Паза статора могут быть как одинаковыми по высоте, так и разной высоты. Паза распределяются по дуге сегмента статора равномерно, но некоторые паза могут быть пропущены. Особым типом паза является межполюсное окно (при его наличии). Дополнительный полюс представляет собой частный случай зубца (при его наличии). Спинка статора формируется из сегментов, соответствующих зубцовым делениям.

Якорь строится аналогичным образом, но без дополнительных элементов, характерных только для статора. Поэтому его конструкция проще.

В итоге сгенерированная модель может быть представлена множеством фрагментов $F = \{\tilde{F}_i \mid \tilde{F}_i = \{\tilde{T}_i \subset T, I_i \subset \tilde{T}_i, \tilde{P}_i \subset P, \tilde{R}_i \subset R\},$ (4)

где I – множество интерфейсных точек, которое раскладывается на множество базовых графических объектов:

1) множество опорных точек

$$T = \{T_i \mid T_i = (x_i, y_i, r_i)\}, \quad (5)$$

где x_i, y_i – координаты; r_i – радиус аппроксимации примитивов в окрестности i -й опорной точки;

2) множество графических примитивов (дуг и отрезков)

$$P = \{P_i \mid P_i = (T_{i1}, T_{i2}, T_{i3}, g_i)\}, \quad (6)$$

где T_{ik} – опорные точки; g_i – признак границы;

3) множество подобластей

$$R = \{R_i \mid R_i = (T_i, M_i, I_i, n_i, h_{xi}, h_{yi}, w_i, p_i)\}, \quad (7)$$

где T_i – опорная точка внутри подобласти; M_i – материал подобласти; n_i – количество проводников в подобласти; I_i – ток в проводниках; h_{xi}, h_{yi} – координаты вектора намагничивания; w_i, p_i – параметры триангуляции.

Отдельно формируется множество секций обмоток статора (шунтовая (ШОВ) и сериясная (СОВ) обмотки возбуждения, компенсационная обмотка (КО), обмотка добавочных полюсов (ОДП)) и обмотки якоря (ОЯ):

$$S = \{S_i \mid S_i = (T_{i1}, T_{i2}, w_i)\}, \quad (8)$$

где T_{i1}, T_{i2} – опорные точки активных сторон секции; w_i – число витков в секции.

Секции объединяются в параллельные ветви

$$V = \{V_j \mid V_j = \{S_{ik} \mid S_{ik} \in S\}\}, \quad (9)$$

которые объединяются в обмотки

$$W = \{W_i \mid W_i = \{V_{ik} \mid V_{ik} \in V\}\}. \quad (10)$$

Обмотки могут выполняться как однослойными, так и двухслойными. Слои делят паза на части по вертикали. В межполюсном окне возможны как вертикальные, так и горизонтальные слои.

Подвижный якорь с коллектором и волновой обмоткой образуют особый объект

$$A = (x_0, y_0, R_z \in R, W_a \in W, \quad (11)$$

$$K = (d_k, z_k, y_1, y_2, \alpha_k, \alpha_{щ}, b_{щ}),$$

где x_0, y_0 – координаты оси вращения; R_z – подобласть зазора из множества R ; W_a – обмотка якоря из множества W ; K – коллектор; d_k, z_k – диаметр коллектора и число пластин; y_1, y_2 – шаги ОЯ по коллектору; α_k – угол расположения первой пластины коллектора; $\alpha_{щ}, b_{щ}$ – угол расположения первой щетки и ширина щетки.

Формирование конечно-элементной модели КМ начинается с расчета параметров всех ее графических объектов (5)–(11). При этом статор рассчитывается в двух вложенных циклах: цикле по пазам и цикле по сегментам полюсных делений (в понятие расчета в данном случае входит расчет координат опорных точек, а также формирование описаний опорных точек, примитивов, подобластей и секций). Якорь рассчитывается только в цикле по пазам.

Сформированные описания графических объектов передаются в базовую систему, осуществляющую управление процессом проектирования (в нашем случае это табличный процессор MSExcel со встроенной системой программирования VBA). Затем вызываются соответствующие функции библиотеки EMLib, которые по сформированным описаниям создают собственно графические объекты в памяти библиотеки, а также осуществляют триангуляцию всей расчетной области и оптимизацию триангуляции и нумерации узлов.

Управление работой параметрического генератора осуществляется путем задания значений параметров генерации. Это могут быть численные размеры или разного рода инструкции, принимающие дискретные значения, например: 1 – элемент конструкции присутствует; 0 – элемент отсутствует.

Внешний вид модуля генерации конечно-элементной модели КМ представлен на рис. 9, 10.

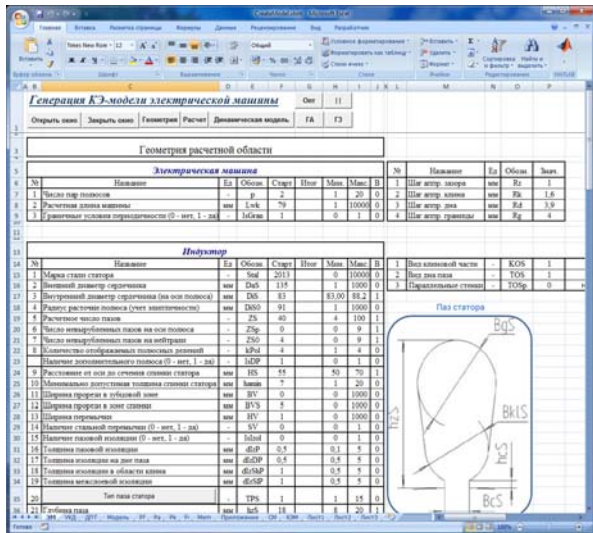


Рис. 9. Внешний вид подсистемы генерации модели

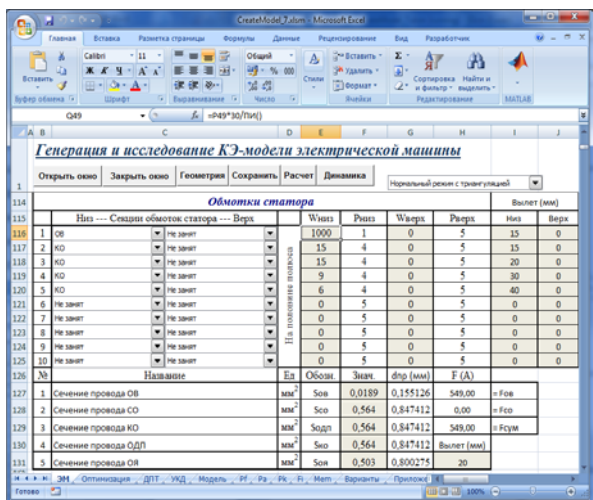


Рис. 10. Подсистема формирования описаний обмоток

На рис. 11 представлены некоторые варианты пазов, которые могут быть сгенерированы в модели КМ. На рис. 12 представлены варианты моделей, созданных одним параметрическим генератором при разных значениях параметров.



Рис. 11. Варианты пазов для однослойных и двухслойных обмоток статора с учетом изоляции и тока в пазу

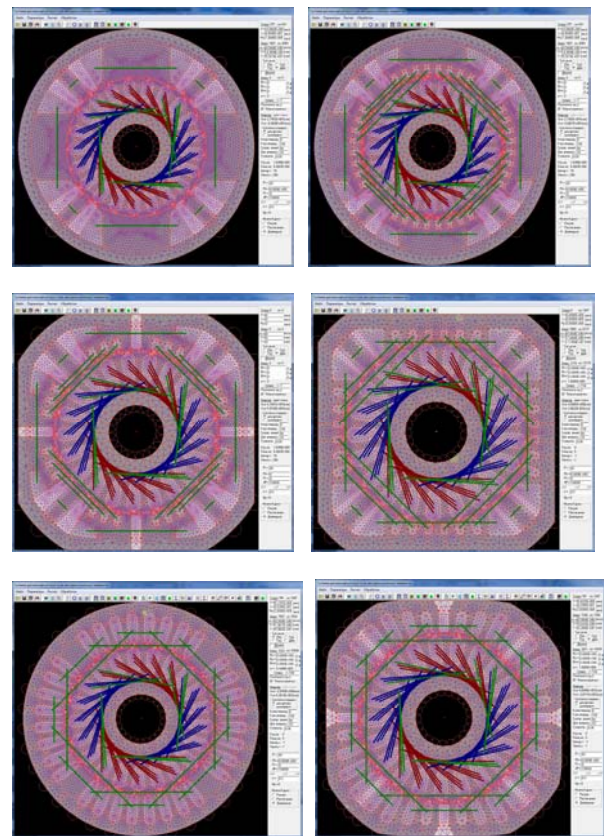


Рис. 12. Варианты исполнения КМ, созданные подсистемой параметрической генерации полевой модели

Результаты исследования. В качестве стартовой точки структурно-параметрической оптимизации КМ была выбрана неявнополюсная машина постоянного тока серии 4П мощностью 750 Вт².

Целевая функции оптимизационной задачи имеет вид

² Справочник по электрическим машинам: в 2 т. / под ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – Т. 1. – 456 с.

$$\begin{aligned}
F(\vec{X}) = & h_c^2 L_\delta \gamma_{Fe} + \frac{C_{Cu}}{C_{Fe}} \sum_{i=1}^{N_w} L_i q_i \gamma_{Cu} + \\
& + \begin{cases} k_{\Phi \max} (\Phi - \Phi_{\max}) \forall \Phi > \Phi_{\max}, \\ k_{\Phi \min} (\Phi_{\min} - \Phi) \forall \Phi < \Phi_{\min}, \\ 0 \forall \Phi_{\min} < \Phi < \Phi_{\max} \end{cases} + \\
& + \begin{cases} k_{B \max} (B - B_{\max}) \forall B > B_{\max}, \\ k_{B \min} (B_{\min} - B) \forall B < B_{\min}, \\ 0 \forall B_{\min} < B < B_{\max} \end{cases} + \\
& + \begin{cases} k_{B_{kz} \max} (B_{kz} - B_{kz \max}) \forall B_{kz} > B_{kz \max}, \\ k_{B_{kz} \min} (B_{kz \min} - B_{kz}) \forall B_{kz} < B_{kz \min}, \\ 0 \forall B_{kz \min} < B_{kz} < B_{kz \max}, \end{cases} \quad (12)
\end{aligned}$$

где h_c – расстояние от оси машины до сечения спинки статора; γ_{Fe} , γ_{Cu} – удельный вес электротехнической стали и меди обмоток; C_{Cu} , C_{Fe} – цена медного провода обмоток КМ и электротехнической стали; N_w – количество обмоток статора; L_i , q_i – суммарная длина провода и сечение провода i -й обмотки статора; Φ – средний магнитный поток на полюсном делении; B – средняя индукция в зоне коммутации; B_{kz} – средняя индукция в зоне коммутации в режиме короткого замыкания КМ; $\Phi_{\min} = 0,99\Phi_n$, $\Phi_{\max} = 1,1\Phi_n$, $B_{\min} = 0$, $B_{\max} = 0,05$ Тл, $B_{kz \min} = -0,04$ Тл, $B_{kz \max} = 0,05$ Тл – критериальные пределы по магнитному потоку и индукции в зоне коммутации; $k_{\Phi \min}$, $k_{\Phi \max}$, $k_{B \min}$, $k_{B_{kz} \min}$, $k_{B \max}$, $k_{B_{kz} \max}$ – весовые коэффициенты, значения которых подбирались в ходе серии расчетов.

Минимум данной целевой функции обеспечивает минимум стоимости активных материалов, из которых изготавливается КМ, с учетом соотношения стоимости медного обмоточного провода и электротехнической стали (с учетом отходов). Штрафы по магнитному потоку и индукции в зоне коммутации обеспечивают соответствие оптимальной КМ исходному варианту машины по основным характеристикам номинального режима.

В качестве статических параметров использовались следующие допущения. Якорь оставался неизменным, как в исходном варианте. Обмотки статора концентрические, уложенные в два слоя: в одном слое – КО, в другом – ШОВ. Крайние пазы статора выполнялись в форме межполюсного окна. В этих пазах обмотка может располагаться в три слоя.

В качестве варьируемых переменных использованы: внутренний и внешний диаметры статора; глубина сечения спинки статора; наличие или отсутствие прорези на оси статора и ее ширина; количество пазов статора при условии их равномерного расположения на полюсной дуге; количество невырубленных пазов статора на оси и геометрической нейтрали; максимальная высота паза статора (при наличии усечения спинки статора пазы статора

могут иметь разную высоту, обеспечивая ограничение по минимальной толщине спинки).

К варьируемым параметрам относятся также и плотности полного тока в пазах на половине полюсного деления статора (для оптимизации используется модель КМ на одном полюсном делении), вычисляемые по формуле

$$j_p = \frac{N_{fp} i_f + N_{kp} i_a}{S_p}, \quad (13)$$

где p – номер паза; N_{fp} и N_{kp} – количество витков ШОВ и КО в p -м пазу соответственно; i_f и i_a – ток в ШОВ и КО; S_p – площадь p -го паза.

В крайнем (1-м) пазу статора (т. е. в межполюсном окне) вместо КО располагалась ОДП. Часть витков ШОВ здесь можно заменить витками СОВ с учетом условия

$$N_{s1} = N_{f1} \frac{i_f}{i_a}, \quad (14)$$

где N_{s1} – количество витков СОВ d в 1-м пазу.

Учитывая симметрию концентрических обмоток статора, плотности полного тока паза на второй половине полюсного деления статора вычислялись по формуле

$$j_{z-p} = j_s - 2j_p, \quad (15)$$

где z – количество пазов на полюсном делении статора; j_s – максимальная плотность полного тока паза статора в исходном варианте, которую по условиям эксперимента нельзя превышать в целях соблюдения условий теплоотдачи, характерных для исходного варианта, с учетом допущения об удовлетворительной теплоотдаче в пазах статора в исходном варианте.

При решении задачи оптимизации статора КМ на каждом шаге поиска при текущих значениях варьируемых параметров с помощью параметрического генератора полностью перестраивалась конечно-элементная модель машины и осуществлялся ее расчет при значениях тока ОЯ, характерного для номинального режима исходной машины. По результатам данного расчета вычислялись величины B и Φ в (12).

Кроме того, для предотвращения опрокидывания магнитного поля при пуске машины на каждом шаге оптимизации рассчитывалось магнитное поле при номинальном токе ШОВ и токе в цепи ОЯ, равном току короткого замыкания исходной машины. По результатам данного расчета вычислялась величина B_{kz} в (12).

Поиск оптимального варианта привел к конструкции, приведенной на рис. 13.

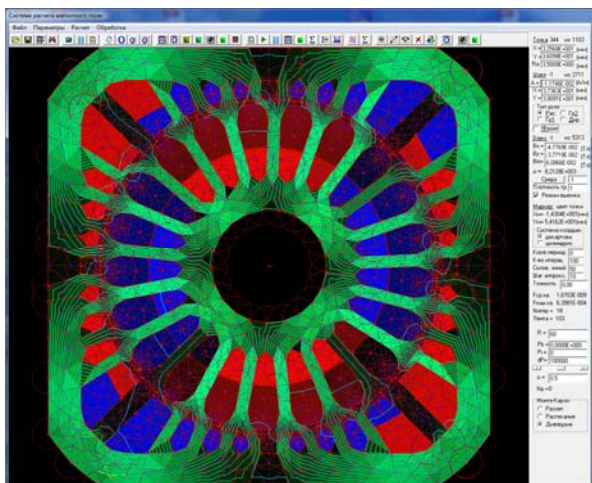


Рис. 13. Магнитное поле в номинальном режиме КМ, полученной в результате структурно-параметрической оптимизации

Полученный вариант характеризуется следующими показателями:

1. Полученная глубина усечения спинки статора позволяет получить более 39,4 % экономии электротехнической стали (с учетом отходов при раскрое), по сравнению с аналогом, за счет уменьшения высоты оси вращения и более рационального раскроя.
2. КО вместе с ОДП содержат всего 45 витков на полюс, что приводит к уменьшению расхода меди в обмотках статора, по сравнению с исходным вариантом, на 34,9 % даже с учетом некоторого увеличения расхода меди в ШОВ.
3. КО не обеспечивает полной и совершенной коммутации, однако благодаря наличию прорези по оси статора обеспечивается эффект Ш-образного дополнительного полюса [10].
4. Наличие КО и эффекта Ш-образного дополнительного полюса позволило обеспечить в зоне коммутации в номинальном режиме индукцию 0,015 Тл и $-0,033$ Тл при пуске.

Последнее значение индукции в зоне коммутации при пуске КМ может вызывать подозрение с точки зрения динамических характеристик машины. В связи с этим полученный вариант КМ был исследован в режиме пуска с использованием полевой динамической модели, описанной в [11].

Результаты расчета приведены на рис. 14, 15, где обращает на себя внимание тот факт, что разгон проходит без осложнений, что говорит об удовлетворительных динамических характеристиках машины. Больший, чем в машине традиционной конструкции, бросок тока ОЯ вызван уменьшенным сопротивлением в цепи ОЯ вследствие уменьшения сопротивления КО.

Выводы. Разработанная методика структурно-параметрической оптимизации коллекторных машин позволяет получать существенную экономию активных материалов

при их проектировании за счет выхода на новые структурные решения.

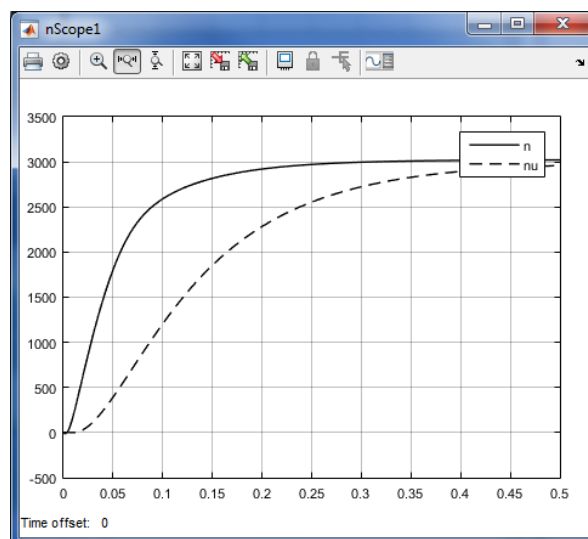


Рис. 14. Изменение частоты вращения при пуске оптимальной (сплошная линия) и традиционной КМ (пунктир)

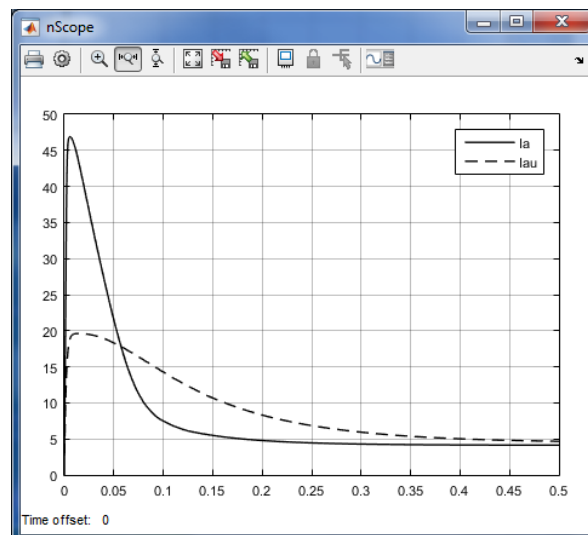


Рис. 15. Изменение тока ОЯ при пуске оптимальной (сплошная линия) и традиционной КМ (пунктир)

В частности, в ходе тестирования разработанной методики получен вариант устройства, позволяющий получить более 39,4 % экономии электротехнической стали (с учетом отходов при раскрое) и уменьшить расход меди в обмотках статора, по сравнению с исходным вариантом, на 34,9 %. Это позволяет снизить себестоимость изготовления данного устройства. Анализ полевой динамической модели спроектированного устройства позволяет говорить о его удовлетворительной работе в статических и динамических режимах.

Разработанная методика поиска оптимального варианта конструкции ориентирована на использование доступных программных средств (относительно дорогой пакет MatLab Simulink, использованный в работе, может быть

с успехом заменен пакетом SciLab Xcos со свободной лицензией). Это позволяет использовать предлагаемую методику в мелкосерийном и штучном производстве электрических машин даже в условиях малого и среднего бизнеса.

Список литературы

1. Григораш О.В., Степура Ю.П., Квитко А.В. Структурно-параметрический синтез автономных систем электроснабжения // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2/1. – С. 71–75.
2. Лисин С.Л., Стариков А.В. Структурно-параметрический синтез систем управления неустойчивыми объектами // Вестник СамГТУ. – 2013. – № 4(40). – С. 53–58.
3. Акимов С.В. Компьютерные модели для автоматизированного структурно-параметрического синтеза // Компьютерное моделирование 2004: труды V Междунар. конф. – СПб.: Нестор, 2004. – Ч. 1. – С. 191–197.
4. **Обобщенный** метод структурно-параметрического синтеза электромагнитных систем электрических машин и индукционных аппаратов. Ч. 2. Результаты сравнительного анализа основных вариантов электромагнитной системы асинхронного короткозамкнутого двигателя / А.А. Ставинский, Е.А. Авдеева, О.О. Пальчиков, Р.А. Ставинский // Электричество. – 2017. – № 5. – С. 20–29.
5. ANSOFT Maxwell / ANSYS Maxwell (ANSYS Electromagnetics) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ansoft-maxwell.narod.ru>
6. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
7. MatLab. Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox: User's Guide. The MathWorks, Inc., 2008. – 343 p.
8. **Разработка** подсистемы оптимизации САПР распределительных трансформаторов / А.И. Тихонов, А.С. Зайцев, А.В. Стулов, И.А. Трофимович // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 6. – С. 87–91.
9. 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. – № 1. – С. 55–61.
10. Пат. США кл. 310/186 N 422088, N 884586, N 52/40953, Япония, МКЭ НО2 К1/10. Двигатель постоянного тока с Ш-образными дополнительными полюсами / Kohzai joshinori Oyama Shigaki. заявл. 8.03.78; опубл. 2.09.80; приор. 12.04.77.
11. **Технология** моделирования в Simulink динамических режимов работы электрических машин с использованием библиотеки полевых расчетов / А.И. Тихонов, А.В. Гусенков, М.В. Тамьярова, А.В. Подобный // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 6. – С. 57–65.

References

1. Grigorash, O.V., Stepura, Yu.P., Kvitko, A.V. Strukturno-parametricheskii sintez avtonomnykh sistem

Тамьярова Майя Владиславовна,
ФГБОУВО «Ульяновский государственный технический университет»,
старший преподаватель,
e-mail: stprepod@mail.ru
Tamyarova Maiya Vladislavovna,
Ulyanovsk State Technical University,
Senior Lecturer,
e-mail: stprepod@mail.ru

elektrosnabzheniya [Structural-parametric synthesis of autonomous power supply systems]. *Polzunovskiy vestnik*, 2011, no. 2/1, pp. 71–75.

2. Lisin, S.L., Starikov, A.V. Strukturno-parametricheskii sintez sistem upravleniya neustoychivymi ob"ektami [Structural-parametric synthesis of control systems of unstable objects]. *Vestnik SamGTU*, 2013, no. 4(40), pp. 53–58.

3. Akimov, S.V. Komp'yuternye modeli dlya avtomatizirovannogo strukturno-parametricheskogo sinteza [Computer Models for Automated Structural-Parametric Synthesis]. *Trudy V Mezhdunarodnoy konferentsii: «Komp'yuternoe modelirovanie 2004»* [Collected Works of the 5th International «Conference «Computer Modeling 2004»]. Saint-Petersburg: Nestor, 2004, part 1, pp. 191–197.

4. Stavinskiy, A.A., Avdeeva, E.A., Pal'chikov, O.O., Stavinskiy, R.A. Obobshchennyi metod strukturno-parametricheskogo sinteza elektromagnitnykh sistem elektricheskikh mashin i induktsionnykh apparatov. Ch. 2. Rezul'taty sravnitel'nogo analiza osnovnykh variantov elektromagnitnoy sistemy asinkhronnogo korotkozamknutogo dvigatelya [A generalized method of structural-parametric synthesis of electromagnetic systems of electric machines and induction devices. Part 2. Results of a comparative analysis of the main variants of the electromagnetic system of an asynchronous short-circuited motor]. *Elektrichestvo*, 2017, no. 5, pp. 20–29.

5. ANSOFT Maxwell / ANSYS Maxwell (ANSYS Electromagnetics). Available at: <http://ansoft-maxwell.narod.ru>

6. Kopylov, I.P. *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin* [Mathematical modeling of electric machines]. Moscow: Vysshaya shkola, 2001. 327 p.

7. MatLab. Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox: User's Guide. The MathWorks, Inc., 2008. 343 p.

8. Tikhonov, A.I., Zaytsev, A.S., Stulov, A.V., Trofimovich, I.A. Razrabotka podsystemy optimizatsii SAPR raspredelitel'nykh transformatorov [Development of a CAD optimization subsystem for distribution transformers]. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 6, pp. 87–91.

9. Shmelev, A.S., Paykov, I.A., Bulatov, L.N. Metodika organizatsii chislennogo issledovaniya elektrotekhnicheskikh ustroystv s ispol'zovaniem biblioteki konechno-elementnogo modelirovaniya magnitnogo polya [Methodology of organizing numerical research into electrical devices using the library of finite element modeling of magnetic field]. *Vestnik IGEU*, 2014, no. 1, pp. 55–61.

10. Kohzai joshinori Oyama Shigaki. *Dvigatel' postoyannogo toka s Sh-obraznymi dopolnitel'nymi polyusami* [The DC motor with Ш-shaped additional poles]. Patent US, no. 422088, Japan, no. 52/40953, 1980.

11. Tikhonov, A.I., Gusenkov, A.V., Tamyarova, M.V., Podobny, A.V. Tekhnologiya modelirovaniya v Simulink dinamicheskikh rezhimov raboty elektricheskikh mashin s ispol'zovaniem biblioteki polevykh raschetov [Simulink technology for modelling dynamic modes of electric machine operation using a field calculations library]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 6, pp. 57–65.

Тихонов Андрей Ильич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой физики,

e-mail: aitispu@mail.ru

Tikhonov Andrei Ilyich,

Ivanovo State Power Engineering University,

Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor, Head of the Physics Department,

e-mail: aitispu@mail.ru