

ОБЛЕГЧЕННАЯ МАШИНА ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ АВИАТЕХНИКИ

© 2018 А.В. Тамьяров¹, М.В. Тамьярова¹, А.И. Тихонов²¹ Ульяновский государственный технический университет² Ивановский государственный энергетический университет

Статья поступила в редакцию 01.11.2018

Актуальность. Одним из главных требований, предъявляемых к авиационным электрическим машинам, является требование уменьшения массогабаритных характеристик. Поэтому поиск путей снижения веса электрических машин и экономия материалов является актуальной задачей. **Материалы и методы.** Работа строилась на основе результатов конечно-элементного моделирования магнитного поля, внедренных в цепные модели динамических режимов работы машины постоянного тока. Оптимизация конструкции машины осуществлялась с использованием генетических алгоритмов. **Результаты.** Разработана быстродействующая полевая динамическая модель машины постоянного тока, позволяющая учесть влияние на динамику машины особенностей ее конструкции. В ходе оптимизации на модели магнитного поля получен вариант машины, позволяющий получить существенную экономию активных материалов и уменьшить массогабаритные показатели. **Выводы.** Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и производстве авиационных машин постоянного тока.

Ключевые слова: машина постоянного тока, массогабаритные показатели электрических машин, моделирование динамических режимов электрических машин, метод конечных элементов.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из главных требований, предъявляемых к авиационному электрооборудованию, является требование уменьшения массогабаритных характеристик. Это в полной мере относится и к электрическим машинам, активная часть которых изготавливается из электротехнического железа и меди, обладающих большим удельным весом. Поэтому поиск путей снижения веса электрических машин является актуальной задачей.

Наиболее перспективными в плане поставленной задачи является машина постоянного тока (МПТ). Так как магнитный поток МПТ оказывается неподвижным относительно неподвижного индуктора (статора), то особенности распределения данного потока можно учесть в конструкции машины. В частности, в [1] предлагается конструкция четырехполюсной МПТ (рис. 1), статор которой набран из сегментов 1, разделенных немагнитными прорезями 2, например, с алюминиевыми или стеклотекстолитовыми вставками. Данные прорези не влияют на величину основного потока, зато оказывает существенное магнитное сопротивление на пути

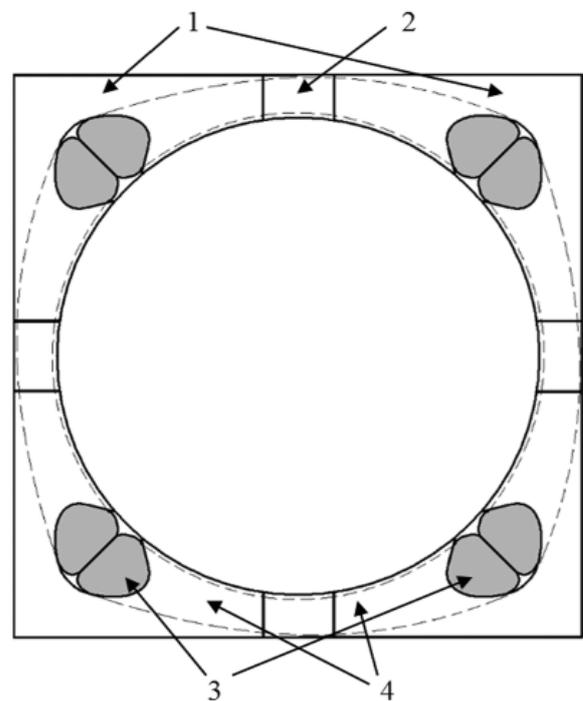


Рис. 1. Конструкция облегченного статора МПТ: 1 – сегменты статора; 2 – прорези с немагнитными вставками; 3 – пазовые части ОБ; 4 – лобовые части ОБ

Тамьяров Андрей Валериевич, кандидат технических наук, доцент кафедры самолетостроения.

E-mail: a.tamyarov@ulstu.ru

Тамьярова Майя Владиславовна, старший преподаватель кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы». E-mail: stprepod@mail.ru

Тихонов Андрей Ильич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики. E-mail: ait@dsn.ru

потока поперечной реакции якоря. Это позволяет уменьшить величину воздушного зазора машины и, следовательно, уменьшить размеры обмотки возбуждения (ОБ), которая располагается в межполюсном окне в виде двух катушек 3. Само межполюсное окно выполнено в форме полузакрытого паза. Машина изготавливается в

бескорпусном исполнении и имеет компактную форму, удобную для встраивания в панели оборудования.

Численный анализ данной конструкции показывает, что при большом воздушном зазоре машины ОВ будет слишком большой, что вызовет недопустимые перегревы. Поэтому зазор надо уменьшать. Однако при этом растёт и поток реакции якоря, который в данном случае замыкается, главным образом, не по прорези 2, а по зазору, проходя через него четыре раза.

Подобное уменьшение воздушного зазора в МПТ реализовано, например, в неявнополюсных машинах серии 4П [2]. Однако здесь для уменьшения потока реакции якоря обязательно использование компенсационной обмотки (КО), обеспечивающей полную компенсацию реакции якоря. В машине на рис. 1 такая обмотка не предусмотрена, что может привести к неустойчивой работе, особенно в динамических режимах.

Для исследования данной машины в динамике была разработана полевая динамическая модель [3], основанная на приведении системы уравнений динамики МПТ

$$\begin{cases} \frac{d\Psi}{dt} = \mathbf{u} - \mathbf{R}\mathbf{i}, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(\mathbf{M} - \mathbf{M}_B) \end{cases} \quad (1)$$

к виду

$$\begin{bmatrix} L_{ff} & L_{fa} & 0 & 0 \\ L_{af} & L_{aa} & C_a & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} \frac{di_f}{dt} \\ \frac{di_a}{dt} \\ \frac{d\alpha}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{cases} = \begin{cases} \mathbf{u} - i_f R_f \\ \mathbf{u} - i_a R_a - i_a R_k \\ \omega \\ \frac{\mathbf{M}(i_f, i_a) - \mathbf{M}_B}{J} \end{cases}, \quad (2)$$

где Ψ – матрица-столбец мгновенных потокоцеплений обмоток; \mathbf{u} – матрица-столбец мгновенных напряжений на обмотках; \mathbf{R} – диагональная матрица сопротивлений обмоток; \mathbf{i} – матрица-столбец мгновенных токов; ω – частота вращения ротора; α – угол поворота ротора; J – момент инерции якоря; \mathbf{M} – электромагнитный момент; \mathbf{M}_B – момент нагрузки на валу; i_f, i_a – токи в цепях ОВ и ОЯ; R_f, R_a – сопротивления в цепях ОВ и ОЯ.

Элементы матрицы коэффициентов вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} L_{ff}(i_f, i_a) &= \frac{\partial \Psi_f(i_f, i_a)}{\partial i_f} + L_{ff} \approx \left. \frac{\Psi_f(i_f + \Delta i_f, i_a) - \Psi_f(i_f, i_a)}{\Delta i_f} \right|_{\mu = \text{const}} + L_{ff}, \\ L_{fa}(i_f, i_a) &= \frac{\partial \Psi_f(i_f, i_a + \Delta i_a) - \Psi_f(i_f, i_a)}{\partial i_a} \bigg|_{\mu = \text{const}}, \\ L_{af}(i_f, i_a) &= \frac{\partial \Psi_{ak}}{\partial i_f} \approx \left. \frac{\Psi_{ak}(i_f + \Delta i_f, i_a) - \Psi_{ak}(i_f, i_a)}{\Delta i_f} \right|_{\mu = \text{const}}, \\ L_{aa}(i_f, i_a) &= \frac{\partial \Psi_{ak} + L_{al} + L_{kl}}{\partial i_a} \approx \left. \frac{\Psi_{ak}(i_f, i_a + \Delta i_a) - \Psi_{ak}(i_f, i_a)}{\Delta i_a} \right|_{\mu = \text{const}} + L_{al} + L_{kl}, \\ C_a(i_f, i_a) &= \frac{\partial \Psi_a(i_f, i_a, \alpha)}{\partial \alpha} \approx \left. \frac{\Delta \Psi_a(i_f, i_a, \alpha + \Delta \alpha) - \Psi_a(i_f, i_a, \alpha)}{\Delta \alpha} \right|_{\mu = \text{const}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где Ψ_f, Ψ_a – потокоцепление соответственно ОВ и обмотки якоря (ОЯ); Ψ_{ak} – суммарное потокоцепление ОЯ и КО; L_{ff}, L_{al}, L_{kl} – индуктивности лобового рассеяния ОВ, ОЯ и КО; μ – магнитная проницаемость.

Система уравнений (2) получается из (1) путем применения для m -й обмотки разложения

$$\frac{d\Psi_m}{dt} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Psi_m}{\partial i_j} \frac{di_j}{dt} + \frac{\partial \Psi_m}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt} = \sum_{j=1}^n L_{mj} \frac{di_j}{dt} + \frac{\partial \Psi_m}{\partial \alpha} \omega. \quad (4)$$

Элементы матрицы коэффициентов (3) рассчитываются по результатам моделирования серии расчетов поля при варьировании в заданных пределах с заданным шагом параметров i_f и i_a . При этом для каждой пары значений (i_f, i_a) сначала рассчитывается магнитное поле в нелинейной постановке. Затем дается приращение сначала току ОВ Δi_f , и вновь рассчитывается магнитное поле в линейной постановке с теми значениями магнитной проницаемости $\mu = \text{const}$, которые получены в предыдущем расчете. Аналогичный расчет осуществляется с приращением по току ОЯ Δi_a . Для учета скоса пазов каждый расчет проводится путем усреднения по нескольким положениям якоря относительно статора в пределах зубцового деления. При расчете матрицы $C_a(i_f, i_a)$ сначала рассчитывается поле в нелинейной постановке при текущем угле поворота якоря относительно статора α , затем осуществляется поворот якоря на угол $\Delta \alpha$ и осуществляется повторный расчет магнитного поля в линейной постановке.

Полученные таким образом матрицы (3) составляют в динамическую модель МПТ, реализованную в среде Simulink (рис. 2 – 3). По ним значения коэффициентов выбираются на каждом шаге интегрирования по времени системы уравнений (2) при текущих значениях токов (i_f, i_a) (на рис. 3 за это отвечают блоки Lff, Lfa, Laf, Laa и Ca). Матрица коэффициентов формируется с помощью блоков формирования векторов (Mux) и блока, осуществляющего конкатенацию векторов в двухмерную матрицу.

Главное достоинство приведенной модели состоит в том, что она позволяет учесть в динамике все особенности конструкции электрической машины, что возможно только при исполь-

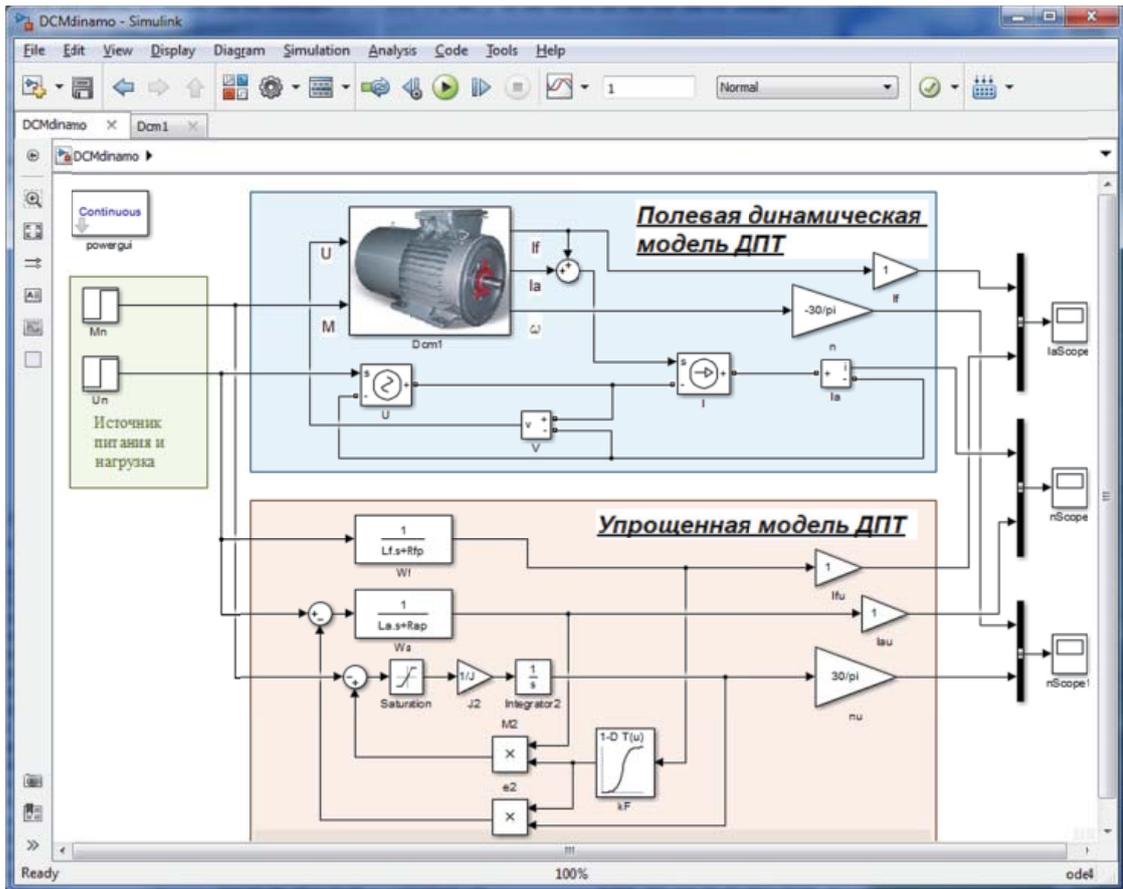


Рис. 2. Внешний вид подсистемы исследования имитационных моделей МПТ с независимым, параллельным и смешанным возбуждением в среде Simulink

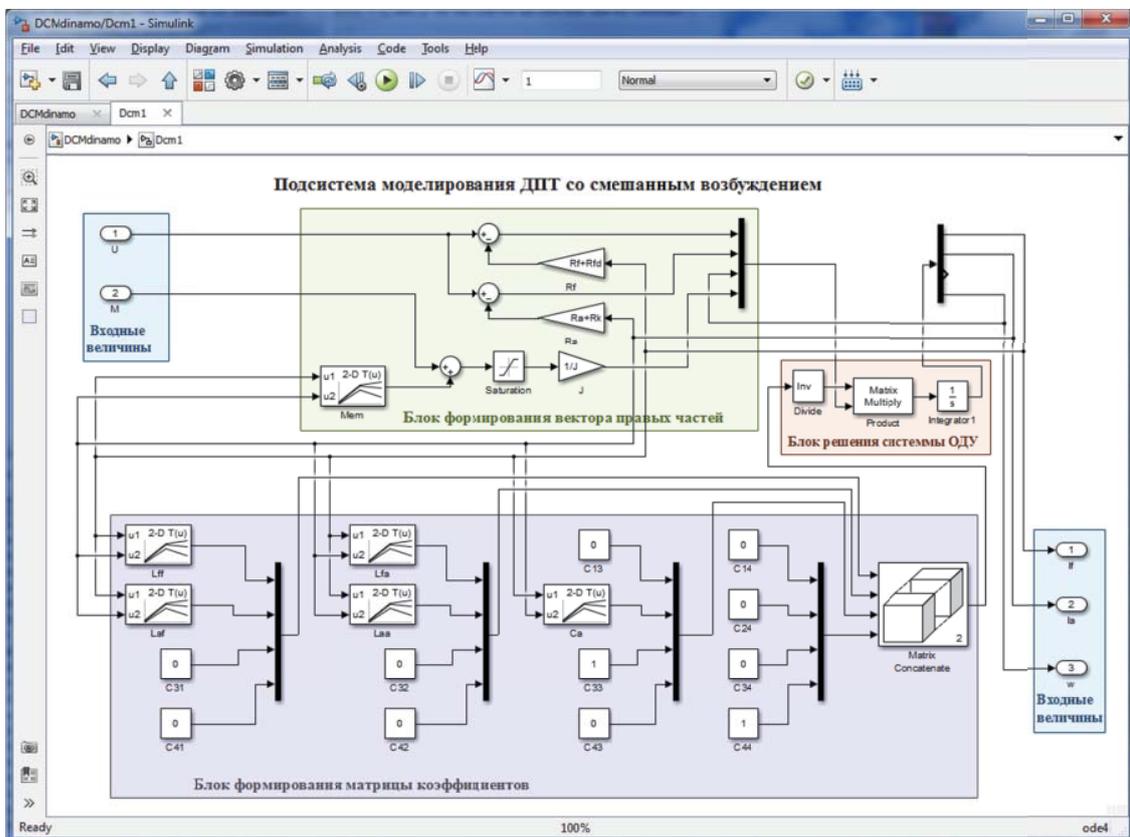


Рис. 3. Полевая динамическая модель МПТ с независимым, параллельным и смешанным возбуждением в среде Simulink

зовании полевых моделей. При этом в отличие от полевых динамических моделей, реализуемых, например в ANSYS Maxwell, скорость расчет полученной модели соизмерима со скоростью расчета обычных инженерных моделей, построенных на основе теории цепей (без учета времени на обучающую серию полевых расчетов).

Разработанная таким образом модель была использована при расчете пуска МПТ вида рис. 1. Конечно-элементная модель для данной машины была построена с использованием библиотеки конечно-элементного моделирования EMLib [4, 5, 6] (рис. 4,а). На данной модели была проведена обучающая серия полевых расчетов. Результаты моделирования процесса пуска данной МПТ приведены на рис. 4,б.

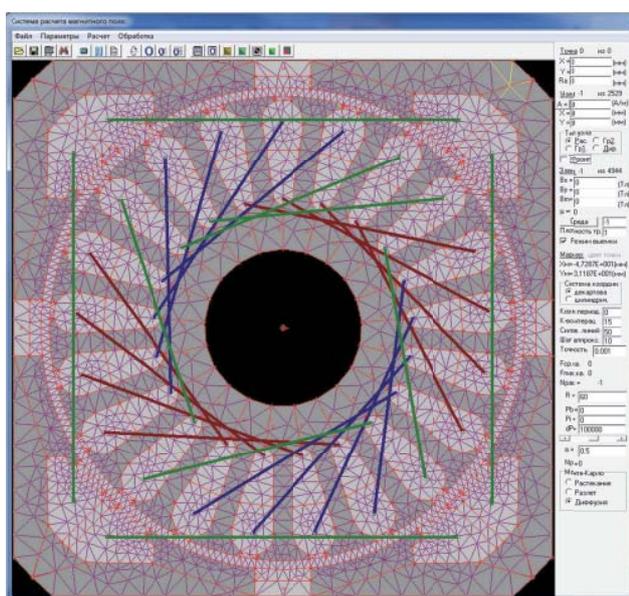
Из рис. 4,б видно, что в процессе пуска частота вращения за доли секунды возрастает от 0 до 700 рад/с (на рис. 4,б кривые приведены с учетом масштабного коэффициента), что почти вдвое превышает номинальное значение $\omega_n = 314$ рад/с. Затем частота вращения стабилизируется на номинальной отметке. Это говорит о том, что работа машины предложенной конструкции при данной геометрии расчетной области является неустойчивой при резких бросках тока якоря. При этом в установившихся режимах машина работает нормально. Несмотря на это конструкцию машины необходимо признать неудачной. Вывод, сделанный при анализе результатов, говорит о том, что полностью отказываться от КО в машине облегченной конструкции нельзя.

Для поиска работоспособного варианта МПТ облегченной конструкции на базе MSExcel и библиотеки EMLib был разработан параметри-

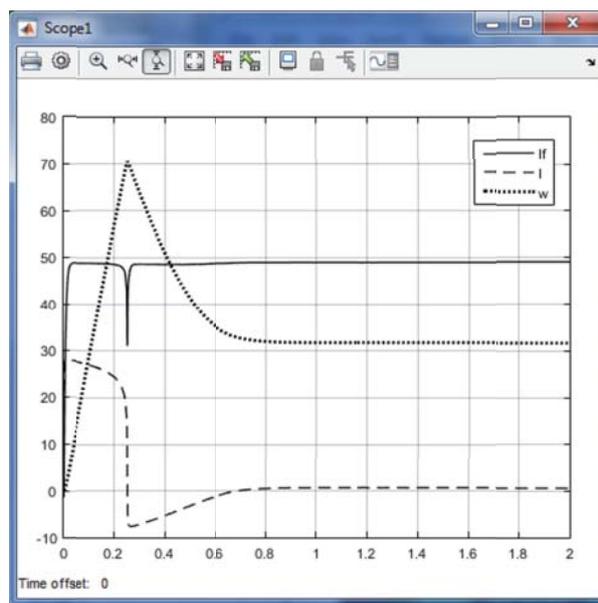
ческий генератор конечно-элементной модели магнитного поля, позволяющий генерировать модели МПТ, статор которой может произвольно деформироваться в широких пределах варьирования параметров, определяющих его конструкцию [7]. Генерация модели занимает порядка одной секунды, примерно столько же длится расчет магнитного поля в нелинейной постановке. Это позволило включить автоматически генерируемую и рассчитываемую полевую модель в качестве элемента функции цели структурно-параметрической оптимизации статора МПТ. При этом функция цели имела вид

$$F(\vec{X}) = V_c C_c + V_m C_m + \begin{cases} k_{\Phi_{\max}} (\Phi - \Phi_{\max}) \forall \Phi > \Phi_{\max} \\ k_{\Phi_{\min}} (\Phi_{\min} - \Phi) \forall \Phi < \Phi_{\min} \\ 0 \forall \Phi_{\min} < \Phi < \Phi_{\max} \end{cases} + \begin{cases} k_{B_{\max}} (B - B_{\max}) \forall B > B_{\max} \\ k_{B_{\min}} (B_{\min} - B) \forall B < B_{\min} \\ 0 \forall B_{\min} < B < B_{\max} \end{cases}, \quad (5)$$

где \vec{X} – вектор варьируемых параметров; V_c, V_m – объем электротехнической стали и меди обмоток; C_c, C_m – цена электротехнической стали и медного провода; Φ – средний магнитный поток на полюсном делении; B – средняя индукция в зоне коммутации; $\Phi_{\min} = 0,99\Phi_n$; $\Phi_{\max} = 1,1\Phi_n$; $B_{\min} = 0$; $B_{\max} = 0,05$ Тл – критериальные пределы по магнитному потоку и индукции в зоне коммутации; Φ_n – поток в номинальном режиме исходной машины, выбранной в качестве стартовой



а)



б)

Рис. 4. Конечно-элементная модель (а) и результаты моделирования пуска (б) МПТ облегченной конструкции

точки (в нашем случае это ДПТ 4П80 мощностью 0,75 кВт); $k_{\Phi_{\min}}$, $k_{\Phi_{\max}}$, $k_{B_{\min}}$, $k_{B_{\max}}$ – вестовые коэффициенты, значения которых подбирались в ходе серии расчетов.

Минимум функции цели обеспечивает минимум себестоимости машины, а также косвенно минимум габаритов и веса машины. Штрафные функции обеспечивали те же рабочие характеристики номинального режима, что и в исходном варианте машины, и удовлетворительную коммутацию. В качестве варьируемых параметров использовались следующие величины: высота оси вращения, количество и высота пазов, ширина прорези в статоре на пути потока реакции якоря, количество пазов статора, размеры пазов статора. Количество витков обмоток статора определялось исходя из допущения о равенстве плотностей тока в пазах соответствующей величине в исходном варианте машины. Конфигурация якоря и активная длина машины не изменялись.

Оптимизация осуществлялась с использованием версии параллельного генетического алгоритма, основанной на комбинации островной модели генетического алгоритма с несколькими параллельно развивающимися популяциями с алгоритмом Нелдера-Мида, более точно доводящего найденное лучшее решение до оптимума.

Полученная в ходе оптимизации конструкция представлена в виде полевой модели на рис. 5,а. В отличие от рис. 4,а здесь присутствует добавочный полюс и КО, уложенная в паза статора разной высоты. ОВ и обмотка добавочного полюса (ОДП) уложены в один паз в два слоя. Сечение машины имеет форму квадрата, что позволяет получить существенную экономию стали (более 39%) за счет более рационального раскроя. КО и ОДП содержат меньше витков, чем

в исходном варианте, не обеспечивая, таким образом, полной компенсации потока поперечной реакции якоря. Однако наличие прорези на пути потока реакции якоря обеспечивает эффект Ш-образных дополнительных полюсов, что позволяет получить в номинальном режиме удовлетворительные условия в зоне коммутации. При пуске и бросках тока коммутация ухудшается, но не значительно (максимальная индукция в зоне коммутации при пуске составляет всего 0,033 Тл). При этом, как свидетельствует график рис. 5,б (сплошная линия), пуск машины происходит без осложнений. Экономия меди в обмотках статора в полученном варианте по сравнению с исходным промышленным образцом машины составляет 35% (без учета ОЯ). Экономия стали, достигаемая за счет более рационального раскроя, составила 39%.

Следует отметить, что моделирование пуска МПТ облегченной конструкции не может осуществляться с использованием традиционных инженерных моделей. В частности, на рис. 5,б пунктиром приведена кривая пуска МПТ, полученная на традиционной модели. Из рисунка видно существенное отличие.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена конструкция облегченной машины постоянного тока, полученная в ходе структурно-параметрической оптимизации с использованием генетических алгоритмов и конечно-элементной модели магнитного поля, оперативно перестраиваемой на каждом шаге поиска в соответствии со значениями варьируемых параметров, определяющих специфическую форму статора. Рассмотрена полевая динамическая модель машины постоянного тока,

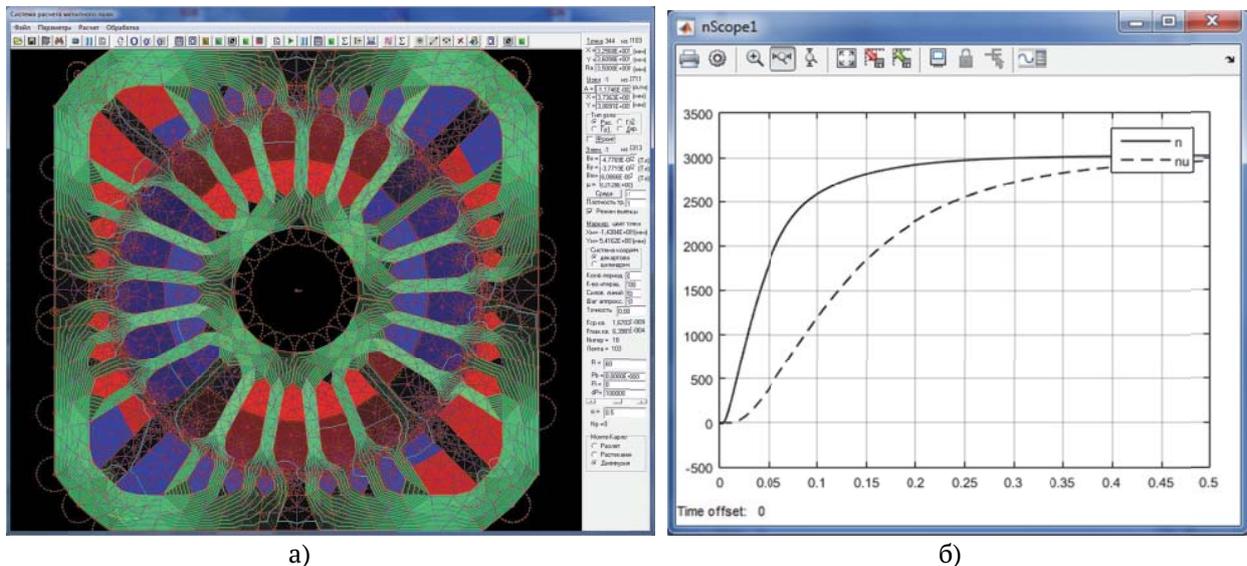


Рис. 5. Магнитное поле в номинальном режиме МПТ облегченной конструкции, полученной в ходе оптимизации, (а) и результаты имитации пуска данной МПТ (б)

позволяющая учесть влияние на динамику машины нетрадиционных особенности конструкции магнитной системы. На данной модели получены удовлетворительные динамические характеристики предложенного варианта машины. Получены существенная экономия активных материалов и снижение габаритов и веса машины по сравнению с промышленными аналогами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихонов А.И. Статор четырехполюсной коллекторной электрической машины. № 113089. Заявка № 2011131574, приоритет от 27.07.11, зарегистрировано в гос. реестре 27.01.12. Срок действия 27.07.2021.
2. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. [под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова]. Т. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
3. Тихонов А.И., Гусенков А.В., Тамьярова Ю.В., Подобный А.В. Технология моделирования в Simulink динамических режимов работы электрических машин с использованием библиотеки полевых расчетов // Вестник ИГЭУ. 2016. Вып. 6. С. 57-65.
4. Тихонов А.И., Булатов Л.Н. Платформонезависимая библиотека конечно-элементного моделирования магнитного поля / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – № 2011614852. Заявка № 2011613040, приоритет от 28.04.2011, Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22.06.2011.
5. Тихонов А.И., Казаков Ю.Б. Программирование численного эксперимента с использованием конечно-элементной модели магнитного поля в объектах электромеханики. Иваново: ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». 2008. – 80 с.
6. 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.
7. Тамьярова М.В. Легков А.А., Тихонов А.И. Подсистема параметрической генерации и анализа конечно-элементных моделей электрических машин на основе библиотеки EMLib // Пенза, ПензГТУ: «XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего». Серия: Технические науки. Технология производства продуктов. Информатика, вычислительная техника и управление. 2016. № 5(33). – С. 121 – 125.

DC MACHINE LIGHTWEIGHT DESIGN FOR AIRCRAFT

© 2018 A.V. Tamyarov¹, M.V. Tamyarova¹, A.I. Tikhonov²

¹ Ulyanovsk State Technical University

² Ivanovo State Power Engineering University

Background. One of the main requirements for aviation electrical machines, is the requirement to reduce the weight and size characteristics. Therefore, the search for ways to reduce the weight of electrical machines is an urgent task. *Materials and methods.* The work was based on the results of a finite-element simulation of a magnetic field embedded in a chain model of the dynamic regims of the DC machine. Optimization of the design of the machine was carried out using genetic algorithms. *Results.* A high-speed field dynamic model of a DC machine has been developed, which allows to take into account the influence on the dynamics of a machine by the features of its design. In the course of optimization on the model of the magnetic field, a version of the machine was obtained, which makes it possible to obtain substantial savings of active materials and to reduce the weight and size parameters. *Conclusions.* The results can be used in the design and manufacture of aircraft DC machines.

Keywords: DC machine, weight and dimensions of electric machines, modeling of dynamic modes of electric machines, finite element method.

Andrey Tamyarov, Candidate of Technics, Associate Professor at the of Aircraft Construction Department. E-mail: a.tamyarov@ulstu.ru

Maya Tamyarova, Senior Lecturer at the Informatics and Control Systems Department. E-mail: stprepod@mail.ru

Andrey Tikhonov, Doctor of Technics, Professor, Head at the Physics Department. E-mail: ait@dsn.ru