

**ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ
РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И АППАРАТОВ
НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО
МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

К. В. Семенова, М. В. Тамьярова, А. И. Тихонов

**THE TECHNOLOGY OF MODELING THE DYNAMIC MODES
OF ELECTRICAL MACHINES AND DEVICES BASED
ON QUASI-STATIONARY MAGNETIC FIELD MODELS**

K. V. Semenova, M. V. Tamyarova, A. I. Tikhonov

Аннотация. Актуальность и цели. В условиях современного производства особые требования предъявляются к адекватности и точности моделей, заложенных в подсистемах поверочного расчета разрабатываемых устройств. Цель работы – повышение эффективности проектирования электромеханических устройств в условиях мелкосерийного и штучного производства. *Материалы и методы.* Работа строится на основе моделей квазистационарного магнитного поля, основанных на методе конечных элементов. Для создания и расчета полевых моделей электрических машин и аппаратов использована авторская динамически подключаемая библиотека моделирования электрических полей EMLib, способная интегрироваться с открытыми приложениями и математическими пакетами. Это позволяет создавать программы автоматической генерации полевых моделей и численных расчетов данных моделей. Результаты серий полевых расчетов используются для формирования матриц коэффициентов нелинейной системы уравнений, описывающих динамику разрабатываемого устройства. *Результаты.* Разработана оригинальная технология моделирования динамических режимов электромеханических устройств с использованием полевых моделей. Приведены характерные примеры применения данной технологии при исследовании электрических машин. *Выводы.* Использование рассмотренной технологии позволяет учесть особенности конструкции разрабатываемого устройства, что характерно для полевых моделей, обеспечивая при этом быстродействие, характерное для упрощенных цепных моделей динамических процессов.

Ключевые слова: моделирование динамических режимов электромеханических устройств, моделирование в среде Simulink, метод конечных элементов, расчет магнитного поля.

Abstract. Background. In the conditions of modern production, special requirements are placed on the adequacy and accuracy of the models laid down in the subsystems for verification of the devices being developed. The aim of the work is to increase the efficiency of designing electromechanical devices in the conditions of small-lot and piece production. *Materials and methods.* The work is based on quasi-stationary magnetic field models based on the finite element method. To create and calculate the field models of electric machines and apparatus, the author's dynamically connected EMLib electric field modeling library is used, which is able to integrate with open applications and mathematical packages. This allows you to create programs for automatic generation of field models and numerical calculations of these models by a given algorithm. The results of the series of field calculations

are used to form the coefficients matrices of a nonlinear system of equations describing the dynamics of the device being developed. *Results.* An original technology for modeling the dynamic modes of electromechanical devices using field models has been developed. Typical examples of the application of this technology in the study of electric machines are given. *Conclusions.* The use of the technology considered allows us to take into account the design features of the device being developed, which is typical for field models, while ensuring the speed characteristic of simplified chain models of dynamic processes.

Key words: simulation of dynamic modes of electromechanical devices, Simulink simulation, finite element method, magnetic field calculation.

Введение

Наиболее важным звеном любой системы проектирования электрических машин и аппаратов является подсистема поверочного расчета, роль которой состоит в определении характеристик спроектированного устройства. При этом ошибки, которые могут быть вызваны неадекватностью моделей, заложенных в основу данной подсистемы, могут привести к браку на производстве, который вызван нетехнологическими факторами. Следует отметить, что модели, используемые при проектировании электрических машин и аппаратов типовой конструкции, строятся, как правило, на основе теории магнитных цепей с учетом множества дополнительных корректирующих факторов, зависящих от особенностей конструкции магнитной системы проектируемого устройства. Данные корректировки вводятся на основе проведенных ранее научных исследований, подтвержденных результатами натуральных экспериментов. Как правило, подобные методики расчета обеспечивают достаточную для инженерных задач точность, позволяющую гарантировать выполнение требований технического задания. Однако подобный подход применим только для случаев, специально оговоренных принятой методикой. Если конструкция устройства содержит элементы, не предусмотренные принятой расчетной методикой, то гарантировать правильность поверочного расчета невозможно.

Для настоящего времени характерна тенденция к мелкосерийному или даже штучному производству технических устройств. Причем зачастую возникает необходимость проектирования устройств нетрадиционной конструкции, для которых не существует апробированных методик поверочного расчета. Так как изготовление и исследование опытных образцов значительно снижают рентабельность производства, то возрастает роль методик, построенных на универсальных моделях, позволяющих учесть незапланированные ранее особенности конструкции. К таким моделям относятся, например, модели, построенные на основе теории физических полей. В электромеханике определяющую роль играют модели на основе магнитного поля. Поэтому одним из главных инструментов, используемых при проектировании электромеханических устройств, сегодня являются системы инженерного анализа (CAE), позволяющие вывести экспериментальное исследование разрабатываемого устройства в виртуальную плоскость, т.е. заменить натуральный эксперимент численным.

Современные CAE-системы, используемые в электромеханике (ANSYS Maxwell, Comsol Multiphysics, ElCut и др.), можно отнести к числу компью-

терных приложений как наиболее дорогих, так и наиболее требовательных к уровню квалификации проектировщика. В то же время данные системы являются автономными продуктами, которые трудно состыковать с существующими на предприятиях системами проектирования (ни одна система в отдельности не способна удовлетворить все запросы проектировщика). К тому же полевые модели очень требовательны к компьютерным ресурсам. Особенно явно это проявляется при необходимости осуществить расчет динамических режимов работы электромеханических устройств (время расчета полевых динамических моделей оценивается часами). При этом, как отмечалось в [1], без оценки динамических режимов работы устройств нетрадиционной конструкции невозможно быть уверенным в правильности проектного расчета.

Таким образом, актуальной является задача разработки технологии моделирования динамических режимов работы электрических машин и аппаратов, основанной на полевых моделях, интегрированных в произвольную проектную среду, позволяющую осуществлять исследования разрабатываемого устройства в режиме имитации эксперимента.

Ценные динамические модели электромеханических устройств в среде Simulink

Одним из наиболее оптимальных пакетов для создания интегрированной среды численного исследования разрабатываемых электромеханических устройств является табличный процессор Excel, предоставляющий проектировщику интерфейс, удобный для ввода/вывода информации в табличной и графической форме, а также для ее обработки. Наличие встроенной системы программирования VBA позволяет существенно расширить базовый функционал Excel. Научно-технические модели можно создавать и исследовать с использованием функционала математического процессора MatLab, который не только предоставляет исчерпывающий с точки зрения инженерных задач аппарат численных расчетов, но и позволяет разрабатывать новые модели с использованием встроенной системы программирования [2]. Связь Excel и MatLab осуществляется с использованием интерфейса Excel Link, позволяющего производить обмен данными между пакетами программным образом.

Для исследования цепных моделей электромеханических устройств можно использовать приложение Simulink, интегрированное в MatLab. Особенно интересен в этом смысле подход, связанный с использованием библиотеки моделирования физических процессов SymPowerSystem, расширяющей возможности Simulink, поставляя в него функционал имитации электрических цепей [3]. Данная библиотека содержит модели всех типов электрических машин, а также трансформаторов, реакторов и т.п. Однако, во-первых, данные модели не способны охватить всю полноту возможных вариантов электромеханических устройств. Во-вторых, зачастую проектировщика не удовлетворяет качество предоставляемых моделей. Поэтому интересна возможность создания своих моделей, в которых заложен проверенный математический аппарат. Например, на рис. 1 представлена модель машины постоянного тока, реализованная базовыми средствами Simulink и средствами библиотеки

SymPowerSystem [4]. Особенность данной модели в том, что в ней более детально прописаны элементы магнитной цепи, представленной электрической схемой замещения, содержащей магнитное сопротивление зазора:

$$R_d = 2 \frac{k_\delta \delta}{\mu_0 \tau \alpha_\delta l_\delta}, \quad (1)$$

источник магнитодвижущей силы (МДС)

$$F_f = i_f W_f, \quad (2)$$

и также источник МДС, имитирующий падение магнитного напряжения в элементах магнитной цепи, номинал которого рассчитывается по формуле

$$U_m = \Phi \sum_{i=1}^N R_{mi} = \Phi \sum_{i=1}^N \left[v \left(\frac{\Phi}{S_{mi}} \right) \frac{l_{mi}}{S_{mi}} \right]. \quad (3)$$

В формулах (1)–(3) обозначено: k_δ – коэффициент воздушного зазора; δ – величина зазора; μ_0 – магнитная постоянная; τ – полюсное деление; α_δ – коэффициент полюсного перекрытия; l_δ – расчетная длина машины; i_f – ток обмотки возбуждения (ОВ); W_f – число витков ОВ; Φ – магнитный поток на полюсном делении; R_{mi} – магнитное сопротивление i -го участка магнитной цепи; l_{mi} , S_{mi} – расчетная длина и расчетное сечение i -го участка магнитной цепи; $v(B_{mi})$ – удельное магнитное сопротивление i -го участка магнитной цепи, заданное в виде зависимости от магнитной индукции на данном участке B_{mi} .

Уравнение вращения ротора на рис. 1 также задано в виде электрической схемы замещения.

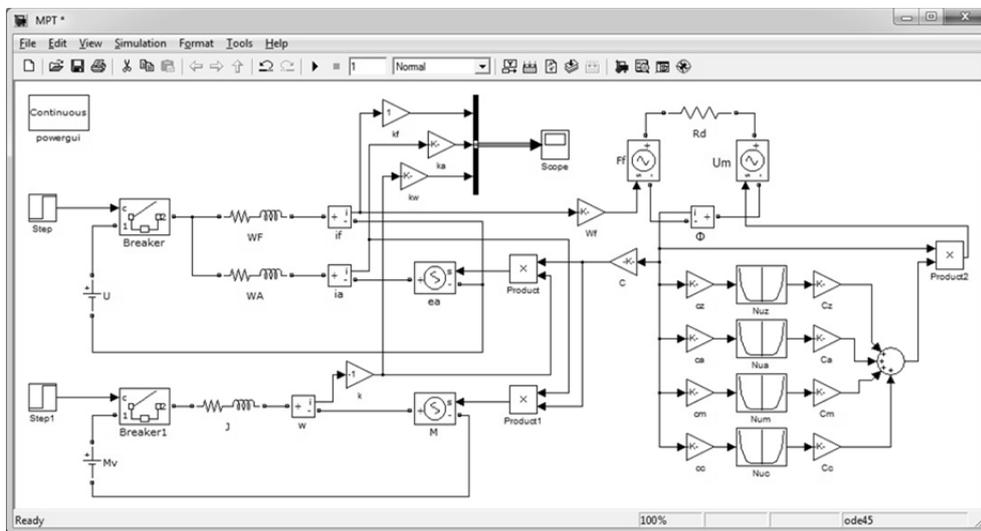


Рис. 1. Нелинейная модель двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением в среде Simulink с использованием библиотеки SymPowerSystem

Динамическая полевая модель электрического устройства

Несмотря на то, что в модели на рис. 1 учтено больше факторов, чем в модели, поставляемой библиотекой SymPowerSystem, в ней отсутствует учет влияния на работу машины реакции якоря, насыщения кромок зубцов и т.п. Максимально детально все эти особенности можно учесть только при использовании полевых моделей. Для расчета динамических режимов работы электромеханических устройств в полевой постановке можно использовать, например, пакет ANSYS Maxwell, позволяющий решать задачи расчета нестационарного магнитного поля совместно с электрической цепью. Однако это и дорого (не каждое производство может позволить себе приобрести лицензию на данный пакет), и требует значительного расчетного времени, и сложно стыкуется с другими элементами САПР. Поэтому для решения подобных задач была разработана технология, позволяющая строить полевые динамические модели электромеханических устройств на основе серии расчетов квазистационарного магнитного поля [5–7]. В основе данной технологии лежит положение о том, что производная по времени от потокоцепления любого k -го контура (или обмотки) с током может быть представлена разложением

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

где i_j – ток j -го контура; α – угол, определяющий положение ротора (для электрических машин); L_{kj} – взаимная индуктивность k -го и j -го контуров; ω – частота вращения ротора.

При этом первое уравнение в системе уравнений динамики электрической машины

$$\begin{cases} \frac{d\Psi}{dt} = \mathbf{u} - \mathbf{R}\mathbf{i}, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_B) \end{cases} \quad (5)$$

принимает вид

$$\frac{d\mathbf{i}}{dt} = \mathbf{L}^{-1}(\mathbf{u} - \mathbf{R}\mathbf{i}), \quad (6)$$

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; J – момент инерции якоря; M – электромагнитный момент; M_B – момент нагрузки на валу; \mathbf{L} – матрица коэффициентов, элементами которой являются частные производные от потокоцеплений по токам контуров и углу поворота ротора.

Например, для машины постоянного тока с параллельным возбуждением система уравнений (5) в матричной форме с учетом скоса пазов имеет вид [1]

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Psi_f}{\partial i_f} + L_{fl} & \frac{\partial \Psi_f}{\partial i_a} & 0 & 0 \\ \frac{\partial \Psi_{ak}}{\partial i_f} & \frac{\partial \Psi_{ak}}{\partial i_a} + L_{al} + L_{kl} & \frac{\partial \Psi_a}{\partial \alpha} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_f}{dt} \\ \frac{di_a}{dt} \\ \frac{d\alpha}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u - i_f R_f \\ u - i_a R_a - i_a R_k \\ \omega \\ \frac{M(i_f, i_a, \alpha) - M_B}{J} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где индексы f, a, k относятся соответственно к обмотке возбуждения (ОВ), обмотке якоря (ОЯ) и компенсационной обмотке (КО); индекс ak соответствует сумме потокоцеплений ОЯ и КО; L_{fl}, L_{al}, L_{kl} – индуктивности лобового рассеяния ОВ, ОЯ и КО.

Для расчета элементов матрицы коэффициентов организуется серия расчетов магнитного поля при различных сочетаниях токов в контурах и различных положениях ротора. По результатам данной серии строятся матрицы потокоцеплений, которые аппроксимируются многомерными сплайнами, что позволяет сформировать функции $\Psi_k(\mathbf{i}, \alpha)$. По этим функциям строятся сплайны частных производных. Например, на рис. 2,а представлена функция $\Psi_f(i_f, i_a)$ машины постоянного тока с параллельным возбуждением, а на рис. 2,б – функция $L_{fa} = \partial \Psi_f(i_f, i_a) / \partial i_f$. Функции $C_a = \partial \Psi_a(i_f, i_a) / \partial \alpha$ и $M(i_f, i_a, \alpha)$ строятся аналогичным образом на основании этой же серии расчетов магнитного поля.

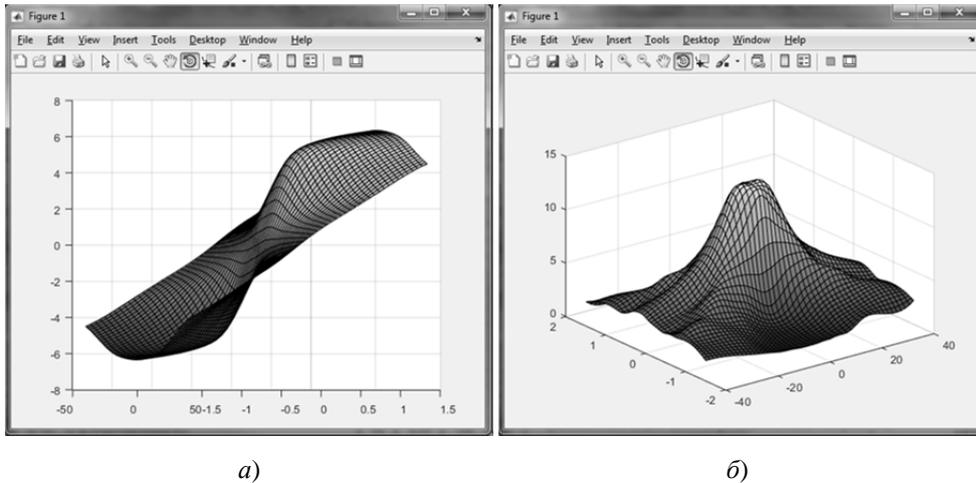


Рис. 2. Функции $\Psi_f(i_f, i_a)$ и $\partial \Psi_f(i_f, i_a) / \partial i_f$ машины постоянного тока с параллельным возбуждением

При решении системы уравнений (7) матрица коэффициентов пересчитывается на каждом шаге интегрирования по времени. При этом осуществляется обращение к сплайнам частных производных от потокоцеплений и сплайну электромагнитного момента с подстановкой текущих мгновенных значений токов в контурах \mathbf{i} и текущем положении ротора α .

Представленная модель позволяет моделировать работу электромеханического устройства в динамике. Скорость расчета соизмерима со скоростью упрощенной цепной модели, например модели, представленной на рис. 1. Это позволяет осуществить имитацию эксперимента практически в реальном времени и исследовать работу устройства в различных условиях. В плане точности и возможности учета особенностей конструкции магнитной системы представленная модель не уступает полевым моделям (в рамках допущения о пренебрежительно малом влиянии вихревых токов).

При наличии большого количества контуров с током (обмоток) растет мерность сплайнов, что приводит к замедлению расчетного процесса. Так, уже при наличии шести контуров с током время расчета возрастает настолько, что достигнутые преимущества динамической полевой модели теряются. В то же время в большинстве случаев удается сформулировать такие допущения, которые сокращают размерность задачи до 3–4 без существенной потери точности и универсальности модели. Так, при расчете динамических режимов трехфазного трансформатора [5, 7] динамическая модель строится на основе шести матриц потокосцеплений $\Psi_k = f(F_1, F_2, F_3)$, которые строятся путем варьирования намагничивающих сил (НС) трех стержней F_1, F_2 и F_3 и рассчитываются по формуле

$$F_m = j_m (S_{m1} + S_{m2}), \quad (8)$$

где j_m – средняя плотность тока в области обмоток m -го стержня; S_{m1}, S_{m2} – площади сечений первичной и вторичной обмоток m -го стержня.

Система уравнений динамики при этом принимает вид (6), где элементы матрицы \mathbf{L} вычисляются по формуле

$$L_{mk} = \frac{\partial \Psi_m}{\partial F_k} W_k, \quad (9)$$

где F_k – НС стержня, на котором находится k -я обмотка; W_k – число витков в k -й обмотке.

В случае асинхронной машины, особенно с короткозамкнутым ротором, где количество контуров определяется количеством обмоток статора и стержней ротора n , т.е. составляет несколько десятков, также удастся свести задачу всего к трем варьируемым величинам. При этом для каждого m -го контура строится матрица потокосцеплений, имеющая вид

$$\Psi_m(F_x, F_y, \alpha),$$

где F_x, F_y – НС машины по осям x и y . В свою очередь, НС F_x и F_y зависят от токов всех контуров i_1, \dots, i_n :

$$\left. \begin{aligned} F_x &= \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{Ns_j} F_{xjk} = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{Ns_j} i_j W_{kj} \cdot \cos(p\varphi_{kj}) = \sum_{j=1}^n i_j K_{xj} \\ F_y &= \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{Ns_j} F_{yjk} = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{Ns_j} i_j W_{kj} \cdot \sin(p\varphi_{kj}) = \sum_{j=1}^n i_j K_{yj} \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

где N_{sj} – число секций j -й обмотки статора; i_j – ток в j -й обмотке; W_{kj} – число витков в k -й секции j -й обмотки; ϕ_{kj} – угол наклона нормали k -й секции j -й обмотки; p – число пар полюсов машины.

Элементы матрицы \mathbf{L} в этом случае вычисляются по формуле (6). В итоге система уравнений (5) в матричной форме принимает вид

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial i_1}{\partial t} \\ \frac{\partial i_2}{\partial t} \\ \dots \\ \frac{\partial i_n}{\partial t} \\ \frac{\partial \alpha}{\partial t} \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Psi_1}{\partial F_x} K_{x1} + \frac{\partial \Psi_1}{\partial F_y} K_{y1} & \frac{\partial \Psi_1}{\partial F_x} K_{x2} + \frac{\partial \Psi_1}{\partial F_y} K_{y2} & \dots & \frac{\partial \Psi_1}{\partial F_x} K_{xn} + \frac{\partial \Psi_1}{\partial F_y} K_{yn} & \frac{\partial \Psi_1}{\partial \alpha} & 0 \\ \frac{\partial \Psi_2}{\partial F_x} K_{x1} + \frac{\partial \Psi_2}{\partial F_y} K_{y1} & \frac{\partial \Psi_2}{\partial F_x} K_{x2} + \frac{\partial \Psi_2}{\partial F_y} K_{y2} & \dots & \frac{\partial \Psi_2}{\partial F_x} K_{xn} + \frac{\partial \Psi_2}{\partial F_y} K_{yn} & \frac{\partial \Psi_2}{\partial \alpha} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \Psi_n}{\partial F_x} K_{x2} + \frac{\partial \Psi_n}{\partial F_y} K_{y2} & \frac{\partial \Psi_n}{\partial F_x} K_{x2} + \frac{\partial \Psi_n}{\partial F_y} K_{y2} & \dots & \frac{\partial \Psi_n}{\partial F_x} K_{xn} + \frac{\partial \Psi_n}{\partial F_y} K_{yn} & \frac{\partial \Psi_n}{\partial \alpha} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} u_1 - i_1 R_1 \\ u_2 - i_2 R_2 \\ \dots \\ u_n - i_n R_n \\ \omega \\ \frac{1}{J}(M - M_n) \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Аналогичным образом формируется система уравнений асинхронной машины с фазным ротором и синхронной машины, в том числе и с пусковой/успокоительной обмоткой.

Параметрическая генерация полевой модели

Одной из главных проблем, возникающих при построении полевых динамических моделей электрических машин и аппаратов по описанной технологии, является проблема автоматизации построения полевой модели и организации серии численных расчетов с последующей обработкой информации. При этом подсистема моделирования магнитного поля должна быть доступна для использования в произвольно написанном программном коде. При выборе в качестве среды численного моделирования математического пакета MatLab наиболее логично использовать для расчета физических полей библиотеку PDETool, которая предоставляет пользователю функционал решения систем дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов. Использование среды программирования MatLab позволяет создавать программные коды, полностью автоматизирующие построение и расчет по заданному алгоритму полевых моделей. В частности, на рис. 3.

приведен результат расчета модели магнитного поля, созданной программным путем в PDETool с помощью разработанного для этого параметрического генератора полевых моделей.

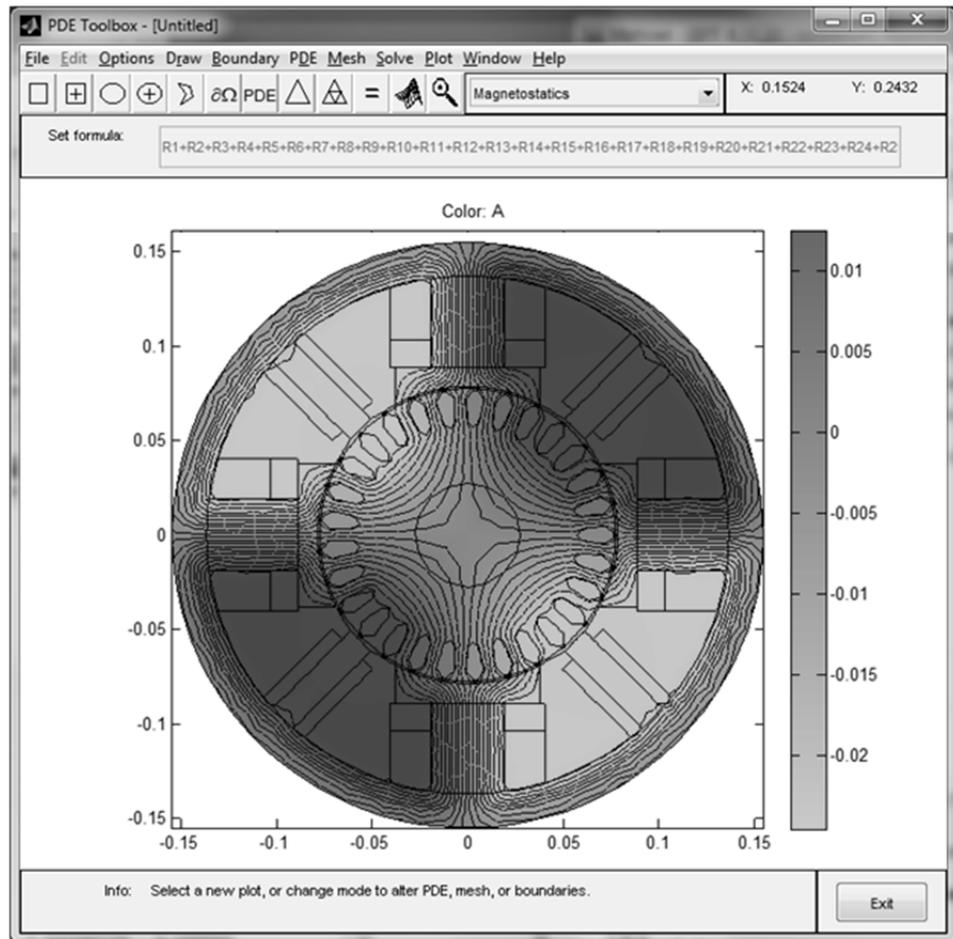


Рис. 3. Модель магнитного поля двигателя постоянного тока, созданная средствами PDETool

Данная модель является нелинейной. Как показало исследование, пакет PDETool хорошо работает при решении задач с относительно простой геометрией расчетной области. Однако уже в модели, представленной на рис. 3, для которой характерно большое количество элементов с разными характеристиками сред, была достигнута плохая сходимость нелинейной задачи, которая во многом определяется способом аппроксимации кривых намагничивания стали. При этом расчетный процесс не всегда оказывается сходящимся, часто расчетный процесс завершается аварийно с ошибкой достижения минимального шага поиска [8]. Кроме того, и построение, и расчет модели на рис. 3 в нелинейной постановке требует значительного расчетного времени (порядка 0,5 мин на построение и 1 мин на один расчет), что недопустимо при реализации серий численных исследований.

Следует отметить, что пакет MatLab органично интегрируется с САЕ-системой COMSOL Multiphysics, которая изначально разрабатывалась как приложение MatLab, но впоследствии обособилась от него, сохранив при этом способность к интеграции. Использование данной системы аналогичным образом позволяет решить поставленную задачу достаточно эффективно. Однако лицензия на пакет COMSOL Multiphysics доступна не каждому предприятию, особенно в сфере малого и среднего бизнеса. Поэтому в плане разрабатываемой технологии акцент был сделан на использовании динамически подключаемой библиотеки конечно-элементного моделирования физических полей EMLib, разработанной в ИГЭУ [9]. По возможностям в плане моделирования квазистационарного магнитного поля она не уступает российскому пакету ELCut, но, так как она оформлена в виде DLL, может быть интегрирована в любое открытое приложение, поставляя в них функционал программируемого формирования и расчета полевых моделей, что существенно расширяет доступный функционал.

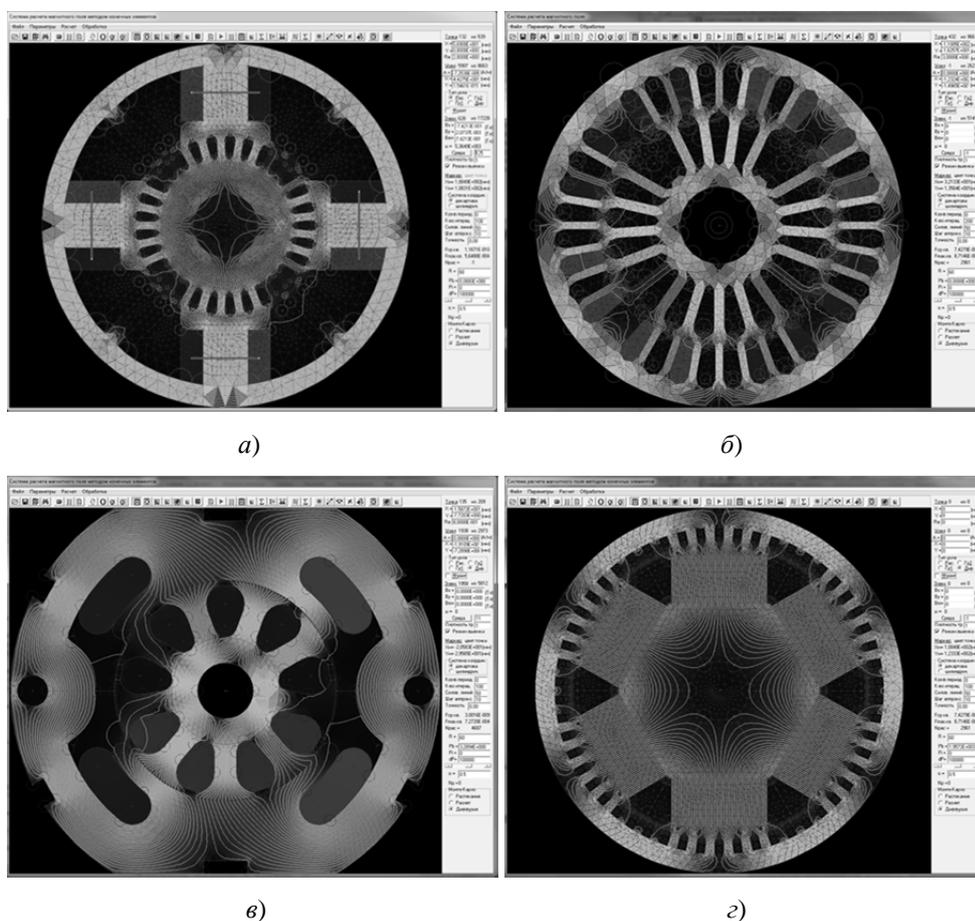


Рис. 4. Варианты полевых моделей электрических машин, созданных одним параметрическим генератором: *а* – явнополюсная машина постоянного тока; *б* – неявнополюсная машина постоянного тока; *в* – универсальный коллекторный двигатель; *г* – синхронная машина

В настоящее время ведется работа по созданию универсального параметрического генератора конечно-элементных моделей электрических машин, позволяющего создавать модели (рис. 4) по заданному списку параметров, однозначно характеризующих конструкцию активной части машины [10]. В частности, на рис. 4 приведено несколько моделей, созданных данным генератором. Генерация одной модели занимает доли секунды. Расчет одной модели, обеспечивающей достаточную для инженерных задач точность, длится порядка одной секунды. Это позволяет программировать серии экспериментов с использованием динамически регенерируемых полевых моделей. В частности, в настоящее время ведется работа по созданию системы поиска оптимальной конструкции электрических машин, осуществляющей оптимизацию с использованием генетических алгоритмов с полной перестройкой и расчетом полевой модели на каждом шаге поиска. Аналогичный генератор полевых моделей разрабатывается и для исследования силовых трансформаторов.

Результаты серии полевых расчетов для машины, представленной моделью на рис. 4,б, проиллюстрированы на рис. 2. Аналогичные результаты, полученные для универсального коллекторного двигателя (рис. 4,в), приведены на рис. 5.

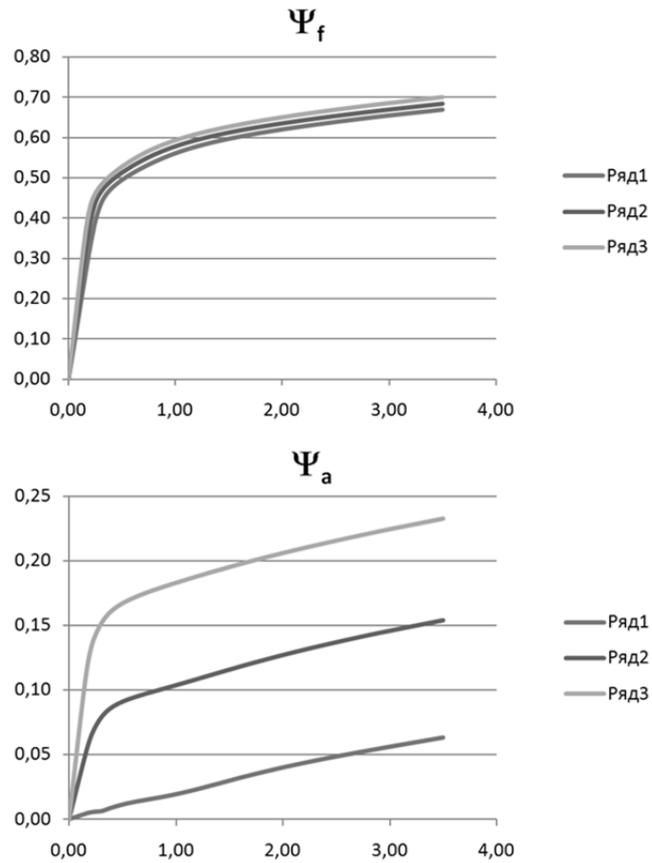


Рис. 5. Функции $\Psi_f(i_a, \alpha)$ и $\partial\Psi_a(i_a, \alpha)$, полученные в серии полевых расчетов на модели универсального коллекторного двигателя рис. 4,в (по вертикальной оси откладывается потокосцепление в Вб, три графика на каждом рисунке соответствуют трем углам поворота якоря на одном зубцовом делении)

Динамическая полевая модель электромеханического устройства в среде Simulink

Одним из наиболее оптимальных путей реализации полевой динамической модели электромеханических устройств в описываемой технологии моделирования является подстановка матриц коэффициентов, рассчитанных с помощью полевых моделей, в модели, реализованные в Simulink. В частности, на рис. 6 представлена структурная модель неявнополюсной машины постоянного тока с параллельным возбуждением, соответствующая системе уравнений (7) [1].

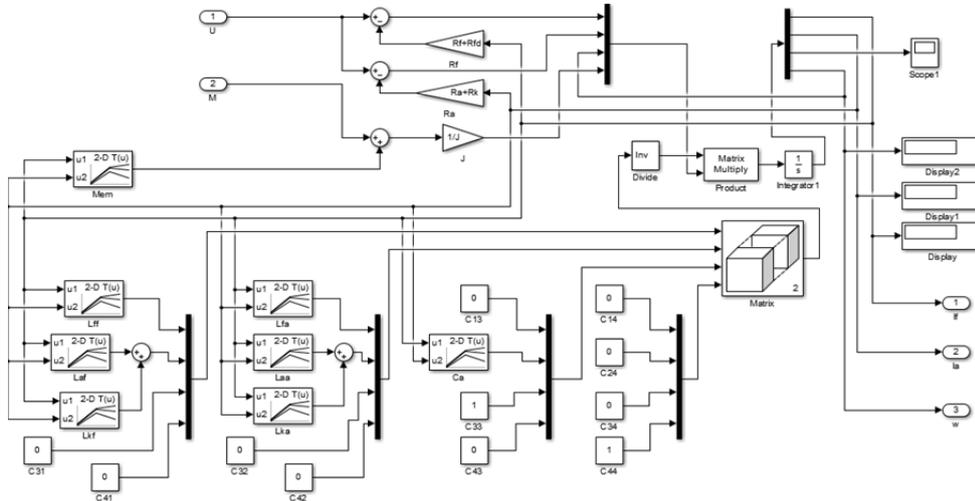


Рис. 6. Модель машины постоянного тока с параллельным возбуждением

Матрицы коэффициентов данной системы уравнений рассчитываются на каждом шаге интегрирования с использованием сплайнов (см. рис. 2), полученных путем серии расчетов полевой модели на рис. 4,б. Полевая динамическая модель выполнена в виде подсистемы Simulink, на вход которой подаются мгновенные значения напряжения питания и внешний момент на валу двигателя М. Рассчитанные в данной подсистеме мгновенные значения токов ОВ и ОЯ, а также частота вращения якоря возвращаются в модель внешней цепи (на рис. 6 данная модель не представлена). Матрица коэффициентов системы уравнений (7) формируется с помощью блока Matrix, осуществляющего конкатенацию матриц-столбцов, элементы которых рассчитываются по матрицам частных производных потокоцеплений с помощью блоков 2-D Lookup Table.

Аналогичная модель коллекторной машины с последовательным возбуждением (рис. 4,в) приведена на рис. 7. Данная модель соответствует системе уравнений

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial(\Psi_f + \Psi_a)}{\partial i} + L_{f\alpha} + L_{a\alpha} & \frac{\partial \Psi_a}{\partial \alpha} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di}{dt} \\ \frac{d\alpha}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u - iR_f - iR_a \\ \omega \\ \frac{M - M_e}{J} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

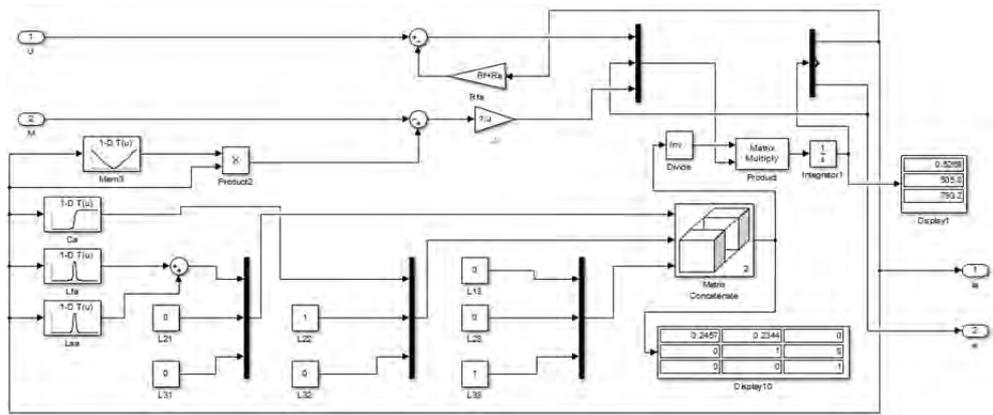
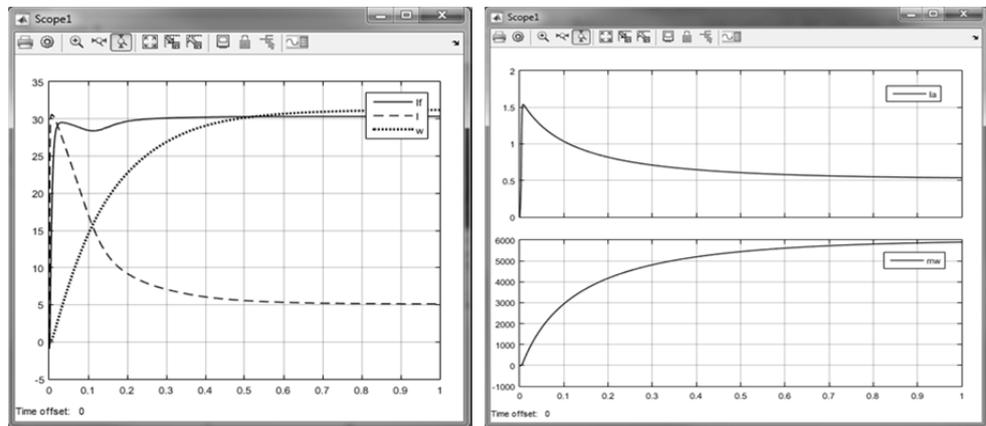


Рис. 7. Модель коллекторной машины с последовательным возбуждением

На рис. 8 приведены результаты расчета пуска машин, полученные с помощью моделей на рис. 6, 7. Рис. 8,а соответствует машине постоянного тока с параллельным возбуждением (см. рис. 4,б), рис. 8,б – универсальному коллекторному двигателю с последовательным возбуждением (см. рис. 4,в).



а)

б)

Рис. 8. Кривые разгона, вычисленные по полевой динамической модели:
 а – машина с параллельным возбуждением (см. рис. 6);
 б – машина с последовательным возбуждением (см. рис. 7)

Заключение

Рассмотрена оригинальная технология, позволяющая совместить в себе точность и универсальность полевых моделей с быстродействием цепных моделей динамических режимов работы электрических машин и аппаратов. Данная технология может быть применена к широкому классу устройств, основанных на индукционном принципе действия. В отличие от современных САЕ-технологий предлагаемый подход основан на относительно доступных программных средствах. В частности, вместо дорогостоящих САЕ-систем предлагается использовать дешевую динамически под-

ключаемую библиотеку моделирования магнитных полей, позволяющую создавать произвольные программируемые модели, основанные на полевых расчетах, не уступающие по возможностям функционалу дорогостоящих САЕ-систем. Использование пакета MatLab и приложения Simulink также не является принципиально необходимым, так как они могут быть успешно заменены открытыми аналогами. Таким образом, описанная технология оказывается доступной даже предприятиям малого и среднего бизнеса, обеспечивая их мощным функционалом современного наукоемкого инженерного анализа.

Библиографический список

1. Тихонов, А. И. Технология моделирования в Simulink динамических режимов работы электрических машин с использованием библиотеки полевых расчетов / А. И. Тихонов, А. В. Гусенков, Ю. В. Тамьярова, А. В. Подобный // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2016. – Вып. 6. – С. 57–65.
2. Дьяконов, В. П. MatLab 6/5 SP1 / 7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании / В. П. Дьяконов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с. – (Библиотека профессионала).
3. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М. : ДМК Пресс ; СПб. : Питер, 2008. – 288 с.
4. Тихонов, А. И. Моделирование электромеханических устройств в среде Simulink : метод. указ. к лаб. практикуму по теории подобия и моделирования / А. И. Тихонов, А. В. Лихачева, Д. В. Рубцов. – Иваново : Иван. гос. энерг. ун-т, 2015. – 48 с.
5. Климов, Д. А. Методы автоматизированного моделирования динамических режимов трансформаторов / Д. А. Климов, Г. В. Попов, А. И. Тихонов. – Иваново : Иван. гос. энерг. ун-т, 2006. – 100 с.
6. Булатов, Л. Н. Численные методы моделирования динамических режимов асинхронных машин / Л. Н. Булатов, А. И. Тихонов. – Иваново : Иван. гос. энерг. ун-т, 2013. – 120 с.
7. Шмелев, А. С. Методика организации численного исследования электротехнических устройств с использованием библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля / А. С. Шмелев, И. А. Пайков, Л. Н. Булатов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2014. – Вып. 1. – С. 55–61.
8. Легков, А. А. Разработка универсального параметрического генератора конечно-элементной модели электрических машин для подсистем оптимизации : материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия-2016» (г. Иваново, 5–7 апреля 2016 г.). / А. А. Легков, А. И. Тихонов. – Иваново : Иван. гос. энерг. ун-т, 2016. – Т. 4. – С. 47–49.
9. Платформонезависимая библиотека конечно-элементного моделирования магнитного поля : свид. гос. рег. программы для ЭВМ № 2011614852 от 22.06.2012 / Тихонов А. И., Булатов Л. Н. – Заявка № 2011613040 ; приоритет от 28.04.2011.
10. Система параметрической генерации конечно-элементной модели магнитного поля в электрических машинах : свид. гос. рег. программы для ЭВМ № 2015660677 от 06.10.2015 / Тихонов А. И., Шмелев А. С., Пайков И. А. – Заявка № 2015617810 ; приоритет от 25.08.2015.

Семенова Ксения Васильевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра пожарной безопасности
объектов защиты,
Ивановская пожарно-спасательная
академия ГПС МЧС России
E-mail: skv1_70@mail.ru

Semenova Ksenia Vasilyevna

candidate of technical sciences,
associate professor,
sub-department of fire safety
of protection facilities,
Ivanovo Fire and Rescue Academy
of the State Fire Service of the Ministry
of the Russian Federation for Civil Defense,
Emergencies and Elimination
of Consequences of Natural Disasters

Тамьярова Майя Владиславовна

старший преподаватель,
кафедра информатики
и систем управления,
Самарский государственный
технический университет
E-mail: stprepod@mail.ru

Tamyarova Maya Vladislavovna

senior lecturer,
sub-department of informatics
and control systems,
Samara State Technical University

Тихонов Андрей Ильич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой физики,
Ивановский государственный
энергетический университет
E-mail: ait@dsn.ru

Tikhonov Andrey Ilyich

doctor of technical sciences, professor,
head of sub-department of physics,
Ivanovo State Power Engineering
University

УДК 621.313

Семенова, К. В.

Технология моделирования динамических режимов электрических машин и аппаратов на основе моделей квазистационарного магнитного поля / К. В. Семенова, М. В. Тамьярова, А. И. Тихонов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017. – № 3 (23). – С. 160–174.