

УДК 621.313

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
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация

Филиал ФГБОУВО «Самарский государственный технический университет», г. Сызрань, Российская Федерация
E-mail: ait@dsn.ru, avgus@ispu.ru, stprepod@mail.ru, aleksandr.rash@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Моделирование динамики электрических машин осуществляется обычно с использованием электрических схем замещения с сосредоточенными параметрами. Наиболее популярным для этих целей является пакет MatLab Simulink. Общим недостатком цепных моделей электрических машин является то, что они не учитывают нетрадиционных особенностей их конструкции, которые можно учесть только при решении задачи в полевой постановке. При этом время расчета полевых динамических моделей на несколько порядков больше времени расчета цепных моделей. В настоящее время не существует технологии моделирования, позволяющей использовать быстродействующие полевые динамические модели в таких имитационных пакетах, как Simulink. В связи с этим актуальной является задача разработки динамических моделей электрических машин, в которых точность и универсальностью полевых моделей сочетается с быстродействием цепных моделей.

Материалы и методы: Для расчета магнитного поля использована библиотека конечно-элементного моделирования EMLib, результаты серии расчетов магнитного поля аппроксимированы многомерными сплайнами с использованием пакета MatLab, для построения цепной модели электрической машины использован Simulink.

Результаты: Предложена технология организации вычислительного эксперимента, отличающаяся от известных использованием в цепных моделях аппроксимации результатов предварительной серии полевых расчетов при моделировании динамических режимов электромеханических устройств и обеспечивающая за счет этого сокращение времени интегрирования на два-три порядка при сохранении точности, обеспечиваемой полевыми моделями, что позволяет использовать полевые динамические модели при имитации работы электромеханических устройств в моделях систем управления электроприводами.

Выводы: Достоверность результатов, полученных с применением новой технологии, подтверждается ее использованием при решении задачи моделирования пуска двигателей постоянного тока, в том числе, нетрадиционной конструкции. По сравнению с аналогичной задачей, решаемой с помощью известных CAE-систем, получено сокращение времени на три порядка. Предложенная технология может использоваться при проектировании электрических машин и систем управления электроприводами. Развитие данной технологии предполагается в направлении создания быстродействующих полевых динамических моделей всех типов электрических машин.

Ключевые слова: метод конечных элементов, расчет магнитного поля, полевая динамическая модель электрической машины, моделирование электрических машин в среде Simulink.

Simulink technology for modeling dynamic modes of electric machine operation using a field calculations library

A.I. Tikhonov, A.V. Gusenkov, Yu.V. Tamyarova, A.V. Podobny
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
Branch of Samara State Technical University, Syzran, Russian Federation
E-mail: ait@dsn.ru, avgus@ispu.ru, stprepod@mail.ru, aleksandr.rash@mail.ru

Abstract

Background: Dynamics of electrical machines is usually modelled by using electrical equivalent circuits with concentrated parameters. The most widely used package for this purpose is MatLab Simulink. A common drawback of chain models of electric machines is that they do not take into account non-traditional features of their design, which can only be taken into account by solving this problem in a field setting. At the same time, the calculation time of the field dynamic models is by several orders of magnitude longer than that of chain models. Currently, there is no modeling technology allowing the use of high-speed dynamic field models in simulation packages such as Simulink. Therefore, it is now urgent to develop dynamic models of electrical machines, in which the precision and versatility of field models is combined with the high speed of chain models.

Materials and methods: Magnetic field was calculated using a finite element library EMLib, the simulation results of a series of magnetic field calculations were approximated by multidimensional splines using the MatLab package, and the chain model of the electric machine was constructed in Simulink.

Results: A technology of conducting a computational experiment has been suggested, which applies preliminary field calculation results approximation to chain models for simulating dynamic modes of electromechanical devices and thus shortens the integration process by two-three orders of magnitude while maintaining the accuracy of the field models. This allows the use of field-dynamic models in simulating operation of electromechanical devices in electric drive control models.

Conclusions: The reliability of the results obtained using the new technology is confirmed by its use in solving problems of simulating the start of DC motors including those of non-traditional design. Compared to a similar problem solved by the well-known CAE-systems, the time is reduced by three orders of magnitude. The suggested technology can be used in designing electrical machines and electrical control systems. The development of this technology is expected in the direction of high-speed dynamic field models of all types of electric machines.

Key words: finite element method, calculation of magnetic field, field dynamic model of an electric machine, simulation of electric machines in Simulink environment.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.6.057-065

Состояние вопроса. Моделирование динамических режимов работы электрических машин в настоящее время осуществляется, главным образом, с использованием электрических схем замещения с сосредоточенными параметрами.

К числу популярных систем численного моделирования электрических цепей можно отнести пакет имитационного моделирования MatLab Simulink [1]. В плане моделирования электроэнергетических и электротехнических систем особый интерес представляет библиотека SimPowerSystems [2], являющаяся расширением пакета Simulink. В числе блоков данной библиотеки присутствуют модели электротехнических устройств, в частности электрических машин разных типов, трансформаторов, реакторов и т.п.

В настоящее время одной из наиболее актуальных задач в области моделирования электротехнических устройств является разработка динамических моделей, опирающихся на результаты расчета физических полей. В частности, при моделировании электрических машин с учетом особенностей их конструкции и нелинейности характеристик необходим, в первую очередь, расчет магнитного поля. Подобные задачи могут быть решены с использованием современных CAE-систем (Computer-Aided Engineering), в частности, с помощью пакетов ANSYS Maxwell [3, 4], EICut [5, 6] и т.п. Однако расчет динамических режимов работы устройств в полевой постановке требует значительного времени, что недопустимо в имитационном моделировании. Поэтому имеет смысл искать варианты моделирования, позволяющие совмещать в себе достоинства полевых моделей с высоким быстродействием цепных моделей.

Материалы и методы. Для достижения обозначенных целей в ИГЭУ была разработана библиотека моделирования магнитных полей методом конечных элементов EMLib [7], позволяющая рассчитывать двумерные магнитные поля, а также технология моделирования электротехнических устройств с использованием данной библиотеки [8], в том числе, в динамических режимах (как показывает опыт, до 80 % полевых задач в области электромеханики можно решить в двумерной постановке). Главное достоинство данной библиотеки состоит в возможности интегрирования ее в любое открытое приложение, в частности математиче-

ский пакет, например MSEExcel, MathCad, MatLab и т.п. При этом библиотека предоставляет в вызываемое ее приложение набор функций, с помощью которых можно программным образом генерировать серии моделей и исследовать их по заданному алгоритму, например, используя результаты расчета при моделировании динамики электрических машин.

Результаты исследования. Задача расчета магнитного поля решается с учетом ряда допущений, которые уменьшают трудоемкость алгоритмизации:

- 1) магнитное поле является квазистационарным;
- 2) магнитная система машины шихтована (пренебрегаем вихревыми токами);
- 3) переменное магнитное поле вытесняется из массивных элементов;
- 4) изменение тока в коммутирующих секциях машины постоянного тока происходит по линейному закону.

Система дифференциальных уравнений динамики произвольной электрической машины выглядит следующим образом:

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

где Ψ – вектор потокосцеплений обмоток машины или контуров с током; \mathbf{u} – вектор мгновенных напряжений на обмотках; \mathbf{R} – диагональная матрица сопротивлений; \mathbf{i} – вектор мгновенных токов; ω – частота вращения ротора; M – электромагнитный момент, развиваемый машиной; M_B – момент внешних сил, приложенных к валу; J – момент инерции.

Элементы вектора потокосцеплений зависят от токов в контурах i_1, i_2, \dots, i_n и угла поворота ротора α :

$$\Psi_k = \Psi_k(i_1, i_2, \dots, i_n, \alpha), \quad (2)$$

где $k = 1 \dots n$; n – количество контуров с током в машине.

Это значит, что для k -го контура можно записать

$$\frac{d\Psi_k}{dt} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \Psi_k}{\partial i_j} \frac{di_j}{dt} + \frac{\partial \Psi_k}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt} = \sum_{j=1}^n L_{kj} \frac{di_j}{dt} + C_k \frac{d\alpha}{dt}, \quad (3)$$

где L_{kj} – коэффициент индуктивной связи k -го контура с j -м током; C_k – коэффициент, определяющий наводимую в k -м контуре ЭДС вращения.

Ввиду нелинейности магнитных свойств ферромагнитных узлов машины, уравнение (3) является нелинейным, т. е. коэффициенты L_{ki} и C_k должны пересчитываться на каждом шаге интегрирования системы уравнений (1).

Потокоцепление k -го контура при заданном сочетании токов i_1, i_2, \dots, i_n в контурах машины может быть определено на основании расчета магнитного поля машины методом конечных элементов. При этом каждый k -й контур может состоять из n_{qk} последовательно соединенных обмоток, каждая из которых состоит из n_{pqk} параллельных ветвей, где каждая ветвь состоит из n_{spqk} последовательно соединенных секций или катушек. Тогда

$$\Psi_k = \sum_{q=1}^{n_{qk}} \left(\frac{1}{n_{pqk}} \sum_{p=1}^{n_{pqk}} \sum_{s=1}^{n_{spqk}} \Psi_{spqk} \right), \quad (4)$$

где Ψ_{spqk} – потокоцепление s -й секции p -й параллельной ветви q -й обмотки k -го контура.

Потокоцепление каждой отдельной секции может быть определено по результатам расчета магнитного поля по средневзвешенным значениям векторного магнитного потенциала на каждой стороне секции [9]:

$$\Psi_{spqk} = W_{spqk} \Phi_{spqk} = \frac{W_{spqk} L_{\delta}}{3} \left(\frac{\sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^3 S_{\Delta i} A_{ij}}{\sum_{i=1}^{N_1} S_{\Delta i}} - \frac{\sum_{i=1}^{N_2} \sum_{j=1}^3 S_{\Delta i} A_{ij}}{\sum_{i=1}^{N_2} S_{\Delta i}} \right), \quad (5)$$

где W_{spqk} – число витков в секции; Φ_{spqk} – магнитный поток, пронизывающий секцию; N_1, N_2 – число элементов конечно-элементной сетки, покрывающих сечения соответственно левой и правой сторон секции в расчетной конечно-элементной модели магнитного поля; $S_{\Delta i}$ – площадь i -го элемента; A_{ij} – значения векторного магнитного поля в j -х узлах i -го элемента.

Электромагнитный момент M в (1) может быть вычислен при заданном сочетании токов i_1, i_2, \dots, i_n в контурах машины по результатам расчета магнитного поля по формуле суммарного момента магнитных сил, действующих на тела, заключенные в заданном объеме [5]:

$$M = \frac{1}{2} \oint \left[\begin{array}{l} \vec{r} \times \vec{H} \quad \vec{n} \cdot \vec{B} + \vec{r} \times \vec{B} \quad \vec{n} \cdot \vec{H} - \\ - \vec{r} \times \vec{n} \quad \vec{H} \cdot \vec{B} \end{array} \right] ds, \quad (6)$$

где \vec{B} и \vec{H} – магнитная индукция и напряженность магнитного поля соответственно; \vec{r} – радиус-вектор точки интегрирования; \vec{n} – единичный вектор внешней нормали к поверхности ds .

Если начало отсчета системы координат совпадает с осью вращения ротора, а поверхность, ограничивающую заданный объем, выбрать цилиндрической, проходящей посередине зазора электрической машины перпендикулярно плоскости модели, то координаты единич-

ного вектора нормали совпадают с координатами единичного радиус-вектора

$$\vec{n} = \left(\frac{X}{R}, \frac{Y}{R} \right), \quad (7)$$

где R – средний радиус зазора; X, Y – координаты точки интегрирования.

При этом интеграл (6) можно приблизительно заменить суммой

$$M \approx \frac{L_{\delta}}{2R} \sum_{i=1}^{N_{\Delta z}} \left[\begin{array}{l} X_i H_{yi} - Y_i H_{xi} \quad X_i B_{xi} + Y_i B_{yi} + \\ + X_i B_{yi} - Y_i B_{xi} \quad X_i B_{xi} + Y_i B_{yi} \end{array} \right] \Delta L_i, \quad (8)$$

где L_{δ} – расчетная длина зазора машины в направлении, перпендикулярном плоскости модели; $N_{\Delta z}$ – количество элементов зазора; X_i, Y_i – координаты середины отрезка длиной ΔL_i , являющегося частью средней линии зазора (контура интегрирования), ограниченной i -м треугольным элементом зазора; $B_{xi}, B_{yi}, H_{xi}, H_{yi}$ – составляющие векторов соответственно магнитной индукции и напряженности магнитного поля в i -м элементе зазора.

Коэффициенты L_{ki} и C_k в уравнении (3) можно вычислить по приближенным формулам:

$$L_{kj} = \frac{\partial \Psi_k}{\partial I_j} \approx \frac{\Delta \Psi_k}{\Delta I_j}, \quad C_k = \frac{d\Psi_k}{d\alpha} \approx \frac{\Delta \Psi_k}{\Delta \alpha}. \quad (9)$$

При этом каждому j -му току поочередно дается приращение ΔI_j и по результатам расчета магнитного поля определяется приращение потокоцепления каждого k -го контура $\Delta \Psi_k$. Затем ротор поворачивается на угол $\Delta \alpha$ при неизменных токах и магнитных проницаемостях элементов, занятых ферромагнитной средой, и вновь рассчитывается магнитное поле, после чего рассчитывается C_k .

Такой способ расчета параметров электрической схемы замещения электрической машины с обращением к полевой модели на каждом шаге интегрирования имеет ряд недостатков:

- 1) могут быть проблемы со сходимостью, особенно в случае «шумов», порожденных численной погрешностью полевой модели, влияние которых возрастает при дифференцировании потокоцепления;
- 2) многократное обращение к полевой модели на каждом шаге интегрирования приводит к существенному замедлению расчетного процесса.

Поэтому расчет поля и интегрирование системы уравнений (1) рационально разнести по времени [8]. При этом сначала реализуется серия расчетов магнитного поля для различных комбинаций таблично заданных значений токов в контурах в пределах максимально возможного диапазона варьирования и положений ротора в пределах зубцового деления машины. Полученные таким образом матрицы потокоцеплений аппроксимируются многомерными сплайнами, по которым берутся частные производные и рассчитываются матрицы ко-

эффицентов L_{ki} и C_k . При аппроксимации матриц кубическими сплайнами сглаживаются «шумы» полевой модели. А так как дифференцирование кубических сплайнов осуществляется аналитическим путем, то устраняется погрешность, связанная с численным дифференцированием по (9). Кроме того, непосредственно интегрирование по времени системы уравнений (1) в данном случае осуществляется с обращением в каждом шаге интегрирования к сплайнам, а не к конечно-элементной модели магнитного поля, что на два-три порядка уменьшает время интегрирования.

Таким образом, описанная технология позволяет совместить в себе универсальность и точность полевых моделей с быстродействием цепных моделей. В частности, она была использована при моделировании динамических режимов работы машин постоянного тока, асинхронных машин и силовых трехфазных трансформаторов [8, 10]. Дальнейшее ее развитие видится в направлении использования моделей электрических машин и аппаратов в системах электропривода, смоделированных с использованием пакета Simulink.

В качестве примера рассмотрим модель неявнополюсного двигателя постоянного тока (НПДПТ) 4П80 с параллельным возбуждением мощностью $P_n = 750$ Вт, номинальным напряжением $U_n = 220$ В, номинальной частотой вращения $n_n = 3000$ об/мин, КПД $\eta = 75\%$. Машина имеет три обмотки: обмотку возбуждения (ОВ), обмотку якоря (ОЯ) и компенсационную обмотку (КО).

Система уравнений, описывающая упрощенную динамическую модель машины, вытекающая из (1), имеет вид

$$\begin{cases} u = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt}, \\ u = R_a + R_k i_a + L_a + L_k \frac{di_a}{dt} + k_f \omega, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} k_f i_a - M_B, \end{cases} \quad (10)$$

где u – мгновенное значение напряжения сети; $R_f, R_a, R_k, L_f, L_a, L_k$ – сопротивления и индуктивности ОВ, ОЯ и КО соответственно; i_f, i_a – мгновенное значение токов ОВ и ОЯ соответ-

ственно; ω – угловая скорость вращения якоря; k_f – коэффициент, связывающий величину ЭДС вращения и ω .

Упрощенная структурная схема для решения системы уравнений (10) в среде Simulink представлена на рис. 1. Ее особенность в том, что она учитывает нелинейность кривой намагничивания, представленной в форме $k_f = f(i_f)$ (рис. 1, блок kf).

Недостаток данной схемы состоит в том, что в ней не учтено влияние поля обмотки якоря на работу машины, а также не учитываются особенности конструкции машины, которые могут быть учтены только при наличии полевых расчетов.

Для построения полевой динамической модели электрической машины необходимо знать конструкцию машины. Если деталей чертежей машины не существует, можно воспользоваться системой проектирования данного класса машин и перепроектировать имеющуюся машину таким образом, чтобы результат проектирования полностью соответствовал паспортным данным и габаритным размерам моделируемой машины.

Например, для расчета НПДПТ была разработана система проектирования, разные версии которой функционируют в средах MSExcel и MathCad. В составе данной системы предусмотрена подсистема параметрической генерации конечно-элементной модели, которая автоматически формирует полевую модель по заданному алгоритму по полученному списку параметров расчетной области спроектированной машины. Для этого она обращается к соответствующим функциям динамически подключаемой библиотеки EMLib, с помощью которых формируется множество графических примитивов, определяющих геометрию расчетной области, множество подобластей с заданными характеристиками сред, множество узлов и множество треугольных элементов конечно-элементной сетки, наложенной на расчетную область, множество секций и состоящих из них обмоток. Отдельно строится якорь с заданной схемой обмотки и параметрами коллектора.

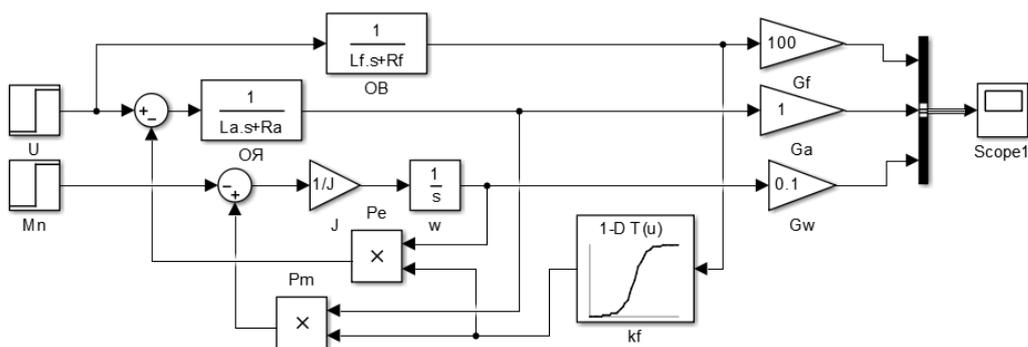


Рис. 1. Упрощенная нелинейная модель двигателя постоянного тока

В частности, на рис. 2 приведена конечно-элементная модель магнитного поля НПДПТ 4П80, сгенерированная подсистемой параметрической генерации модели.

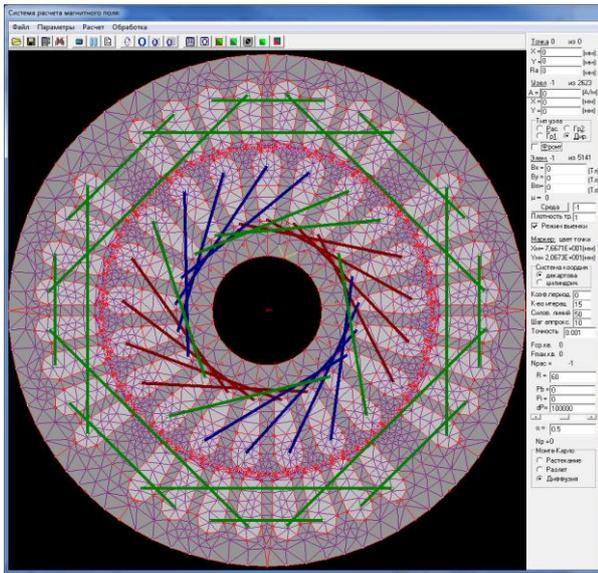


Рис. 2. Конечно-элементная модель НПДПТ 4П80

Система уравнений (1) для машины постоянного тока 4П80 с учетом разложения (3) в канонической форме Коши принимает вид

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \Psi_f + L_{ff}}{\partial i_f} & \frac{\partial \Psi_f}{\partial i_a} & 0 & 0 \\ \frac{\partial \Psi_{ak}}{\partial i_f} & \frac{\partial \Psi_{ak} + L_{af} + L_{kf}}{\partial i_a} & \frac{\partial \Psi_a}{\partial \alpha} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_f}{dt} \\ \frac{di_a}{dt} \\ \frac{d\alpha}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u - i_f R_f \\ u - i_a R_a - i_a R_k \\ \omega \\ \frac{M - M_B}{J} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где индексы f, a, k относятся к ОВ, ОЯ и КО соответственно; индекс ak соответствует сумме потокосцеплений ОЯ и КО; L_{ff}, L_{af}, L_{kf} – индуктивности лобового рассеяния ОВ, ОЯ и КО, определяемые по инженерным методикам; электромагнитный момент M рассчитывается по формуле (8).

Частные производные от потокосцеплений в матрице коэффициентов и электромагнитный момент M должны рассчитываться на каждом шаге интегрирования системы уравнений (6). Для этого используются аппроксимированные сплайнами матрицы потокосцеплений $\Psi_f(i_f, i_a), \Psi_k(i_f, i_a), \Psi_a(i_f, i_a, \alpha)$ и $M(i_f, i_a)$, по которым формируются матрицы частных производных (следует отметить, что, ввиду наличия в машине скоса пазов, значения потокосцеплений неподвижных обмоток и электромагнитного момента не зависят от угла поворота якоря α).

Матрицы потокосцеплений формируются в ходе предварительных расчетов магнитного поля, осуществляемых с помощью трех вложенных циклов, в каждом из которых варьируется соответствующая независимая величина: ток ОВ – в пределах $0 \leq i_f \leq I_{fmax}$ (впоследствии матрица пересчитывается на диапазон $-I_{fmax} \leq i_f \leq I_{fmax}$ с учетом свойства симметрии), ток якоря – в пределах $-I_{amax} \leq i_a \leq I_{amax}$; угол поворота – в пределах зубцового деления $-\alpha/2 \leq \alpha \leq \alpha/2$. Для каждого сочетания варьируемых переменных рассчитывается магнитное поле и определяются потокосцепления обмоток и величина электромагнитного момента.

При повороте якоря на угол $\Delta\alpha$ «замораживаются» схема обмотки якоря, зависящая от положения якоря относительно неподвижных щеток, и магнитные проницаемости всех элементов конечно-элементной сетки. Значения потокосцеплений неподвижных обмоток при разных положениях якоря усредняются, что соответствует скосу пазов якоря. В результате матрицы потокосцеплений неподвижных обмоток оказываются двумерными (не зависящими от α) и аппроксимируются двумерными сплайнами. Матрица потокосцеплений обмотки якоря аппроксимируется трехмерным сплайном, однако матрицы всех частных производных от матрицы $\Psi_a(i_f, i_a, \alpha)$ зависят только от двух переменных: i_f и i_a . Визуализация некоторых матриц, полученных в серии расчетов, приведена на рис. 3.

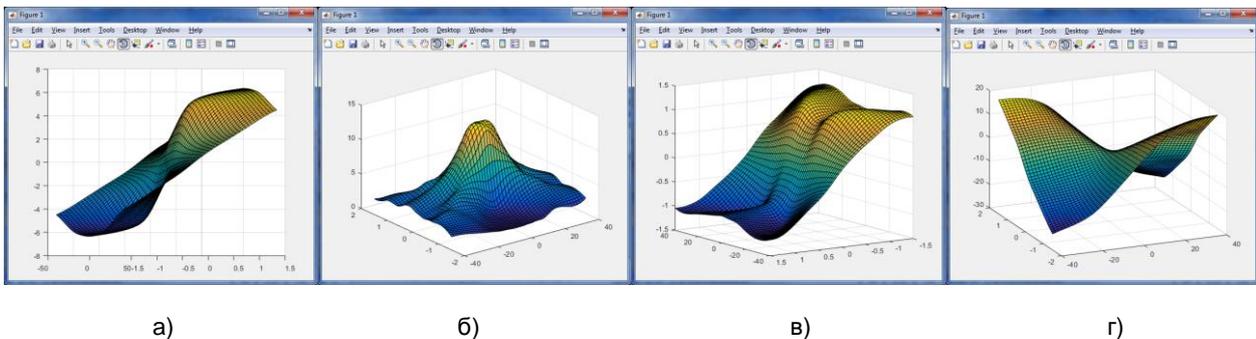


Рис. 3. Визуализация матриц: а – $\Psi_f(i_f, i_a)$; б – $\partial \Psi_f(i_f, i_a) / \partial i_f$; в – $\partial \Psi_a(i_f, i_a, \alpha) / \partial \alpha$; г – $M(i_f, i_a)$

Полученные матрицы используются в алгоритмах решения системы уравнений (11) с использованием приложения MatLab Simulink. В частности, на рис. 4 приведена модель электрической схемы пуска НПДПТ, выполненная с использованием библиотеки SymPowerSystem, входящей в состав MatLab Simulink.

Блок полевой динамической модели Dcm выполнен в виде подсистемы, на вход которой подаются мгновенные значения напряжения питания, фиксируемые измерителем напряжения V, и внешний момент на валу двигателя Mn (данные величины могут изменяться во времени). Мгновенные значения тока двигателя, рассчитанные в блоке Dcm, возвращаются в модель электрической цепи в качестве параметра управляемого источника тока двигателя Id.

Полевая динамическая модель НПДПТ, реализованная в блоке Dcm в соответствии с

системой уравнений (11), приведена на рис. 5. Здесь матрица коэффициентов системы уравнений (11) формируется с помощью блока Matrix, осуществляющего конкатенацию матриц-столбцов, элементы которых рассчитываются по матрицам частных производных, полученных по результатам серии численных расчетов магнитного поля машины.

На рис. 6, 7 приведены результаты расчета пуска НПДПТ, выполненного по упрощенной модели (рис. 1) и по полевой динамической модели (рис. 4, 5). Сравнительный анализ полученных результатов (рис. 1 и рис. 4, 5) показывает, что полевая модель демонстрирует больший бросок тока ОЯ, большую скорость нарастания тока ОВ и наличие провала в кривой $i_f(t)$, а также большее время разгона ДПТ.

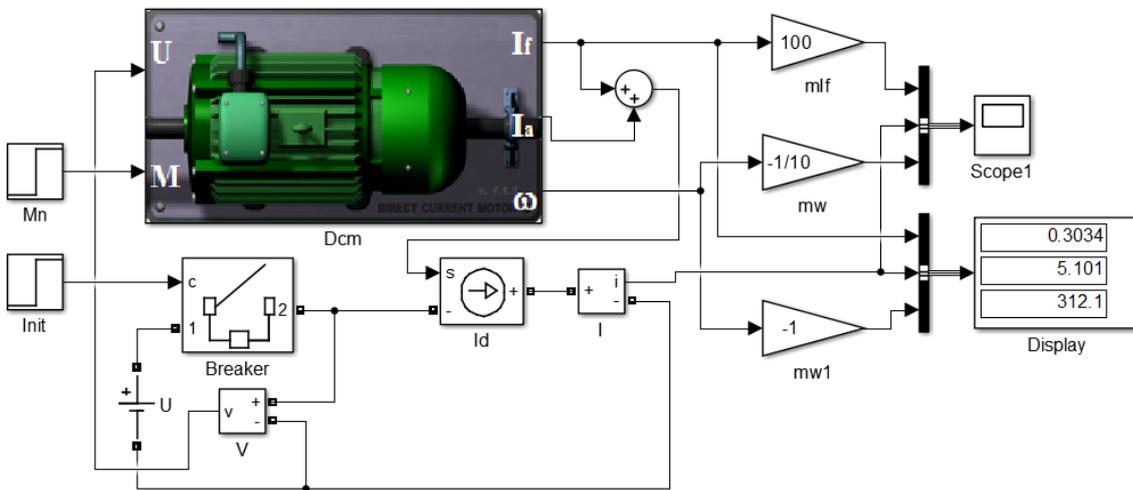


Рис. 4. Полевая динамическая модель двигателя постоянного тока

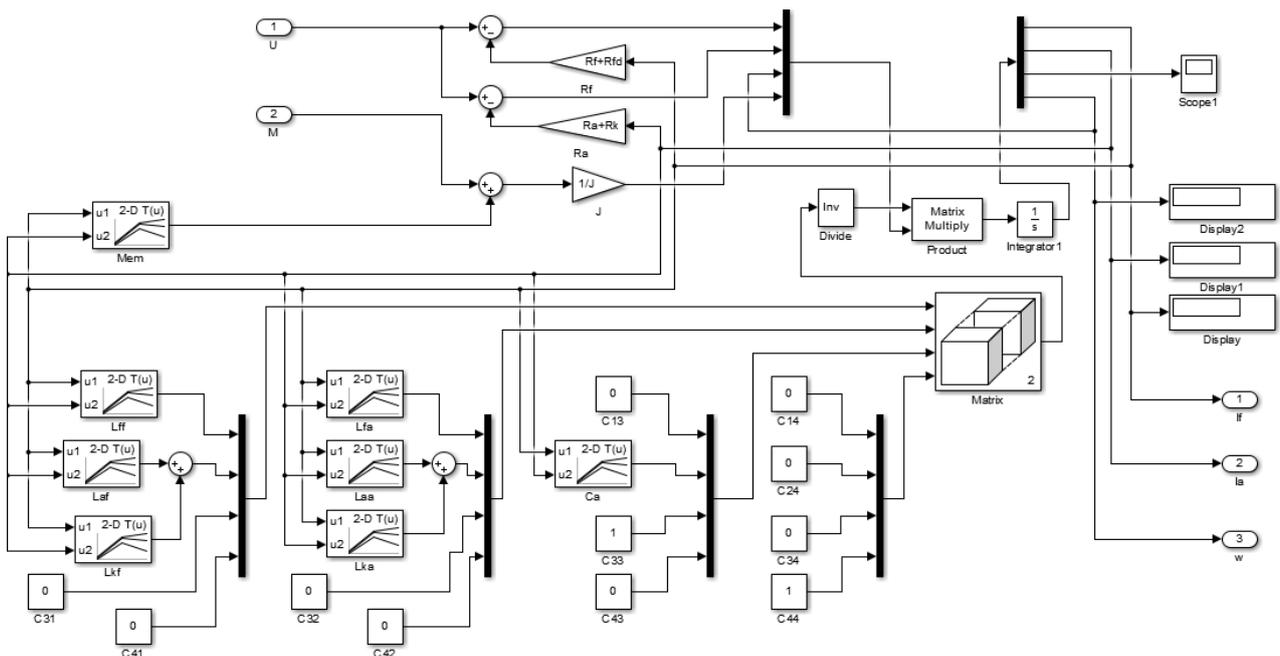


Рис. 5. Модель НПДПТ, реализованная в блоке Dcm

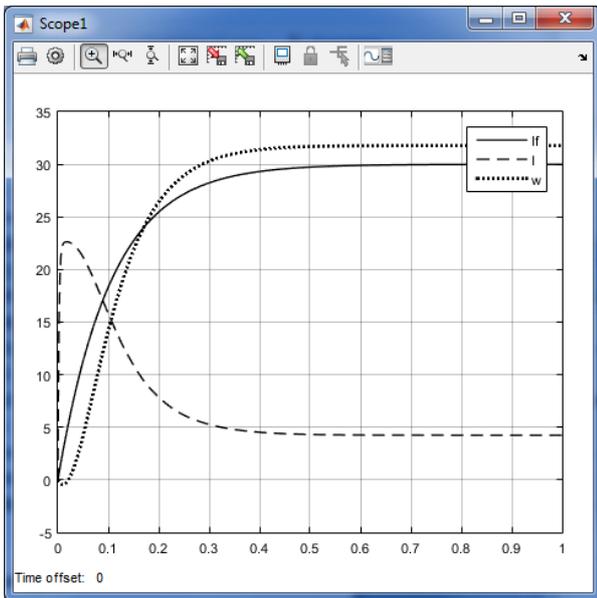


Рис. 6. Кривые разгона НП ДПТ, вычисленные по упрощенной модели

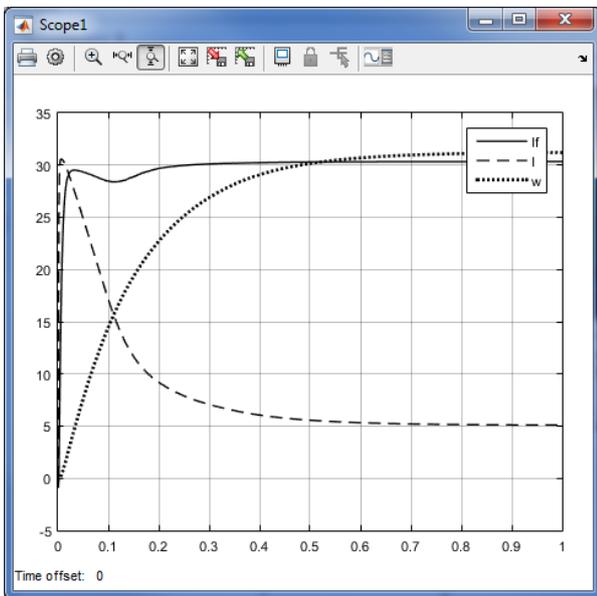


Рис. 7. Кривые разгона НП ДПТ, вычисленные по полевой динамической модели

Особенно интересным является случай использования полевой динамической модели при исследовании динамики машин, имеющих нетрадиционную конструкцию, для которых не существует апробированных методик расчета динамических режимов работы. Так, на рис. 8 приведена расчетная область машины постоянного тока с квадратным якорем и технологическими прорезами на путях потока поперечной реакции якоря. Кривые разгона данной машины без нагрузки, полученные по описанной технологии моделирования, приведены на рис. 9.

Сложности, возникающие при пуске данной машины, вызванные размагничивающим действием реакции якоря, говорят о необхо-

димости усовершенствовать конструкцию машины. При этом только полевые методы способны выявить подобные несовершенства динамических свойств неудачно спроектированного устройства.

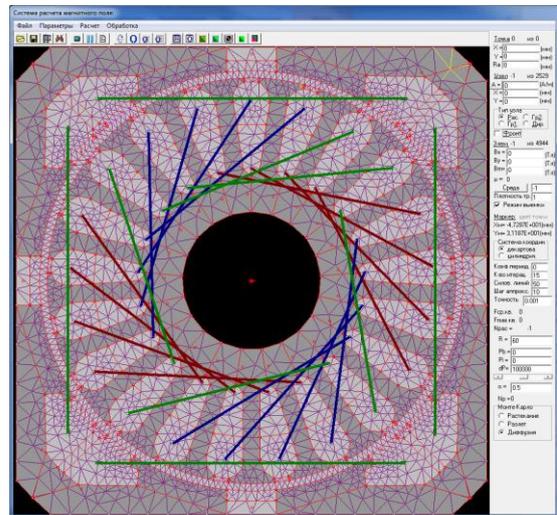


Рис. 8. Конечно-элементная модель магнитного поля ДПТ нетрадиционной конструкции

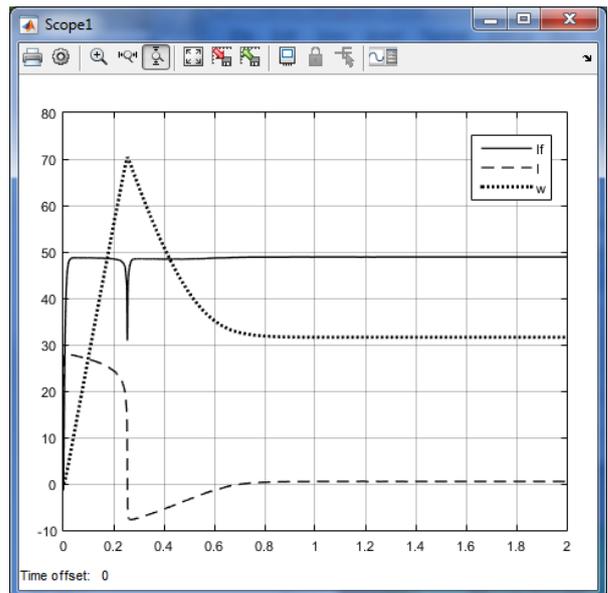


Рис. 9. Кривые разгона ДПТ нетрадиционной конструкции

Выводы. Рассмотренная технология моделирования динамических режимов электромеханических устройств позволяет совместить быстродействие цепных моделей с точностью и универсальностью полевых моделей, учесть нетрадиционные особенности конструкции электрической машины, что возможно в настоящее время только при использовании САЕ-систем, в которых время интегрирования может измеряться часами. В то же время быстродействие описанной полевой динамической модели сопоставимо с временем расчета традиционных упрощенных моделей. Так как

полевая динамическая модель реализована средствами пакета MatLab Simulink, то она может быть использована при моделировании систем управления электроприводами. Описанная технология может быть реализована на базе любого открытого имитационного пакета.

Список литературы

1. **Дьяконов В.П.** MatLab 6/5 SP1 / 7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. Серия «Библиотека профессионала». – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с.
2. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
3. **Клявин А.** ANSYS, Inc.: современные методы моделирования электромагнитного поля // САПР и графика. – 2011. – Вып. 6. – С. 52–55.
4. **Жуков С.В., Караулов В.Н.** Полевые расчеты гибридного шагового двигателя методом конечных элементов в ANSYS Maxwell: материалы X Междунар. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия – 2015». Т. 4 / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2015. – С. 64–68.
5. **EICut.** Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов: руководство пользователя. Версия 6.2. – СПб.: ООО «Тор», 2016. – 292 с.
6. **Балагуров И.А., Казаков Ю.Б.** Расчет и анализ электромагнитных сил в торцевом вентильном двигателе: материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия – 2014». Т. 4 / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2015. – С. 122–124.
7. **Свид.** 2011614852 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Платформенезависимая библиотека конечно-элементного моделирования магнитного поля / А.И. Тихонов, Л.Н. Булатов; заяв. № 2011613040; приоритет от 28.04.2011; зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 22.06.2011. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2011.
8. **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.
9. **Иванов-Смоленский А.В., Кузнецов В.А., Хвостов В.А.** Применение метода проводимостей зубцовых контуров к расчету магнитного поля и потягосцепления насыщенной электрической машины с учетом двусторонней зубчатости сердечников // Изв. вузов. Электромеханика. – 1977. – № 7. – С. 771–783.
10. **Булатов Л.Н., Тихонов А.И.** Разработка динамической модели асинхронной машины с использованием результатов конечно-элементного расчета // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 4. – С. 32–34.

References

1. Dyakonov, V.P. *MatLab 6/5 SP1 / 7 + Simulink 5/6 v matematike i modelirovanii. Seriya «Biblioteka professionala»* [MatLab 6/5 SP1 / 7 + Simulink 5/6 in mathematics and model-

ing. A series of «Library professionals»]. Moscow, SOLON-Press, 2005. 576 p.

2. Chernykh, I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MatLab, Sim Power Systems i Simulink* [Simulation of electrical devices in MatLab, Sim Power Systems and Simulink]. Moscow, DMK Press; Saint-Petersburg, Piter, 2008. 288 p.

3. Klyavin, A. ANSYS, Inc.: *sovremennyye metody modelirovaniya elektromagnitnogo polya* [ANSYS, Inc.: Modern methods of electromagnetic field modeling]. *SAPR i grafika*, 2011, issue 6, pp. 52–55.

4. Zhukov, S.V., Karaulov, V.N. *Polevye raschety gibridnogo shagovogo dvigatelya metodom konechnykh elementov v ANSYS Maxwell* [Field calculations of hybrid stepper motor by the finite element method in ANSYS Maxwell]. *Materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh «Energiya – 2015»* [Proceedings of the Xth International scientific and engineering conference of students, postgraduate students and young scientists «Energy – 2015»]. Ivanovo, 2015, vol. 4, pp. 64–68.

5. **EICut.** *Modelirovanie elektromagnitnykh, teplovykh i uprugikh poley metodom konechnykh elementov: rukovodstvo pol'zovatelya. Versiya 6.2* [EICut. Simulation of electromagnetic, thermal and elastic fields by the finite element method: a user manual. Version 6.2]. Saint-Petersburg, ООО «Тор», 2016. 292 p.

6. Balagurov, I.A., Kazakov, Yu.B. *Raschet i analiz elektromagnitnykh sil v tortsevom ventilynom dvigatele* [Calculation and analysis of electromagnetic forces in the end valve motor]. *Materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh «Energiya – 2014»* [Proceedings of the IXth International scientific and engineering conference of students, postgraduate students and young scientists «Energy – 2014»]. Ivanovo, 2015, vol. 4, pp. 122–124.

7. Tikhonov, A.I., Bulatov, L.N. *Platformenezavisimaya biblioteka konechno-elementnogo modelirovaniya magnitnogo polya* [Platform-independent library of finite element modeling of magnetic field]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2011614852* [Certificate of computer program state registration No. 2011614852]. Moscow, Federal'naya sluzhba po intellektual'noy sobstvennosti, patentam i tovarnym znakam, 2011.

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

9. Ivanov-Smolensky, A.V., Kuznetsov, V.A., Khvostov, V.A. *Primenenie metoda provodimostey zubtsovykh konturov k raschetu magnitnogo polya i potokostsepleniya nasyshchennoy elektricheskoy mashiny s uchedom dvustoronney zubchatosti serdechnikov* [Application of the tooth contours conductivities method to the calculation of magnetic field and flux linkage of the saturated electric machine based on bilateral jagged cores]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 1977, no. 7, pp. 771–783.

10. Bulatov, L.N., Tikhonov, A.I. *Razrabotka dinamicheskoy modeli asinkhronnoy mashiny s ispol'zovaniem rezul'tatov konechno-elementnogo rascheta* [Development of a dynamic model of induction machine using the results of finite element calculation]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 4, pp. 32–34.

Тихонов Андрей Ильич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой физики,
e-mail: ait@dsn.ru

Tikhonov Andrei Ilyich,

Ivanovo State Power Engineering University,
Doctor of Engineering, Professor, Head of Physics Department,
e-mail: ait@dsn.ru

Гусенков Алексей Васильевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени Ленина»,
кандидат, доцент, проректор по учебной работе,
e-mail: avgus@ispu.ru

Gusenkov Aleksei Vasilyevich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering, Associate Professor, Vice-President for Academics,
e-mail: avgus@ispu.ru

Тамьярова Майя Владиславовна,
филиал ФГБОУВО «Самарский государственный технический университет»,
старший преподаватель,
e-mail: stprepod@mail.ru

Tamyarova Maiya Vladislavovna,
Branch of Samara State Technical University,
Assistant Professor,
e-mail: stprepod@mail.ru

Подобный Александр Владимирович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени Ленина»,
магистрант,
e-mail: aleksandr.rash@mail.ru

Podobny Aleksandr Vladimirovich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Master Course Student,
e-mail: aleksandr.rash@mail.ru