

УДК 621.321

Разработка автономной библиотеки моделирования электрических цепей для создания виртуальных лабораторий численного исследования моделей электрических машин¹

А.И. Тихонов, А.В. Стулов, Д.Е. Дрязгов
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация,
E-mail: ait@dsn.ru; alxstl@mail.ru; admin@fizika.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Проблема численного исследования электрических машин в динамических режимах решается в настоящее время либо с использованием неточных цепных моделей, которые не учитывают особенности конструкции машины и нелинейность ее характеристик, либо с использованием точных полевых моделей, требующих значительных компьютерных ресурсов. Наибольшие перспективы в этом плане имеют комбинированные методы, основанные на теории цепей, параметры которых пересчитываются на каждом шаге интегрирования по времени с использованием результатов предварительной серии полевых расчетов. Однако при этом возникает проблема внедрения таких моделей в современные системы имитации численного эксперимента.

Материалы и методы: Для формирования модели электрической цепи использован метод переменных состояния. Программная реализация алгоритмов формирования и решения системы уравнений, описывающих динамику электрической цепи, осуществлена с использованием математического процессора MatLab. Для построения комбинированной модели электропривода использована ранее разработанная и многократно апробированная библиотека конечно-элементного моделирования магнитного поля EMLib.

Результаты: Обоснована необходимость разработки автономной библиотеки моделирования электрических цепей. Разработан универсальный алгоритм обработки матриц исходных данных и построения систем алгебраических и обыкновенных дифференциальных уравнений электрической цепи в соответствии с методом переменных состояния, а также алгоритм решения данных систем, обеспечивающий эффект имитации эксперимента. Приведены результаты использования данной библиотеки при разработке 2D- и 3D-версии виртуальной лаборатории численного исследования динамических моделей электрических машин.

Выводы: Разработанная автономная библиотека моделирования электрических цепей может быть использована при создании виртуальных лабораторий-тренажеров, позволяющих в режиме имитации эксперимента исследовать динамические и статические свойства электрических машин произвольной конструкции, что может быть полезно при проектировании электрических машин и электроприводов, а также в учебном процессе.

Ключевые слова: модель электрической цепи, метод переменных состояния, виртуальный тренажер, автономная библиотека моделирования цепей.

Development of an autonomous library of electrical circuit simulation for designing virtual laboratories of numerical analysis of electric machine models

A.I. Tikhonov, A.V. Stulov, D.E. Dryazgov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: komned37@yandex.ru, ait@dsn.ru

Abstract

Background: The problem of numerical investigation of electrical machines in dynamic modes is now solved either by using imprecise chain models that do not take into account the machine design and the non-linearity of its characteristics or by using precise field models that require significant computing resources. The most promising methods in this regard are combined methods based on circuit theory, the parameters of which are recalculated at each integration step using the results of the preliminary field calculations series. However, there is a problem of implementation of such models in modern numerical experiment simulation systems.

Materials and methods: The electric circuit model is formed by the state variables method. The algorithms of forming and solving the system of equations describing the circuit dynamics are implemented in the mathematical processor MatLab. The electric drive combined model is constructed by using the finite-element magnetic field modeling library EMLib developed and repeatedly tested earlier.

Results: The necessity to develop an autonomous electric circuit simulation library has been justified. A universal algorithm has been developed for processing raw data matrices and constructing systems of algebraical and ordinary differential equations of electric circuits in accordance with the state variables method and the algorithm for solving these systems, ensuring the experiment simulation effect. The results of using this library to develop 2D- and 3D-versions of the virtual laboratory of numerical study of electric machine dynamic models have been presented.

¹ Работа выполнена по контракту № 2.G25.31.0049 Минобрнауки РФ.

Conclusions: The developed autonomous library of electric circuit simulation can be used to create virtual laboratories-simulators that allow studying dynamic and static properties of electrical machines of any design in experiment simulation mode, which may be useful in the design of electric machines and electric drives, and in the learning process.

Key words: electric circuit model, state variables method, virtual simulator, autonomous circuit simulation library.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.1.034-039

Проблема организации виртуального эксперимента может быть решена с использованием современных имитационных систем, например Simulink. Однако подобные системы не являются тренажерами, позволяющими провести эксперимент с максимальным приближением к реальности. Кроме того, предлагаемые в данных системах модели электротехнических устройств оказываются упрощенными, что не отвечает современным требованиям. В частности, модель машины переменного тока, реализованная в среде Simulink, построена на множестве ограничений, не учитывающих особенности конструкции машины и нелинейность ее характеристик. Поэтому проектировщики электрических машин и электроприводов вынуждены самостоятельно разрабатывать более совершенные модели электрических машин [1, 2]. Но и эти модели, как правило, не способны учесть особенности конструкции машины, что приводит к необходимости решать задачи моделирования динамики электрических машин в полевой постановке [3, 4]. При этом полевые модели не могут использоваться при проектировании электроприводов ввиду недопустимо большого времени расчета.

Для решения подобных задач в настоящее время находит применение комбинированный подход с разделением расчетов по времени: сначала реализуется серия расчетов магнитного поля, аппроксимация которой используется для расчета электрической цепи [5, 6]. Это позволяет существенно сократить время расчета. Но подобные расчеты пока еще не вышли за рамки научных разработок.

Существует и другой подход к моделированию, который опирается на использование виртуальных имитаторов, реализованных в форме тренажеров [7]. В данную систему также можно внедрить алгоритм расчета электрической машины, основанный на комбинации цепной и полевой моделей. Однако любая система такого рода оказывается закрытой.

Поэтому были поставлены следующие задачи:

1) выделить из виртуального лабораторного стенда [7] математическое ядро, придав ему форму автономной библиотеки, которая может быть внедрена в любое открытое или разрабатываемое приложение, адаптируя его к проблемам моделирования электрических цепей в реальном времени;

- 2) разработать приложения, максимально использующие возможности библиотеки моделирования электрических цепей;
- 3) разработать виртуальную лабораторию, позволяющую имитировать исследование электроприводов.

Разработанная библиотека получила название ECLib (Electric Circuit Library).

Алгоритм работы библиотеки ECLib строится на методе переменных состояния (смешанных величин) [8, 9, 10] и реализуется в ходе следующих операций:

1. На основе схемы электрической цепи строится расчетный граф, каждая ветвь которого соответствует одному из пяти типов элементов: сопротивление (R), емкость (C), индуктивность (L), источник тока (I) и источник ЭДС (E). Ветви R , L , I называются z -ветвями, а ветви C , E – y -ветвями.

2. По графу строится матрица соединений \mathbf{A} размера $q \times p$, матрица номиналов \mathbf{V} размера $p \times p$ и вектор типов элементов \mathbf{T} размера $p \times 1$. Здесь q – количество узлов графа; p – количество ветвей. При отсутствии взаимных индуктивностей и взаимных емкостей матрица \mathbf{V} имеет диагональную структуру. При наличии взаимных индуктивностей и взаимных емкостей в матрице \mathbf{V} появляются ненулевые недиагональные элементы. Все номиналы индуктивностей и взаимных индуктивностей, а также емкостей и взаимных емкостей в матрице \mathbf{V} умножаются на мнимую единицу, что позволяет избежать суммирования номиналов разной природы при формировании системы уравнений электрической цепи.

3. Осуществляется перестановка столбцов и строк в матрицах \mathbf{A} , \mathbf{V} , \mathbf{T} в целях придания матрице \mathbf{A} блочной структуры вида

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_2 & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{A}_{N_c} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где \mathbf{A}_k – матрица соединений k -й автономной цепи; $\mathbf{0}$ – матрица, заполненная нулями; N_c – количество автономных цепей. При наличии взаимных индуктивностей или взаимных емкостей в подматрицах $\mathbf{0}$ появляются ненулевые элементы.

4. Осуществляется перестановка столбцов в подматрицах \mathbf{A}_k по типам и номиналам элементов. Сначала нумеруются E -ветви, затем C -ветви, R -ветви, L -ветви и, наконец, I -ветви. При этом E -, C - и R -ветви нумеруются

в порядке убывания значений номиналов, а L - и I -ветви – в порядке возрастания номиналов.

5. Формируется дерево графа для каждой подматрицы A_k . Для этого организуется рекурсивный цикл поиска по ветвям графа, включающий в дерево все ветви, которые не образуют замкнутых контуров.

6. Осуществляется перестановка столбцов в матрицах A_k по результатам формирования деревьев (сначала нумеруются u -ветви дерева, затем u -связи, z -ветви дерева и, наконец, z -связи). При этом каждая подматрица A_k приобретает вид

$$A_k = [A_{y1k} \ A_{y2k} \ A_{z1k} \ A_{z2k}], \quad (2)$$

где A_{y1k} соответствует u -ветвям дерева; A_{y2k} – u -связям; A_{z1k} – z -ветвям дерева; A_{z2k} – z -связям; $y_{1k}, y_{2k}, z_{1k}, z_{2k}$ – количество столбцов в соответствующих матрицах.

7. Удаляются последние строки из каждой подматрицы A_k , в которых хранится избыточная информация.

8. Осуществляется группировка подматриц $A_{y1k}, A_{y2k}, A_{z1k}, A_{z2k}$ в соответствии с глобальной нумерацией ветвей. В результате получаем

$$A = [A_{y1} \ A_{y2} \ A_{z1} \ A_{z2}], \quad (3)$$

где

$$A_{yi} = [A_{yi1} \ A_{yi2} \ \dots \ A_{yiN}]; \quad (4)$$

$$A_{zi} = [A_{zi1} \ A_{zi2} \ \dots \ A_{ziN}];$$

y_1, y_2, z_1, z_2 – количество столбцов в соответствующих матрицах.

9. Формируется матрица типов уравнений, которая имеет вид

$$T = [T_{y1} \ T_{y2} \ T_{z1} \ T_{z2}]^T, \quad (5)$$

где T_{y1} соответствует u -ветвям дерева; T_{y2} – u -связям; T_{z1} – z -ветвям дерева; T_{z2} – z -связям.

10. Осуществляется разложение итоговой матрицы A :

$$A = [A_1 \ A_2], \quad (6)$$

где A_1 имеет размер $m \times m$; A_2 – размер $m \times n$; $m = q - 1$ – количество ветвей деревьев всех автономных цепей; $n = p - (q - 1)$ – количество связей всех автономных цепей.

11. Формируется матрица сечений

$$D = [1 \ D_2], \quad (7)$$

где 1 – единичная матрица размера $m \times m$;

$$D_2 = -A_1^{-1} A_2 \quad (8)$$

размера $m \times n$ характеризует ориентацию токов в связях по отношению к сечениям.

Матрица D_2 имеет вид

$$D_2 = \begin{bmatrix} D_{2yy} & D_{2zy} \\ 0 & D_{2zz} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где D_{2yy} соответствует u -связям, которые пересекаются сечениями, соответствующими u -ветвям дерева ($y_1 \times y_2$); D_{2zy} соответствует

z -связям, которые пересекаются сечениями, соответствующими u -ветвям дерева ($y_1 \times z_2$); D_{2zz} соответствует z -связям, которые пересекаются сечениями, соответствующими z -ветвям дерева ($z_1 \times z_2$).

11. Формируется матрица D_y :

$$D_y = [1 \ D_{2yy}], \quad (10)$$

где D_{2yy} находится из (9); 1 – единичная матрица размера $y_1 \times y_1$.

12. Формируется матрица контуров

$$C = [C_1 \ 1], \quad (11)$$

где 1 – единичная матрица размера $n \times n$; $C_1 = D_2^T$ характеризует ориентацию токов в ветвях дерева по отношению к контурам ($n \times m$).

Матрица C_1 имеет вид

$$C_1 = \begin{bmatrix} C_{1yy} & 0 \\ C_{1zy} & C_{1zz} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где C_{1yy} соответствует u -ветвям дерева, которые входят в состав контуров, построенных от u -связей графа ($y_2 \times y_1$); C_{1zy} соответствует u -ветвям дерева, которые входят в контуры, образованные z -связями ($z_2 \times y_1$); C_{1zz} соответствует z -ветвям дерева, которые входят в контуры, образованные z -связями ($z_2 \times z_1$).

13. Формируется матрица C_z :

$$C_z = [C_{1zz} \ 1], \quad (13)$$

где C_{1zz} находится из (12); 1 – единичная матрица размера $z_2 \times z_2$.

14. Формируются матрица проводимостей u -ветвей дерева графа Y_y размера $y_1 + y_2 \times y_1 + y_2$ и матрица сопротивлений z -ветвей графа Z_z размера $z_1 + z_2 \times z_1 + z_2$. Данные матрицы входят в качестве подматриц в матрицу номиналов V , которая после ряда перестановок столбцов и строк имеет вид

$$V = \begin{bmatrix} Y_y & 0 \\ 0 & Z_z \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Номиналы могут иметь неизменное значение или пересчитываться на каждой итерации по заданному алгоритму, в частности, в функции времени или интегрируемых величин.

15. Формируется общая система уравнений, которая имеет вид

$$GX = 0, \quad (15)$$

где G – матрица коэффициентов размера $N \times N$; X – вектор неизвестных величин размера $N \times 1$.

Матрица коэффициентов имеет вид

$$G = \begin{bmatrix} D_y Y_y D_y^T & D_{2zy} \\ C_{1zy} & C_z Z_z C_z^T \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где D_y находится из (10); D_{2zy} находится из (9); C_{1zy} находится из (12); C_z находится из (13); Y_y и Z_z находятся из (14).

Матрица G имеет структуру

$$G = [G_E \ G_C \ G_R \ G_L \ G_I]^T, \quad (17)$$

где \mathbf{G}_E соответствует уравнениям для ветвей с источниками ЭДС ($n_E \times N$); \mathbf{G}_C – для ветвей с емкостями ($n_C \times N$); \mathbf{G}_R – для ветвей с сопротивлениями ($n_R \times N$); \mathbf{G}_L – для ветвей с индуктивностями ($n_L \times N$); \mathbf{G}_I – для ветвей с источниками тока ($n_I \times N$); n_E, n_C, n_R, n_L, n_I – количество уравнений соответственно для ветвей с источниками ЭДС, емкостями, сопротивлениями, индуктивностями и источниками тока.

16. Вектор искоемых величин имеет вид

$$\mathbf{X} = [\mathbf{U}_E \quad \mathbf{U}_C \quad \mathbf{I}_R \quad \mathbf{I}_L \quad \mathbf{I}_I]^T, \quad (18)$$

где \mathbf{U}_C – вектор напряжений на источниках ЭДС, содержащий n_E элементов по числу источников ЭДС; \mathbf{U}_C – вектор напряжений на емкостях с числом элементов $n_C = Y - n_E$ по числу емкостей, вошедших в дерево графа; \mathbf{I}_R – вектор токов в сопротивлениях размера n_R по числу сопротивлений, вошедших в число связей графа; \mathbf{I}_L – вектор токов в индуктивностях размера $n_L = Z_2 - n_R - n_I$ по числу индуктивностей, вошедших в число связей графа; \mathbf{I}_I – вектор токов в источниках тока размера n_I по числу источников тока.

17. Изначально заданными оказываются элементы векторов \mathbf{U}_E и \mathbf{I}_I :

$$U_{Ei} = V_{ij} |_{i=1 \div n_E}, \quad (19)$$

$$I_i = V_{jj} |_{\substack{j=1 \div n_I \\ j=N-n_I+i}}. \quad (20)$$

18. Так как матрица \mathbf{G}_C имеет структуру

$$\mathbf{G}_C = [\mathbf{G}_{CE} \quad \mathbf{G}_{CC} \quad \mathbf{G}_{CR} \quad \mathbf{G}_{CL} \quad \mathbf{G}_{CI}], \quad (21)$$

то система дифференциальных уравнений для ветвей с емкостями имеет вид

$$\frac{d}{dt} \mathbf{U}_C = [\text{Im}(\mathbf{G}_{CC})]^{-1} \begin{pmatrix} -\mathbf{G}_{CE} \mathbf{U}_E - [\text{Re}(\mathbf{G}_{CC})] \mathbf{U}_C - \\ -\mathbf{G}_{CR} \mathbf{I}_R - [\text{Re}(\mathbf{G}_{CL})] \mathbf{I}_L - \mathbf{G}_{CI} \mathbf{I}_I \end{pmatrix}, \quad (22)$$

где Im – функция, возвращающая мнимые части элементов матриц; Re – функция, возвращающая вещественные части элементов матриц; матрица \mathbf{G}_{CC} имеет размер $n_C \times n_C$; матрица $\mathbf{G}_{CE} - n_C \times n_E$; матрица $\mathbf{G}_{CR} - n_C \times n_R$; матрица $\mathbf{G}_{CL} - n_C \times n_L$; матрица $\mathbf{G}_{CI} - n_C \times n_I$; элементы векторов $\mathbf{U}_E, \mathbf{U}_C, \mathbf{I}_R, \mathbf{I}_L, \mathbf{I}_I$ численно равны значениям, рассчитанным на предыдущей итерации интегрирования.

18. Так как матрица \mathbf{G}_L имеет структуру

$$\mathbf{G}_L = [\mathbf{G}_{LE} \quad \mathbf{G}_{LC} \quad \mathbf{G}_{LR} \quad \mathbf{G}_{LL} \quad \mathbf{G}_{LI}],$$

то система дифференциальных уравнений для ветвей с индуктивностями имеет вид

$$\frac{d}{dt} \mathbf{I}_L = [\text{Im}(\mathbf{G}_{LL})]^{-1} \begin{pmatrix} -\mathbf{G}_{LE} \mathbf{U}_E - [\text{Re}(\mathbf{G}_{LC})] \mathbf{U}_C - \\ -\mathbf{G}_{LR} \mathbf{I}_R - [\text{Re}(\mathbf{G}_{LL})] \mathbf{I}_L - \mathbf{G}_{LI} \mathbf{I}_I \end{pmatrix}, \quad (23)$$

где матрица \mathbf{G}_{LL} имеет размер $n_L \times n_L$; матрица $\mathbf{G}_{LE} - n_L \times n_E$; матрица $\mathbf{G}_{LC} - n_L \times n_C$; матрица $\mathbf{G}_{LR} - n_L \times n_R$; матрица $\mathbf{G}_{LI} - n_L \times n_I$; элементы векторов $\mathbf{U}_E, \mathbf{U}_C, \mathbf{I}_R, \mathbf{I}_L, \mathbf{I}_I$ численно равны значениям, рассчитанным на предыдущей итерации интегрирования.

19. Так как матрица \mathbf{G}_R имеет структуру

$$\mathbf{G}_R = [\mathbf{G}_{RE} \quad \mathbf{G}_{RC} \quad \mathbf{G}_{RR} \quad \mathbf{G}_{RL} \quad \mathbf{G}_{RI}], \quad (24)$$

то система алгебраических уравнений для ветвей с сопротивлениями имеет вид

$$\mathbf{G}_{RR} \mathbf{I}_R = -\mathbf{G}_{RE} \mathbf{U}_E - \mathbf{G}_{RC} \frac{d}{dt} \mathbf{U}_C - \mathbf{G}_{RL} \frac{d}{dt} \mathbf{I}_L - \mathbf{G}_{RI} \mathbf{I}_I, \quad (25)$$

где матрица \mathbf{G}_{RR} имеет размер $n_R \times n_R$; матрица $\mathbf{G}_{RE} - n_R \times n_E$; матрица $\mathbf{G}_{RC} - n_L \times n_C$; матрица $\mathbf{G}_{RL} - n_R \times n_L$; матрица $\mathbf{G}_{RI} - n_R \times n_I$; элементы векторов $\mathbf{U}_E, \mathbf{I}_I$ численно равны значениям, рассчитанным на предыдущей итерации интегрирования; элементы векторов $\frac{d}{dt} \mathbf{U}_C, \frac{d}{dt} \mathbf{I}_L$ численно равны значениям, рассчитанным на текущей итерации интегрирования соответственно по (22) и (23).

20. Системы уравнений (22) и (23) решаются методом Эйлера или Рунге-Кутты с постоянным шагом интегрирования dt . После расчета вектора неизвестных \mathbf{X} для t -й итерации результаты распространяются на всю электрическую цепь, то есть рассчитываются токи во всех ветвях и потенциалы во всех узлах электрической цепи.

Далее процесс интегрирования циклично повторяется с п. 14.

На основе математического аппарата библиотеки ECLib, в частности, была разработана версия виртуального лабораторного стенда, позволяющего исследовать электрические машины в динамике (рис. 1). В отличие от [7], данный стенд обладает большей гибкостью в плане внедрения в него моделей электромеханических устройств, основанных на предварительных сериях расчетов магнитного поля. Кроме того, реализованы модели с прямым обращением к конечно-элементной модели магнитного поля, рассчитываемой и визуализируемой в динамике средствами динамически подключаемой библиотеки EMLib (рис. 2).

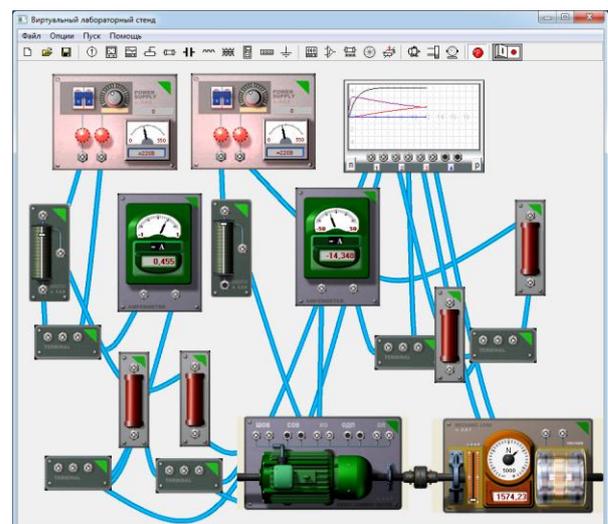


Рис. 1. Виртуальная лаборатория

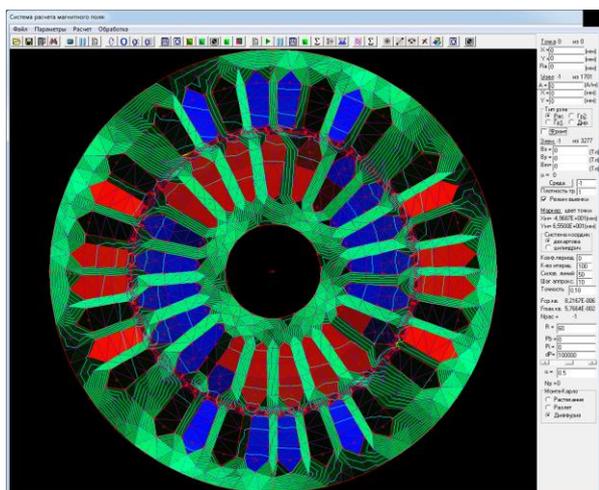


Рис. 2. Полевая модель электрической машины, интегрированная в виртуальную лабораторию

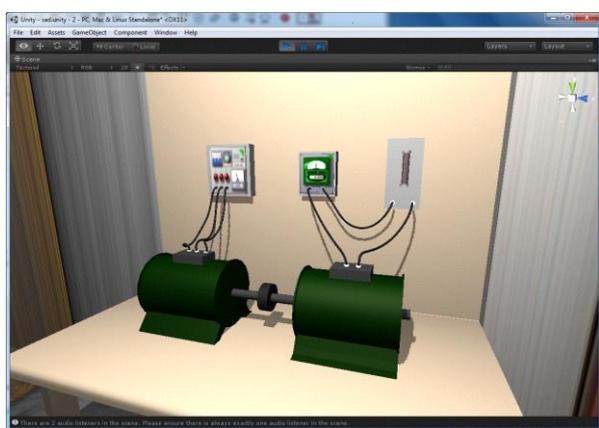


Рис. 3. 3D-версия виртуальной лаборатории

В настоящее время ведется работа по созданию 3D-версии виртуальной лаборатории с использованием инструментария системы Unity (рис. 3).

Заключение

Разработанные алгоритмы версии метода переменных состояния и автономная библиотека моделирования электрических цепей могут быть использованы при создании виртуальных лабораторий, позволяющих в режиме имитации эксперимента исследовать динамические и статические свойства электрических машин, имеющих нетрадиционные особенности конструкции.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании электрических машин и электроприводов, а также в предпроектных исследованиях. Кроме того, созданный в ходе работы виртуальный лабораторный стенд может использоваться в учебном процессе для имитации лабораторных работ.

Список литературы

1. Ещин Е.К. Электромеханические системы многодвигательных электроприводов. Моделирование и управление. – Кемерово: Кузбасский гос. техн. ун-т, 2003. – 247 с.
2. Ansari A.A., Deshpande D.M. Mathematical Model of Asynchronous Machine in MATLAB Simulink // International Journal of Engineering Science and Technology. – 2010. – Vol. 2(5). – P. 1260–1267.
3. Казаков Ю.Б., Палилов И.А. Исследование взаимосвязанных электромеханических процессов в системе тяговый асинхронный двигатель – асинхронный генератор с общим валом на основе полевых моделей // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 2. – С. 42–46.
4. Казаков Ю.Б., Швецов Н.К. Моделирование энергоэффективности тягового асинхронного двигателя при питании от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией напряжения // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 3. – С. 23–27.
5. 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.
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. Использование виртуального лабораторного стенда в качестве подсистемы расширенного поверочного расчета в функциональном проектировании электромеханических устройств / А.И. Тихонов, С.Ю. Кучеров, И.М. Лашманов, Д.В. Рубцов // Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. 3. – С. 11–14.
8. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – Т. 1. – 536 с.
9. Чуа Л.О., Лин Пен-Мин. Машинный анализ электронных схем: алгоритмы и вычислительные методы: пер. с англ. – М.: Энергия, 1980. – 640 с.
10. Мартынов В.А., Голубев А.Н., Алейников А.В. Применение метода переменных состояния к анализу стационарных и динамических режимов нелинейных электромагнитных устройств // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 4. – С. 27–32.

References

1. Eshchin, E.K. *Elektromekhanicheskie sistemy mnogodvigatel'nykh elektroprivodov. Modelirovanie i upravlenie* [Electromechanical systems of multi-engine electric drives]. Kemerovo, Kuzbasskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2003. 247 p.
2. Ansari, A.A., Deshpande, D.M. Mathematical Model of Asynchronous Machine in MATLAB Simulink. International Journal of Engineering Science and Technology, 2010, vol. 2(5), pp. 1260–1267.
3. Kazakov, Yu.B., Palilov, I.A. Issledovanie vzaimosvyazannykh elektromekhanicheskikh protsessov v sisteme tyagovyy asinkhronnyy dvigatel' – asinkhronnyy generator s obshchim valom na osnove polevykh modeley [A field-model-based study of inter-related electromechanical processes in the system of traction induction drive-induction generator with a common shaft]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 2, pp. 42–46.
4. Kazakov, Yu.B., Shvetsov, N.K. Modelirovanie energoeffektivnosti tyagovogo asinkhronnogo dvigatelya pri pitanii ot preobrazovatelya lection s shirotno-impul'snoy modul'yatsiey napryazheniya [Modelling of energy-efficiency of the traction induction drive fed from a PWM-controlled frequency converter]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 3, pp. 23–27.
5. 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 an induction machine by using the results of finite-element calculation]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 4, pp. 32–34.

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

7. Tikhonov, A.I., Kucherov, S.Yu., Lashmanov, I.M., Rubtsov, D.V. Ispol'zovanie virtual'nogo laboratornogo stenda v kachestve podsistemy rasshirenogo poverochnogo rascheta v funktsional'nom proektirovanii elektromekhanicheskikh ustroystv [Using a virtual laboratory bench as a subsystem of extended confirmatory analysis in the functional design of electromechanical devices]. *Vestnik IGEU*, 2008, issue 3, pp. 11–14.

Тихонов Андрей Ильич,

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

Стулов Алексей Вадимович,

ЗАО «Трансформер»,
зам. директора по общим вопросам,
e-mail: alxstl@mail.ru

Дрязгов Дмитрий Евгеньевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
студент
e-mail: admin@fizika.ispu.ru

8. Neyman, L.R., Demirchan, K.S. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theory of electrical engineering]. Leningrad, Energoatomizdat. Leningradskoe otdelenie, 1981, vol. 1. 536 p.

9. Chua, L.O., Lin, Pen-Min. *Mashinnyy analiz elektronnykh skhem: algoritmy i vychislitel'nye metody* [Computer analysis of electronic systems: algorithms and calculation methods]. Moscow, Energiya, 1980. 640 p.

10. Martynov, V.A., Golubev, A.N., Aleynikov, A.V. *Primenenie metoda peremennykh sostoyaniya k analizu stationarnykh i dinamicheskikh rezhimov nelineynykh elektromagnitnykh ustroystv* [Using of the states variables method to analyse stationary and dynamic modes of nonlinear electromagnetic devices]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 4, pp. 27–32.