УДК 004.94

**М. Г. Персова** [1], **Ю. Г. Соловейчик** [2], **М. В. Абрамов** [3]
**Д. В. Вагин** [4], **П. А. Домников** [5]

Новосибирский государственный технический университет
пр. К. Маркса, 20, Новосибирск, 630092, Россия
E-mail: [1] persova@fpm.ami.nstu.ru; [2] solov@fpm.ami.nstu.ru
[3] mike_abramov@inbox.ru; [4] vdv_wk@mail.ru; [5] p_domnikov@mail.ru

# ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ И В ЗАДАЧАХ ГЕОЭЛЕКТРИКИ *

Работа посвящена разработке программных комплексов конечно-элементного моделирования электромагнитных полей, ориентированных на пользователей, являющихся специалистами в таких отраслях, как электроразведка, электромеханика, ядерная физика. Основными отличительными особенностями предлагаемых программных комплексов являются автоматизация построения конечно-элементной сетки, формируемой с учетом особенности структуры расчетной области и обеспечивающей необходимую точность решения для рассматриваемого класса задач, а также использование специальных математических постановок, основанных на выделении поля меньшей размерности с учетом специфики решаемой задачи и позволяющих существенно сокращать вычислительные затраты при решении трехмерных задач с требуемым уровнем точности. Приводится краткое описание программных комплексов и возможности их использования при решении задач трехмерной интерпретации данных электроразведки, при решении задач моделирования трехмерных нелинейных магнитных полей в асинхронных электродвигателях и циклотронах со спиралеобразными шиммами, а также при решении задач моделирования электродинамических процессов в асинхронных электродвигателях с частотным управлением.

*Ключевые слова:* компьютерное моделирование, метод конечных элементов.

## Введение

Данная работа посвящена разработке программных комплексов конечно-элементного моделирования электромагнитных полей, ориентированных на пользователей, являющихся специалистами в таких отраслях, как электроразведка, электромеханика, ядерная физика.

В области электроразведки компьютерное моделирование, в основном, применяется на двух этапах проведения работ: при проектировании полевых работ с целью определения диапазона измерений и построения оптимальных систем наблюдения и при восстановлении структуры проводимости исследуемой площади по экспериментальным данным. В области электромеханики и ядерной физики компьютерное моделирование применяется непосредственно для проектирования и оптимизации конструкций соответствующих электротехнических устройств. Кроме того, численное моделирование может применяться при проектировании систем управления электрическими машинами, что позволяет, например, заменить натурный (экспериментальный) образец соответствующей компьютерной моделью.

При этом главными факторами востребованности конечно-элементного моделирования в соответствующем производственном процессе являются, во-первых, точность и быстрота

* Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России» на 2007–2013 гг., ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. и гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – докторов наук (№ гранта МД-1925.2011.5).


© М. Г. Персова, Ю. Г. Соловейчик, М. В. Абрамов, Д. В. Вагин, П. А. Домников, 2012

расчета, а во-вторых, и это является не менее важным, удобство пользования соответствующими программами.

При использовании универсальных конечно-элементных пакетов проблемы построения конечно-элементной сетки и оценка точности численного моделирования, как правило, целиком ложатся на пользователя, что делает соответствующие расчеты не только слишком трудозатратными, но и не гарантирующими точность получаемых характеристик электромагнитного поля. Кроме того, трехмерное моделирование является очень вычислительно затратной задачей, и для использования его в реальном производстве требуется разработка специальных подходов, основанных, например, на выделении поля меньшей размерности с учетом специфики решаемой задачи и позволяющих существенно снизить вычислительные затраты при сохранении высокой точности решения.

Таким образом, построение сеток, требующее определенных навыков и времени, контроль точности решения, а также отсутствие специальных постановок, ориентированных на конкретные задачи, и, как следствие, очень большие вычислительные затраты и трудозатраты пользователя – все это делает затруднительным и неэффективным использование универсальных конечно-элементных пакетов для решения трехмерных задач электромагнетизма в реальном производственном процессе.

Поэтому главным при создании программных комплексов конечно-элементного моделирования, ориентированных на производственные задачи, является такой аспект, как автоматизация построения конечно-элементной сетки, формируемой с учетом особенности структуры расчетной области и обеспечивающей необходимую точность решения для рассматриваемого класса задач. Также немаловажным является использование специальных математических постановок, позволяющих существенно сокращать вычислительные затраты при решении трехмерных задач с требуемым уровнем точности.

### Описание программных комплексов и некоторых результатов их применения

Вначале рассмотрим программный комплекс GeoEM конечно-элементного моделирования трехмерных геоэлектромагнитных полей, возбуждаемых естественными и различными контролируемыми источниками.

Программный комплекс GeoEM можно разделить на две основные (но не равноценные) части: графический препроцессор и вычислительные модули. Графический препроцессор включает интерактивное задание геоэлектрической модели в терминах, привычных для геофизика. В нем выполняется задание параметров вмещающей горизонтально-слоистой среды в виде толщин и удельных сопротивлений слоев, параметров трехмерных объектов в форме параллелепипедов и шестигранников с помощью мыши или путем задания шести или двадцати четырех чисел соответственно, типа, размера и расположения источника, и, наконец, системы приемников. Как правило, все работы с контролируемыми источниками предполагают некоторую систему расположения источников (в профильных съемках – вдоль некоторой линии, при площадной – вдоль системы профилей либо несколько положений по площади), поэтому существует возможность задания произвольной траектории расположения приемно-генераторной конструкции, вдоль которой автоматически будет выполнен расчет для всех положений.

Вычислительная часть реализует различные процедуры выполнения расчетов электромагнитных полей и включает модули автоматического построения оптимизированных конечно-элементных сеток, расчетные модули конечно-элементного моделирования и обработки конечно-элементного решения. В целом, программный комплекс GeoEM позволяет решать следующие классы задач:

- расчет трехмерных нестационарных электромагнитных полей с контролируемыми источниками – незаземленная петля (НП), горизонтальная электрическая линия (ГЭЛ), вертикальная электрическая линия (ВЭЛ), круговой электрический диполь (КЭД);
- расчет трехмерных стационарных электрических и магнитных полей для гальванических источников типа ГЭЛ, ВЭЛ, КЭД;

- расчет трехмерных полей вызванной поляризации для гальванических источников типа ГЭЛ, ВЭЛ, КЭД;
- расчет трехмерных полей вызванной поляризации индукционного типа для источников типа НП и ГЭЛ;
- расчет двумерных и трехмерных гармонических полей при решении задач магнитотеллурического зондирования (МТЗ);
- расчет трехмерных гармонических полей для контролируемых источников.

Трехмерные неоднородности могут характеризоваться как изотропной проводимостью, так и анизотропной.

Основная идея, на которой базируется вся вычислительная часть программного комплекса GeoEM и которая позволяет существенно снизить вычислительные затраты при моделировании трехмерных полей, является использование метода разделения искомого поля на нормальную $\vec{A}^n$ и аномальную $\vec{A}^a$ составляющие: $\vec{A} = \vec{A}^n + \vec{A}^a$, где для расчета нормального поля меньшей размерности используются довольно подробные сетки, а для расчета аномального (поля влияния трехмерных объектов) – гораздо более грубые.

Нормальная составляющая моделируемого поля при решении задач электроразведки представляет собой поле источника, помещенного во вмещающую горизонтально-слоистую среду, и может быть получена путем решения одной или нескольких двумерных задач в цилиндрических координатах для различных компонент вектор-потенциала или напряженности магнитного поля в зависимости от типа источника. При этом аномальная составляющая поля при его становлении может быть вычислена с использованием постановок для узлового или для векторного метода конечных элементов вне зависимости от типа источника. От типа источника зависят только способы расчета нормальной составляющей электрического поля и начального трехмерного поля (т. е. поля при включенном постоянном токе).

Например, осесимметричное нестационарное электромагнитное поле от петлевого источника, вызванное круговой генераторной петлей, расположенной в плоскости $z = \text{const}$, является решением следующей краевой задачи

$$-\frac{1}{\mu_0}\Delta A_\varphi^n + \frac{1}{\mu_0 r^2} A_\varphi^n + \sigma^n \frac{\partial A_\varphi^n}{\partial t} = J_\varphi, \quad A_\varphi^n\big|_\Gamma = 0,$$

где $\mu_0$ – магнитная проницаемость вакуума, $\Delta$ – оператор Лапласа в координатах $(r, z)$, $\sigma^n$ – удельная электрическая проводимость вмещающей среды, $J_\varphi$ – ток в генераторной петле.

Аномальная (трехмерная) составляющая нестационарного электромагнитного поля может быть найдена из решения системы уравнений (в случае использования узлового МКЭ)

$$\begin{cases} -\frac{1}{\mu_0}\Delta\vec{A}^a + \sigma\left(\frac{\partial\vec{A}^a}{\partial t} + \operatorname{grad} V^a\right) = (\sigma - \sigma^n)\vec{E}^n, \\ -\operatorname{div}(\sigma \operatorname{grad} V^a) - \operatorname{div}\left(\sigma\frac{\partial\vec{A}^a}{\partial t}\right) = -\operatorname{div}((\sigma - \sigma^n)\vec{E}^n), \end{cases} \tag{1}$$

(при этом магнитная индукция и напряженность аномального электрического поля связаны соотношениями $\vec{B}^a = \operatorname{rot}\vec{A}^a$, $\vec{E}^a = -\frac{\partial\vec{A}^a}{\partial t} - \operatorname{grad} V^a$) или из решения векторного уравнения (в случае использования векторного МКЭ)

$$\frac{1}{\mu_0}\operatorname{rot}\operatorname{rot}\vec{A}^a + \sigma\frac{\partial\vec{A}^a}{\partial t} = (\sigma^n - \sigma)\frac{\partial\vec{A}^n}{\partial t}. \tag{2}$$

При этом $\vec{B}^a = \operatorname{rot}\vec{A}^a$, $\vec{E}^a = -\frac{\partial\vec{A}^a}{\partial t}$. В (1)–(2) $\vec{E}^n = -\frac{\partial\vec{A}^n}{\partial t}$, $\sigma$ – проводимость трехмерной среды.

В задачах магнитотеллурических зондирований нормальное поле (поле во вмещающей горизонтально-слоистой среде) может быть описано с помощью одномерной задачи в декар-

товых координатах для вектор-потенциала $\vec{A}^{1D}(z) = (0, A_y^{1D}(z), 0)$ (если условно принять, что токи направлены вдоль $y$):

$$-\frac{1}{\mu_0}\frac{d^2 A_y^{1D}}{dz^2} + i\omega\sigma A_y^{1D} = J_y . \tag{3}$$

Аномальная составляющая электромагнитного поля при решении гармонических задач может быть найдена из решения системы уравнений (в случае использования узлового МКЭ)

$$\begin{cases} -\frac{1}{\mu_0}\Delta\vec{A}^a + i\sigma(\omega\vec{A}^a + \operatorname{grad} V^a) = (\sigma - \sigma^n)\vec{E}^n, \\ -\operatorname{div}(\sigma \operatorname{grad} V^a) - i\omega \operatorname{div}(\sigma\vec{A}^a) = -\operatorname{div}((\sigma - \sigma^n)\vec{E}^n), \end{cases} \tag{4}$$

или векторного уравнения (в случае использования векторного МКЭ)

$$\frac{1}{\mu_0}\operatorname{rot}\operatorname{rot}\vec{A}^a + i\sigma\omega\vec{A}^a = (\sigma - \sigma^n)\vec{E}^n . \tag{5}$$

В (3)–(5) $i$ – мнимая единица, $\omega$ – круговая частота $\vec{E}^n = -i\omega\vec{A}^n$. В (1) и (4) $\Delta$ – векторный оператор Лапласа.

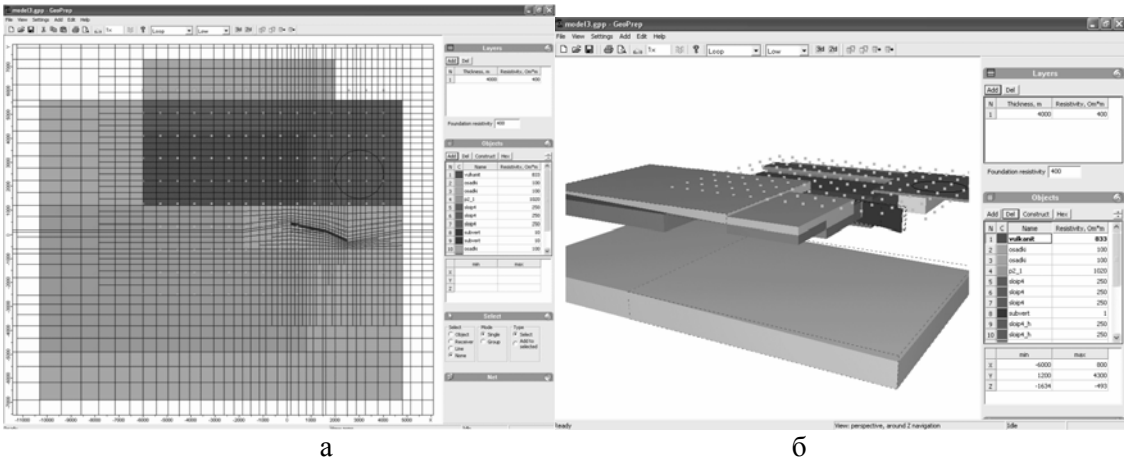
Математический аппарат, на котором основан GeoEM, более подробно описан в работе [1], технологические особенности его реализации представлены в работе [2], а примеры его использования для задач проектирования и интерпретации представлены в работе [3].

Вычислительные процедуры были протестированы путем сравнения с решениями, полученными аналитическими и полуаналитическими методами для однородных и горизонтально-слоистых сред, с решением двойственных задач для сред с осесимметричными объектами, а также сравнением с экспериментальными данными. Кроме того, проводилось сравнение решений, полученных в соответствующих скалярных и в векторных постановках.

На рис. 1 и 2 приведены примеры геоэлектрических моделей, полученных в результате интерпретации данных на рудном месторождении и при решении нефтепоисковой задачи с использованием программного комплекса GeoEM, а также представлены автоматически построенные конечно-элементные сетки.

На рис. 3 приведены измеренные и расчетные данные в различных точках площади, достаточно хорошее совпадение которых говорит об адекватности подобранной структуры проводимости среды на рассматриваемых площадях.

Теперь рассмотрим особенности программных комплексов конечно-элементного моделирования, предназначенных для моделирования трехмерных нелинейных магнитных полей в электротехнических устройствах.



а б

*Рис. 1.* План (*а*) и объемное изображение (*б*) геоэлектрической модели, полученной в результате интерпретации данных на рудном месторождении

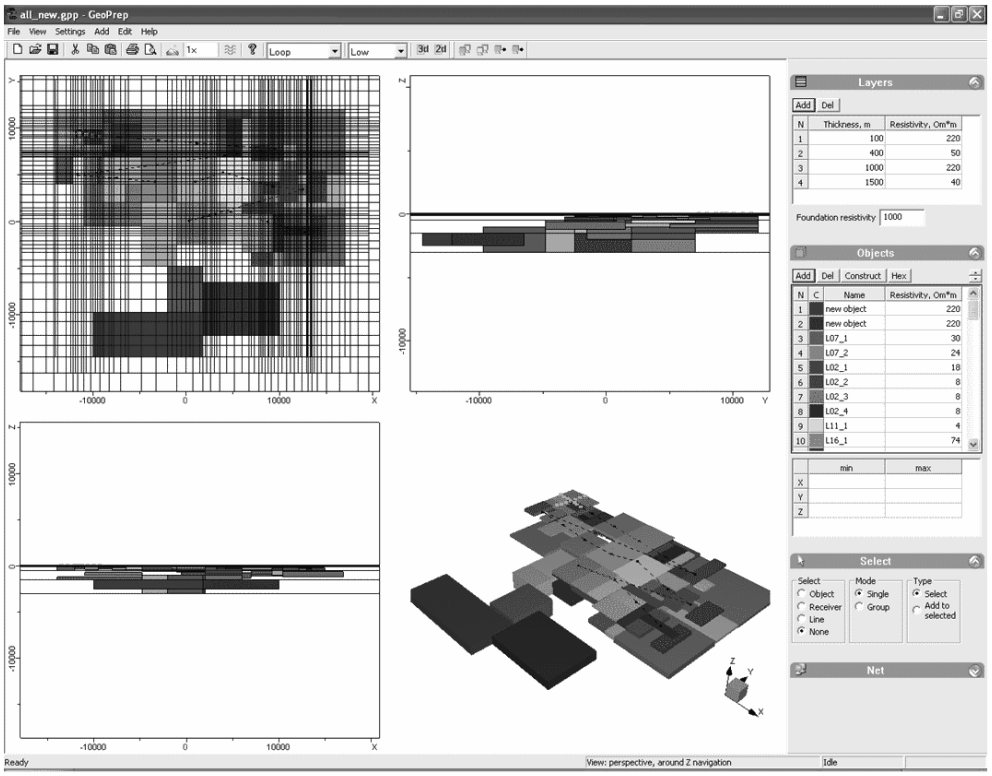



*Рис. 2.* Геоэлектрическая модель, полученная в результате интерпретации данных при решении нефтепоисковой задачи

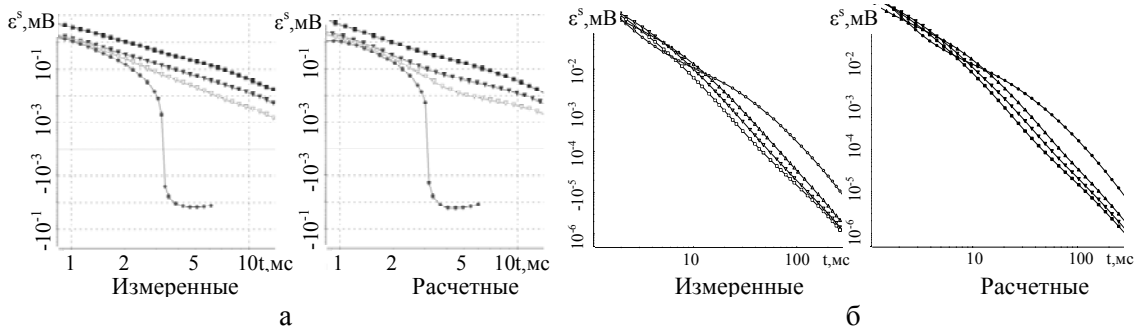



*Рис. 3.* Измеренные и расчетные кривые, полученные для подобранных в результате 3D-интерпретации геоэлектрических моделей, в некоторых точках исследуемых площадей: на рудном месторождении (*а*) и при решении нефтепоисковой задачи (*б*)

При решении задач проектирования электротехнических устройств требуется решение большого количества задач для однотипных конструкций. Поэтому актуальным является создание систем задания конструкций и алгоритмов автоматического построения трехмерных конечно-элементных сеток, предназначенных для моделирования устройств конкретного типа.

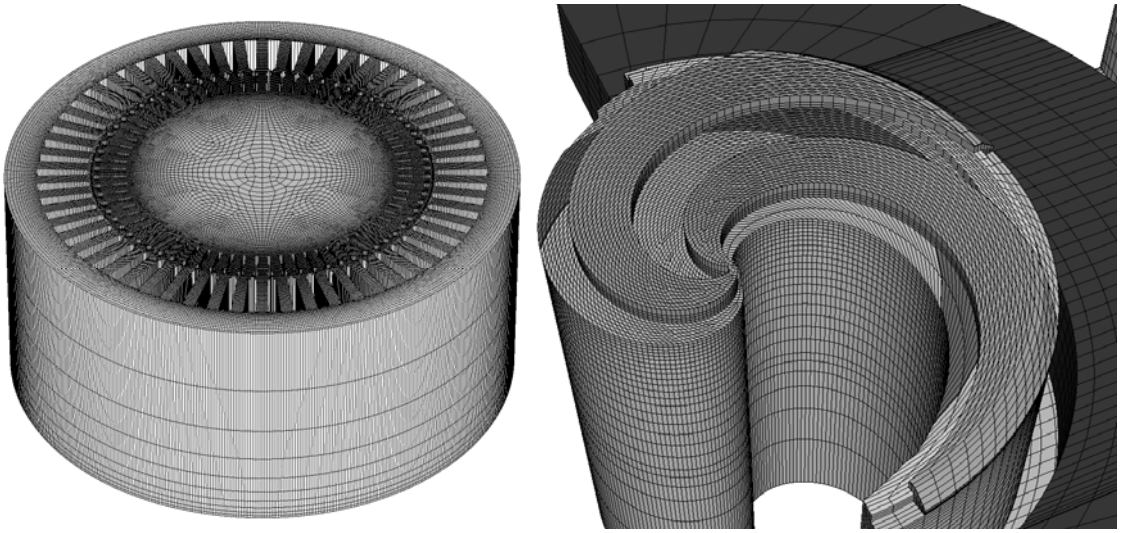
Для конечно-элементного моделирования трехмерных магнитных полей в электродвигателях был использован способ описания конструкции, базирующийся на задании достаточно простого и привычного для электромеханика набора величин и геометрических форм: это радиусы статора, ротора, геометрия пазов ротора и статора, их количество, положение, геометрия и параметры обмоток, высота электрической машины. Геометрия пазов может зада-

ваться пользователем при помощи набора прямолинейных отрезков и дуг окружностей. Затем на основе файла опций, в котором хранятся параметры некоторой размерной функции, программой автоматически генерируется конечно-элементная сетка. Пример такой автоматически сгенерированной сетки с учетом симметрии конструкции приведен на рис. 4, *а*.

Аналогичный по концепции подход может быть использован при задании конструкции и построении сеток для электротехнических устройств других типов. Например, для циклотронов со спиралеобразными шиммами конструкция большей части электромагнита и обмоток может быть задана всего несколькими параметрами. Это параметры цилиндрического полюса электромагнита, параметры и формы ярма электромагнита, параметры кольцевой обмотки. Боковые поверхности спиралеобразных шимм задаются либо аналитически, либо точками, по которым строится сплайн. Пример такой автоматически сгенерированной трехмерной сетки с учетом специальных условий замыкания для конструкции циклотрона со спиралеобразными шиммами показан на рис. 4, *б*.

Как уже говорилось, эффективность трехмерного моделирования (а следовательно, и широта его внедрения в процесс проектирования) существенно зависит от используемых математических постановок, для которых строятся конечно-элементные аппроксимации. Во многих устройствах, к которым относится большинство электродвигателей и некоторые типы циклотронов, магнитное поле имеет достаточно хорошее двумерное приближение, правда различного типа: для электродвигателей магнитное поле, как правило, имеет хорошее двумерное приближение при его расчете в поперечном сечении, а, например, конструкция циклотронов имеет хорошее осесимметричное приближение.

Поэтому так же, как и в рассмотренных выше задачах геоэлектрики, существенного снижения вычислительных затрат при сохранении высокой точности расчета можно добиться за счет использования специальных постановок с выделением поля, которые не реализованы в стандартных конечно-элементных пакетах, предназначенных для моделирования нелинейных магнитных полей в электротехнических устройствах. При этом принципы построения вычислительных схем, основанных на технологии выделения поля, зависят от специфики конструкции электротехнического устройства. Так, двумерная составляющая моделируемого поля ищется из решения задачи для соответствующей компоненты вектор-потенциала, а трехмерная – с использованием метода полного и неполного потенциалов. Технологические особенности реализации этих методов описаны в работе [2].



а б

*Рис. 4.* Примеры автоматически построенных трехмерных конечно-элементных сеток в конструкции электродвигателя (*а*) и в конструкции циклотрона со спиралеобразными шиммами (*б*) с учетом симметрии конструкций

И в заключение приведем основные особенности программного комплекса ELMEC, предназначенного для моделирования электродинамических процессов в электродвигателях, который с высокой степенью адекватности позволяет моделировать работу двигателя в различных режимах и под различными нагрузками и поэтому может быть использован не только для проектирования и оптимизации конструкции электродвигателей, но и, что зачастую является более важным, для проектирования систем управления электрическими машинами.

В основе программного комплекса ELMEC лежит так называемая квазитрехмерная постановка [4], которая базируется на совместном решении нелинейного нестационарного двумерного дифференциального уравнения для вектор-потенциала магнитного поля и системы уравнений, полученных из закона Кирхгофа и являющихся интегральными относительно вектор-потенциала и алгебраическими относительно определенного набора значений электрического потенциала:

$$-\operatorname{div}\left(\frac{1}{\mu(B)}\operatorname{grad} A_z\right)=\sigma E_z; \qquad (6)$$

$$\frac{1}{n_b l_b}\left(-V_{j-1}+2V_j-V_{j+1}\right)-\frac{l}{l_b S^{\text{об}}}Q_{j-1}+\frac{l}{l_b S^{\text{об}}}Q_j=0,$$

$$j=1...N^{\text{ф}}N^{\text{в}}\left(N^{\text{об}}-1\right),\ j\neq mN^{\text{об}} \text{ и } j\neq\left(m-1\right)N^{\text{об}}+1,\ m=1...N^{\text{ф}}N^{\text{в}};$$

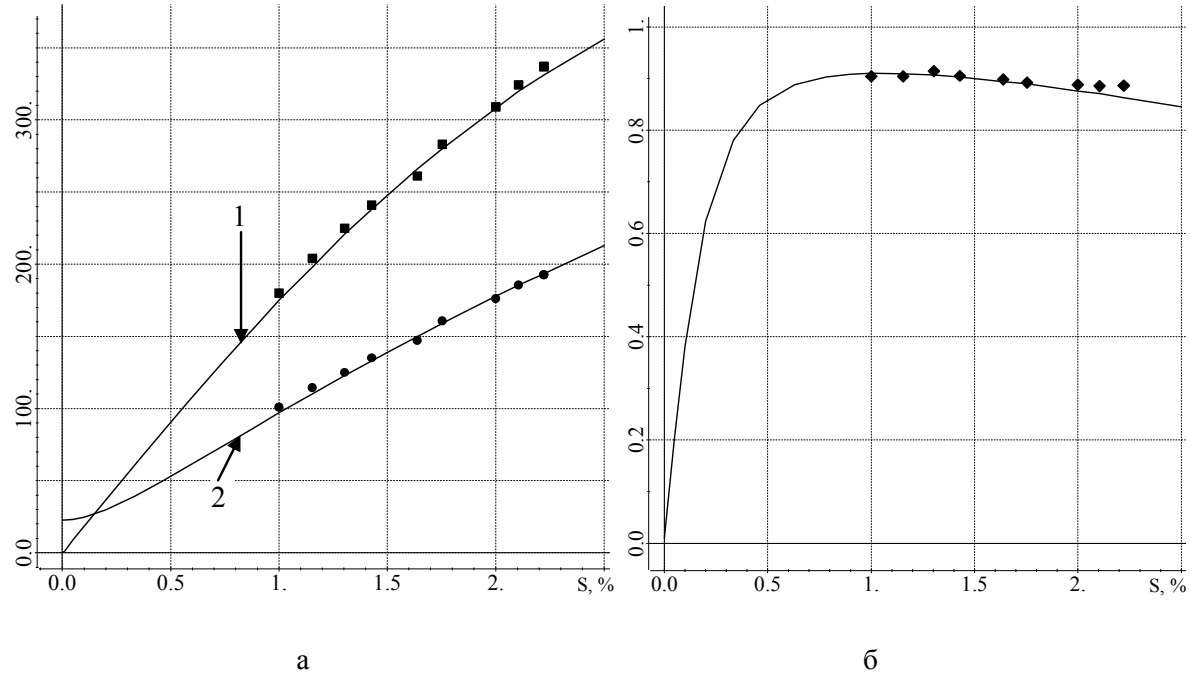
$$-\sigma_r^{\text{б}}\frac{S_r^{\text{б}}}{d_r^{\text{ст}}}V_{r,(k-1)}+2V_{r,k}\left(\sigma_r^{\text{б}}\frac{S_r^{\text{б}}}{d_r^{\text{ст}}}+\sigma_r^{\text{ст}}\frac{S_r^{\text{ст}}}{l}\right)-\sigma_r^{\text{б}}\frac{S_r^{\text{б}}}{d_r^{\text{ст}}}V_{r,(k+1)}+\sigma_r^{\text{ст}}G_{r,k}=0,$$

где $\mu$ – магнитная проницаемость, в общем случае зависящая от модуля вектора магнитной индукции $B=\sqrt{B_x^2+B_y^2}$; $A_z$ – $z$-компонента вектора-потенциала магнитного поля; $\sigma$ – удельная электрическая проводимость; $E_z$ – $z$-компонента вектора напряженности электрического поля; $V_j$ – скалярный электрический потенциал в точке соединения катушек параллельной ветви фазы обмотки статора; $V_{r,k}$ – скалярный электрический потенциал в точке присоединения $k$-го стержня «беличьей» клетки с номером $r$ к соответствующему короткозамыкающему кольцу в роторе; $S^{\text{об}}$ – площадь поперечного сечения эффективных проводников фазы обмотки статора; $n_b$ – число витков одной катушки; $l_b$ – длина витка; $l$ – длина машины; $N^{\text{ф}}$ – число фаз; $N^{\text{в}}$ – число параллельно соединенных ветвей в фазе; $N^{\text{об}}$ – число последовательно соединенных катушек в параллельной ветви; $S_r^{\text{ст}}$ – площадь поперечного сечения стержня «беличьей» клетки; $\sigma_r^{\text{ст}}$ – удельная электрическая проводимость материала стержня; $d_r^{\text{ст}}$ – расстояние между серединами стержней; $S_r^{\text{б}}$ – площадь поперечного сечения короткозамыкающего кольца; $\sigma_r^{\text{б}}$ – удельная электрическая проводимость материала короткозамыкающего кольца; $Q_j$ – производная по времени потока магнитной индукции через $j$-ю катушку; $G_{r,k}$ – индукционная составляющая тока в $r$-м стержне $k$-й беличьей клетки ($Q_j$ и $G_{r,k}$ определяются через производную потенциала $A_z$).

Дифференциальное уравнение (6) в подобластях, соответствующих воздушному пространству и магнитопроводу, имеет нулевую правую часть, а в подобластях, соответствующих обмоткам статора и ротора, принимает вид ($V_i^-$ и $V_i^+$ – значения скалярного электрического потенциала на «входе» и «выходе» обмотки с номером $i$):

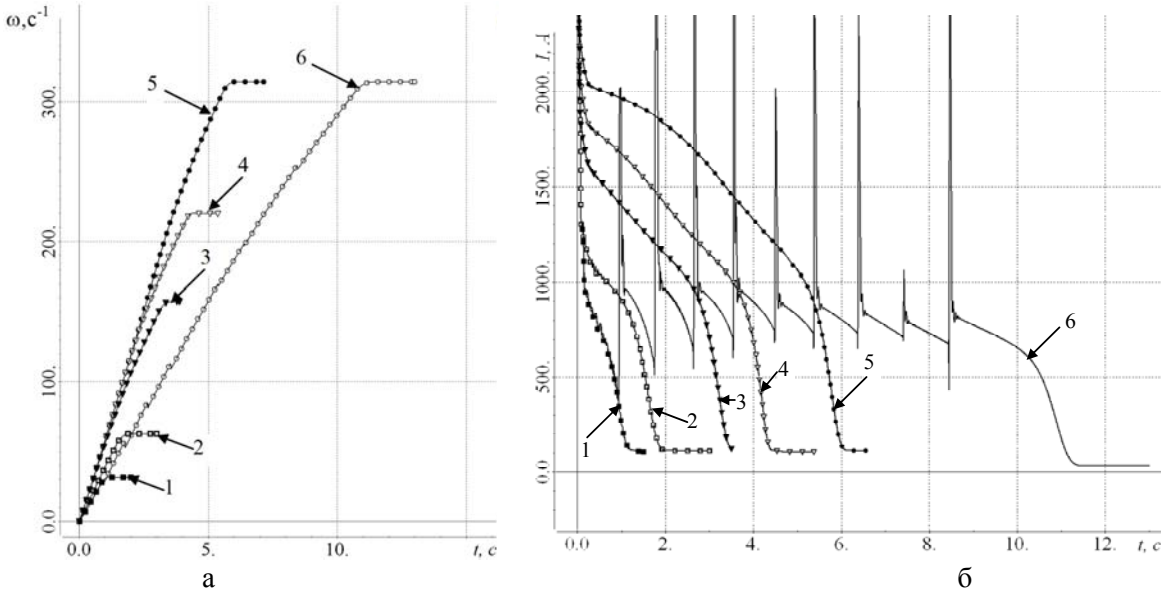
$$-\frac{1}{\mu_0}\Delta A_z=\alpha\sigma^{\text{об}}\left(-\frac{l}{l_b S^{\text{об}}}Q_i+\frac{\left(V_i^- - V_i^+\right)}{n_b l_b}\right) \text{ в } \Omega_i^{\text{об}+} \text{ и } \Omega_i^{\text{об}-};$$

$$-\frac{1}{\mu_0}\Delta A_z=\sigma_r^{\text{ст}}\left(\frac{1}{S_r^{\text{ст}}}G_{r,k}+\frac{2V_{r,k}}{l}\right) \text{ в } \Omega_{r,k}^{\text{бк}}.$$




а б

*Рис. 5.* Сравнение экспериментальных и расчетных данных для асинхронного электродвигателя: *а* – потребляемая мощность *P*1, кВт (*1*); ток обмотки статора *I*, А (*2*); *б* – $\cos\varphi$ , о.е.




а б

*Рис. 6.* Примеры расчета скорости (*а*) и токов (*б*) асинхронного электродвигателя при его разгоне с постоянной и переменной частотой входного напряжения

Кривая *1* соответствует частоте 10 Гц и действующему значению напряжения 200 В, *2* – 20 Гц и 400 В, *3* – 50 Гц и 1 000 В, *4* – 70 Гц и 1 400 В, *5* – 100 Гц и 2000 В. Кривая *6* получена для режима разгона с переключением частот в диапазоне 10...100 Гц, для этого режима потери сократились почти в три раза по сравнению с режимом без переключения частот

Таким образом, несмотря на то, что в квазитрехмерной постановке магнитопровод считается бесконечным, и, следовательно, магнитное поле является двумерным (распределенным по поперечному сечению электродвигателя), в этой постановке учитывается, что токи в обмотке статора и короткозамкнутых обмотках ротора замыкаются в торцевых частях электродвигателя, и это позволяет учесть трехмерность распределения токов в обмотках и обеспечить их неразрывность (выполнение закона Кирхгофа). По полученному мгновенному распределению электромагнитного поля путем интегрирования градиента квадрата магнитной индукции (являющейся, в свою очередь, производной конечно-элементного решения) по подобласти, соответствующей ротору, вычисляется электромагнитная сила и ее вращающий момент. По его значениям вычисляется угловая скорость и угол поворота ротора, который должен произойти при переходе от текущего значения времени к следующему по заданной временной сетке. После этого осуществляется поворот ротора и перестройка пространственной (конечно-элементной) сетки и выполняется расчет квазитрехмерного поля для следующего момента времени. Поворот ротора и перестройка конечно-элементной сетки выполняются программой автоматически. Таким образом, в квазитрехмерной постановке моделируется электродинамический процесс, учитывающий замыкание (неразрывность) токов в обмотках статора и ротора, взаимосвязь токов и магнитных потоков, вращение ротора и насыщение железа, в результате которого рассчитываются мгновенные характеристики в виде токов, полезной и потребляемой мощностей, потерь, скорости и т. д.

Рабочие характеристики, полученные в результате моделирования электродинамических процессов в программном комплексе ELMEC для асинхронного тягового электродвигателя с двумя беличьими клетками на роторе, сравнивались с экспериментальными данными [5] (практические и расчетные данные приведены на рис. 5). Результаты сравнения показали, что отличие не превышает 3–4 %. Полученные результаты говорят о том, что этот программный комплекс позволяет моделировать электродинамические процессы с высокой степенью адекватности реальному процессу и может быть использован для проектирования систем управления. В качестве примера на рис. 6 приведены результаты расчета, полученные при моделировании процесса разгона асинхронного тягового электродвигателя под нагрузкой для различных схем подачи питающего напряжения: с постоянной и с переменной частотой [6].

**Список литературы**

1. *Персова М. Г., Соловейчик Ю. Г., Тригубович Г. М.* Компьютерное моделирование геоэлектромагнитных полей в трехмерных средах методом конечных элементов // Физика Земли. 2011. № 2. С. 3–14.

2. *Соловейчик Ю. Г., Рояк М. Э., Персова М. Г.* Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач. Новосибирск, 2007. 896 с.

3. *Тригубович Г. М., Персова М. Г., Соловейчик Ю. Г.* 3D-электроразведка становлением поля. Новосибирск: Наука, 2009. 218 с.

4. *Персова М. Г.* Численное моделирование электромагнитных процессов в электродвигателях с учетом движения ротора // Электричество. 2007. № 8. С. 54–58.

5. *Темлякова З. С., Персова М. Г., Соловейчик Ю. Г., Петров Р. В., Гречкин В. В.* О новом подходе к проектированию электрических машин на основе численного моделирования // Электротехника. 2007. № 9. С. 15–21.

6. *Персова М. Г., Соловейчик Ю. Г., Темлякова З. С.* Математическая модель для исследования характеристик тягового асинхронного электродвигателя // Транспорт. Наука. Техника. Управление. 2008. № 6. С. 6–9.

*Материал поступил в редколлегию 14.08.2011*

**M. G. Persova, Yu. G. Soloveychik, M. V. Abramov, D. V. Vagin, P. A. Domnikov**

## SOFTWARE FOR FINITE ELEMENT MODELING OF ELECTROMAGNETIC FIELDS IN TECHNICAL DEVICES AND GEOELECTRICAL PROBLEMS

This work is devoted to designing the finite element software for modeling electromagnetic fields. They are user-friendly for those who are the specialists in such spheres as electrical prospecting, electro mechanics and nuclear physics. The distinctive features of the proposed software are automation of finite element mesh generation with a glance to the peculiarity of the calculated domain structure and the use of special mathematical statements which are based on selecting the field of less dimension taking into account the characteristics of the task solved. In addition, the automatically generated mesh ensures the required solution accuracy for the considered class of tasks. The above – mentioned mathematical statements make it possible to considerably reduce the computational time while solving three-dimensional problems with the required degree of accuracy. The concise description of software and their capabilities are presented for solving the tasks of three – dimensional electrical prospecting data interpretation, for modeling three-dimensional non-linear magnetic fields in asynchronous electrical motors and cyclotrons with spiral shims as well as for the tasks of modeling electrodynamic processes in asynchronous electrical motors with frequency control.

*Keywords*: computer modeling, finite element method.