

Инженерное моделирование квазистатического электромагнитного поля в программе ELCUT для задач электроники

Семен ДУБИЦКИЙ
simon@tor.ru

Программа ELCUT разработки ООО «Тор» (Санкт-Петербург) — единственный в России коммерческий инструмент общего назначения для моделирования низкочастотных электромагнитных и температурных полей методом конечных элементов. Она написана электротехниками для инженеров-электротехников и имеет множество пользователей в этой индустрии и профильных вузах. В статье предпринята попытка заново переосмыслить возможности применения ELCUT также и в электронике, выделить классы задач, где ее использование целесообразно, и осознать имеющиеся границы применимости.

Введение

Более столетия назад инженеры, работающие с задачами электромагнитного поля, разделились на две слабо связанные культуры: низкочастотные поля большой мощности (электротехника) и высокочастотные поля относительно малой мощности (электроника). Несмотря на то, что обе группы работают с решениями уравнений Максвелла, в каждом практическом случае эти уравнения решаются в разных приближениях и допущениях, специально подобранных для адекватного описания конкретного круга задач.

Традиционной средой обитания расчетчиков современной электронной техники является высокочастотная часть спектра электромагнитного поля, где господствуют волновые решения. В то же время в задачах электротехники уравнения Максвелла обычно записываются в допущениях, приводящих к уравнению диффузии, у которого волновые решения отсутствуют.

В данном обзоре предпринята попытка осмысления того, как программа ELCUT, использующая низкочастотное (квазистационарное) приближение уравнений электромагнитного поля, может быть использована в задачах проектирования электронной техники [4] и где проходит граница ее применимости.

Программа ELCUT

Петербургская компания «Тор» — это компания одного продукта: программы ELCUT [1, 2]. Ключевые слова, характеризующие ELCUT, — инженерное моделирование [3] и квазистатический анализ [4].

Слово «инженерный» команда ELCUT понимает следующим образом: программа предназначена в том числе и для тех инженеров, которые нуждаются в расчете поля

время от времени, и для которых эта задача не обязательно находится в центре профессиональных интересов и навыков. Это означает повышенные требования к простоте и интуитивной ясности использования продукта.

В свою очередь, простота использования означает, что программа не только в полной мере автоматизирует рутинные операции, но и способна предлагать ключевые решения в областях, для которых она является экспертной системой. К примеру, мы полагаем, что модуль решения задачи должен иметь единственную кнопку «решить», не осложняя жизнь пользователю постановкой вопросов о том, какой метод он предпочитает, сколько и каких нужно делать итераций и т. п. Все эти решения разумная программа инженерного анализа должна принять сама, сделав это оптимальным образом.

От пользователя, освобожденного от рутинных операций, ожидается знание физической сути решаемой задачи и детальное понимание сделанных им допущений и упрощений.

История создания ELCUT

Компания основана осенью 1988 г., в основном выходцами из завода «Электросила», где к тому времени функционировала сильная школа численного моделирования электромагнитных полей под руководством профессора В. В. Домбровского.

За более чем 25-летний путь развития программы расширился диапазон формулировок полевых задач, которые представляют собой подмножество полной системы уравнений Максвелла с упрощениями и допущениями, специально подобранными для решения определенного круга практических задач [4]. К настоящему времени расчет электрического и магнитного поля может проводиться в статическом приближении, в частотной и временной

области, с учетом многих видов нелинейности, т. е. зависимости параметров задачи от поля.

ELCUT предоставляет также развитый программный интерфейс [5], позволяющий писать клиентские приложения в диапазоне от простых скриптов до специализированных систем анализа в предметной области. Ряд сателлитных приложений и утилит с исходными кодами доступен для свободной загрузки с сайта программы.

В последние годы основным направлением развития ELCUT является освоение трехмерного анализа. К настоящему времени (версия 6.3) возможно решение трехмерных статических задач со скалярной потенциальной функцией: электростатика, электрическое поле постоянного тока, температурное поле.

Пользователи ELCUT

Важно иметь в виду, что ELCUT является «коробочным» продуктом, т. е. поставляется пользователям из разных областей инженерной и исследовательской деятельности as is, без кастомизации.

Основной массив пользователей ELCUT в индустрии — предприятия, поставляющие электротехнические изделия и компоненты, такие как электрические машины, трансформаторы [13], высоковольтные аппараты, кабельная техника [11], электролитические конденсаторы и др. (рис. 1).

Другие пользователи представляют электронное приборостроение, обычно с преобладанием магнитных компонентов (магнетроны, томографы), магнитное обогащение рудных и нерудных материалов [9]. В последние годы усилился интерес строительных проектировщиков к расчету тепловых свойств ограждающих конструкций современных зданий [8] методами численного моделирования температурного поля. Пригодность ELCUT к задачам тепло-

вой защиты зданий подтверждена сертификатом соответствия.

Среди научно-исследовательских организаций пользователями ELCUT являются:

- ведущие научные центры экспериментальной физики;
- создатели электрофизического оборудования;
- ведущие научные центры по электротехнической аппаратуре;
- центры материаловедения, прежде всего в области магнитных материалов;
- организации, занятые оборудованием неразрушающего контроля.

Пользователи отмечают, что ELCUT является хорошим выбором для первого знакомства с техникой моделирования поля методом конечных элементов. Это способствует распространению ELCUT в ведущих инженерных вузах страны, в основном на кафедрах общей и теоретической электротехники [6], электрических машин и аппаратов, а также на кафедрах, связанных с силовоточной электронно-лучевой и твердотельной электроникой [7].

Обзор формулировок задач

Как отмечалось выше, полная система уравнений Максвелла почти никогда не используется целиком при численном моделировании. Для каждого очерченного круга практических задач выбираются адекватные упрощающие допущения, которые образуют ту или иную частную формулировку (рис. 2). Все формулировки ELCUT опираются на квазистационарное приближение, приводящее к уравнению диффузии.

Для расчета электрических полей в диэлектриках и проводящих средах используются *электростатическая формулировка*, позволяющая вычислить емкость и оценить электрическую прочность, *электрическое поле постоянных токов*, оценивающее интегральное сопротивление проводниковых систем постоянному току и омические потери, *электрическое поле переменных токов* в частотной области, расширяющее понятие электростатики на случай неидеального диэлектрика с потерями, и *нестационарное электрическое поле*, вводящее в оборот нелинейные характеристики материала при анализе во временной области.

Для расчета магнитных полей используется *магнитостатическая формулировка*, позволяющая определить индуктивность с учетом насыщения магнитных материалов для поля, созданного постоянными токами и постоянными магнитами. Формулировка *магнитного поля переменных токов* проводит анализ в частотной области с учетом вихревых токов. Главные результаты такого расчета — активные и индуктивные сопротивления проводников с полным учетом скин-эффекта и эффекта близости, а также потери в проводниках и магнетиках



Рис. 1. Области применения ELCUT

на переменном токе. Задача *нестационарного магнитного поля* решается во временной области с полным учетом реальной кривой намагничивания ферромагнетиков. Этот анализ позволяет учитывать одновременное магнитное действие переменных, постоянных и импульсных токов и постоянных магнитов.

Математическое сходство уравнений позволяет распространить ELCUT также на задачи расчета температурного поля и упруго-напряженного состояния. Задача теплопроводности решается в установившемся (статическом) или переходном режимах (во временной области). Эффекты конвективного и радиационного теплообмена учитываются приближенно в виде граничных условий. Теплотехнические свойства материалов (теплопроводность, теплоемкость) могут зависеть от температуры. Задача упругости анализирует плосконапряженное, плоско-деформированное или осесимметричное упру-

гое напряженное состояние материала при различных видах нагружения и закрепления.

Мультифизические задачи

Задачи, одновременно использующие уравнения из разных областей физики (доменов) или качественно различные модели, принято называть мультифизическими. Связи между доменами могут быть сильными, когда все уравнения аккумулируются в одной общей матрице и решаются совместно, либо слабыми (последовательными), когда задачи в разных доменах решаются последовательно одна за другой. ELCUT использует сильную связь при совместном решении уравнений магнитного поля с уравнениями Кирхгофа для присоединенной электрической цепи (цепно-полевая формулировка), а для большинства остальных мультифизических задач используется последовательная связь (рис. 3).

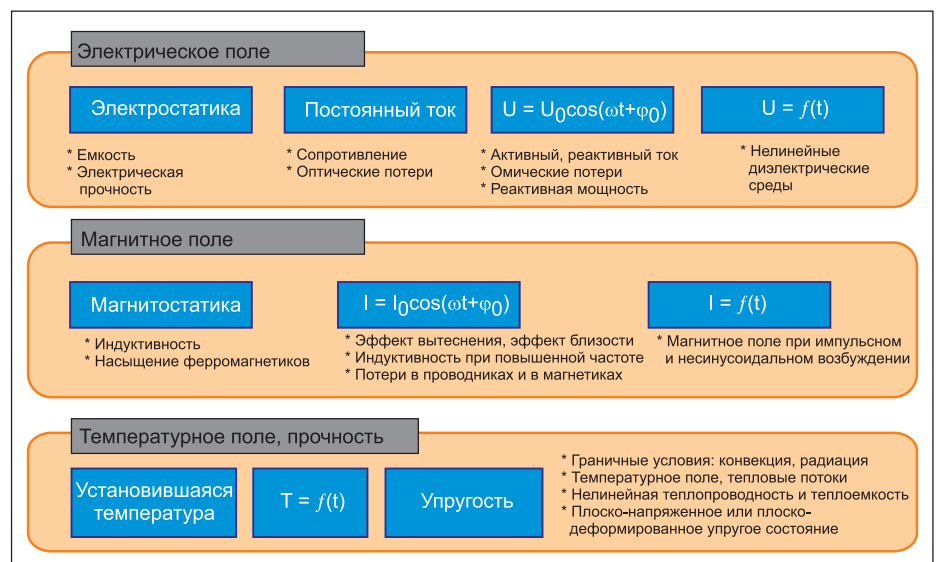


Рис. 2. Обзор постановок задач в ELCUT

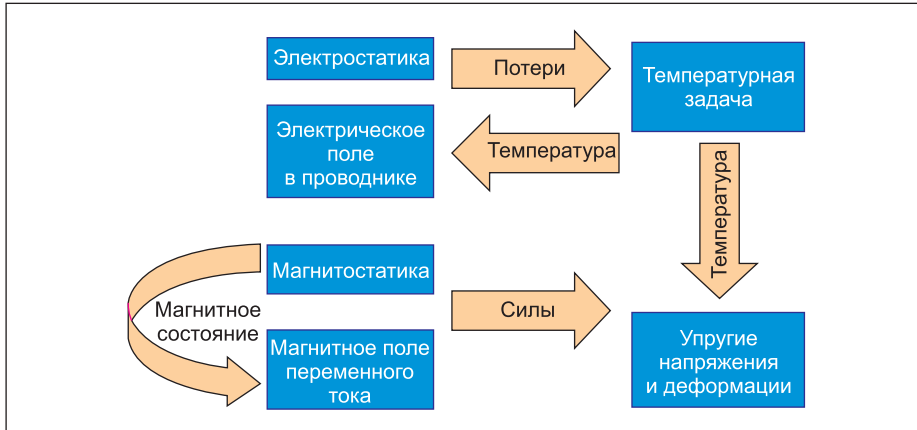


Рис. 3. Мультифизические связи между отдельными постановками задач

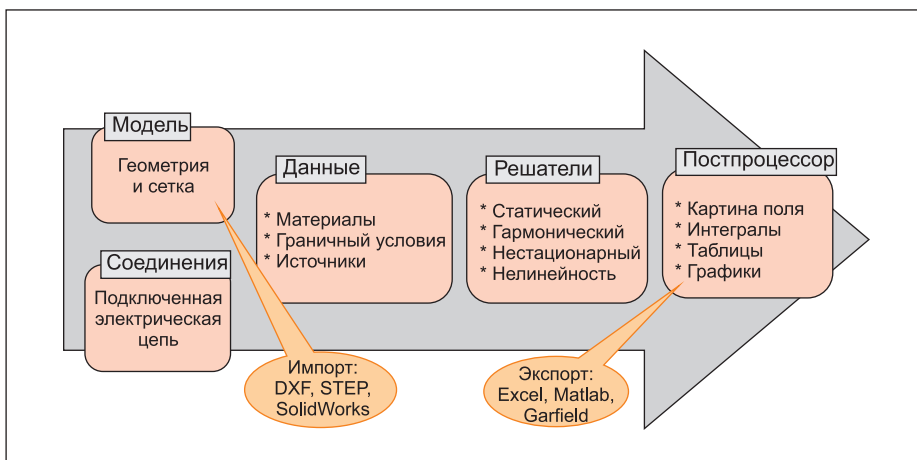


Рис. 4. Подсистемы программы ELCUT

Так, любая задача анализа электрического или магнитного поля порождает электродинамические усилия, которые могут автоматически передаваться в задачу упругости в качестве источника.

Каждая электрическая или магнитная формулировка, рассматривающая ток в проводящей среде, генерирует омические потери, которые могут быть переданы в качестве

источника тепла в задачу температурного поля. С другой стороны, электропроводность металлов зависит от температуры, так что результат расчета температурного поля может передаваться в электромагнитный анализ для уточнения удельного сопротивления среды.

Температурное поле также может использоваться задачей анализа упругого напряженного состояния в качестве источника термических деформаций. И, наконец, магнитное состояние нелинейного ферромагнитного материала может запоминаться и экспортироваться в другую магнитную задачу для корректного вычисления дифференциальной индуктивности многообмоточной магнитной системы.

Подсистемы ELCUT

Последовательность решения задачи в ELCUT предельно проста: нарисовать геометрию модели, сгенерировать расчетную сетку конечных элементов, указать граничные условия, задать свойства материалов, решить дискретную задачу, проанализировать результат решения, извлекая из него локальные и интегральные инженерные параметры.

Перечисленным этапам решения соответствуют подсистемы ELCUT (рис. 4):

- Геометрический редактор для работы с геометрией модели и сеткой конечных элементов. Геометрия может быть прорисована в модели либо импортирована из CAD в формате DXF или SolidWorks. Сетка конечных элементов строится полностью автоматически с гибкими возможностями априорного либо адаптивного управления густотой.
- Подсистема физических данных управляет и хранит сведения о граничных условиях и разнообразных свойствах материалов в разных физических доменах. Некоторые свойства могут нелинейно зависеть от поля либо от температуры. Многие граничные условия могут быть заданы формулой, описывающей их зависимость от координат и времени.
- Редактор электрической цепи используется для решения задач магнитного поля с сопряженной электрической схемой соединения проводников.
- Решатель системы уравнений отличается высокой устойчивостью, отсутствием управляющих параметров и пологой зависимостью времени решения задачи от ее размерности (время пропорционально размерности примерно в степени 1,10...1,15) (рис. 5).
- Подсистема анализа решения (постпроцессор), по отзывам пользователей, является одним из самых разветвленных в индустрии. Он показывает картину поля разными способами (цветная карта, линии поля, семейства векторов, графики, та-

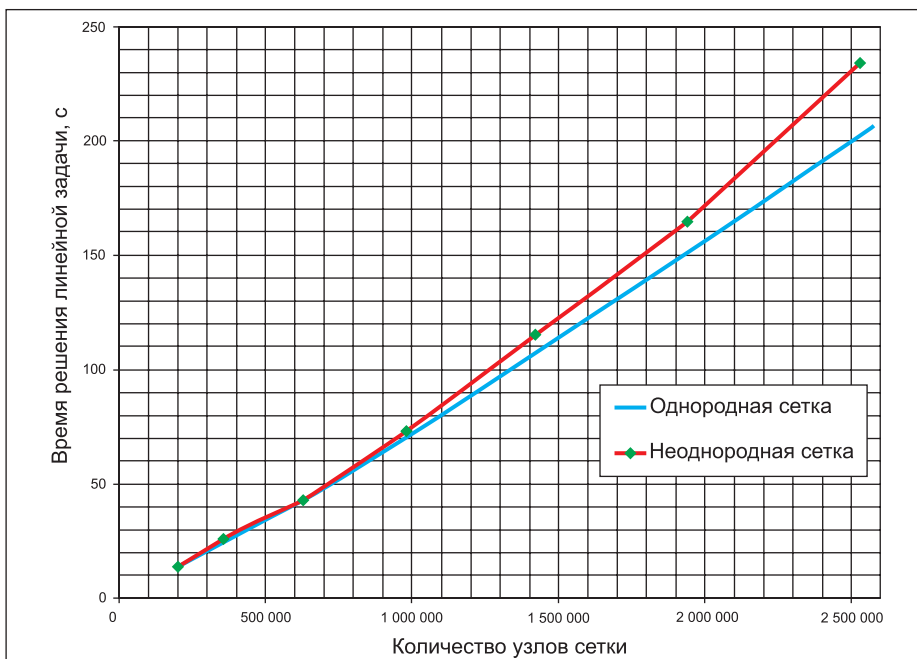


Рис. 5. Зависимость времени решения от размерности задачи

блицы, анимация), вычисляет локальные и интегральные значения. Интегрирование может выполняться вдоль кривой, по поверхности или по объему.

- Результаты могут быть экспортированы в сторонние программы (Excel, MATLAB, Garfield и др.).

Квазистатические расчеты и радиочастоты

Хорошо известно, что одни и те же системы проводников и диэлектриков могут рассматриваться как квазистационарные или как волновые в зависимости от электрической длины объекта — отношения характерного размера L к характерной длине волны λ . Если $L \ll \lambda$, устройство адекватно описывается квазистационарным приближением, как это принято в ELCUT. Когда размер модели намного больше длины волны ($L \gg \lambda$), подходящим видом анализа будут волновые уравнения электромагнитного поля или уравнения волновой оптики (этот вид анализа лежит за пределами ELCUT). Граница между стационарным и волновым диапазоном не является четкой. Это, скорее, некоторая протяженная серая зона, где в разных приближениях применимы и должны взаимодействовать оба описанных подхода (рис. 6).

Одним из примеров, когда для радиочастотных устройств полезно использовать квазистационарные методы расчета электромагнитного поля, являются линии передачи, использующиеся на уровне печатной платы или на уровне микросхемы. Статические или квазистационарные расчеты проводятся в поперечном сечении линии передачи, в предположении, что мода колебаний заранее известна. Так, расчет электростатического поля в поперечном сечении линии передачи позволяет вычислить не только емкость, но также характеристический импеданс и скорость распространения электромагнитной волны. Объектом расчета может быть полосковая или микрополосковая линия, копланарный волновод, щелевая линия — четная или нечетная, дифференциальная пара либо любая пространственная комбинация проводников и диэлектрических слоев.

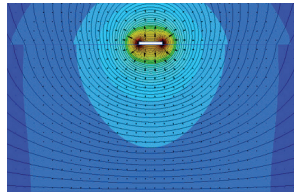
Замена электростатического анализа на модель электрического поля в неидеальном диэлектрике в частотной области позволяет, помимо импеданса и времени задержки, оценить также диэлектрические потери. Если имеется информация о зависимости свойств диэлектрика от частоты, то может быть оценена также дисперсия импеданса и задержки в нужном диапазоне частот (рис. 7).

Анализ магнитного поля в частотной области позволяет определить индуктивность линии или системы проводников с полным учетом скин-эффекта и эффекта близости (рис. 8). Другим результатом анализа магнитного поля является точное знание потерь в проводниках с учетом реального распре-

Квазистатическая формулировка

Квазистационарное решение:

- * Взаимная индуктивность
- * Скин-эффект, эффект близости
- * Собственная и взаимная ёмкость
- * Потери в проводнике и диэлектрике



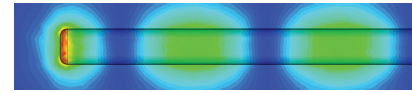
$L < \lambda/100$

ELCUT

Волновая формулировка

Волновое решение:

- * Близкая и дальняя зона
- * Отражение, рассеяние
- * Граничные условия рассеяния
- * Моды колебаний, собственные частоты



$L > 10\lambda$

Другие программы

Рис. 6. Соотношение между волновой и квазистатической формулировками

деления плотности тока по сечению. Серия расчетов в диапазоне частот даст картину дисперсии индуктивности и потерь.

Учет технологических факторов

Важно подчеркнуть, что геометрия расчетной области задачи в поперечном сечении линии передачи не ограничена каноническими формами. Проф. Л. Н. Кечиев (МИЭМ) [14] со своими аспирантами выполнили с помощью ELCUT широкий спектр исследований анализа влияния технологических факторов на параметры микрополосковой линии, а именно: несколько слоев диэлектрика (печатная плата, паяльная маска, влагозащитное покрытие, заливочный компаунд), а также учет реальной (трапециoidalной) формы печатного проводника вследствие подтравы (рис. 9).

Независимость технологии расчета от predetermined геометрии линии позволяет рассчитывать параметры линии с нестандартной геометрией, определять потери в диэлектриках и проводниках, находить частотную зависимость параметров линии, учитывать влияние ферритовых и иных магнитных материалов.

Электромагнитная связь проводников

Электрическая и магнитная двумерные модели поля в поперечном сечении могут учитывать не только единственный сигнальный проводник, как в обычных линиях передачи, но и системы из многих проводников. Важно подчеркнуть, что мода колебаний должна быть известна заранее, поскольку для квазистационарных расчетов она входит в число исходных данных: для электрического поля это потенциалы проводников, а для магнитного поля — полный ток каждого проводника.

В системе из нескольких проводников параметры линии приобретают матричную

форму: матрица частичных емкостей и матрица собственных и взаимных индуктивностей. ELCUT оснащен надстройкой CMatrix для автоматического вычисления матрицы частичных емкостей системы многих проводников (рис. 10).

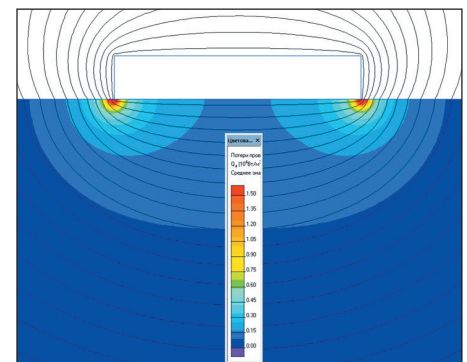


Рис. 7. Электрическое поле с учетом потерь в диэлектрике

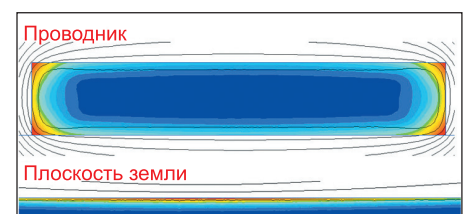


Рис. 8. Магнитное поле с учетом эффектов вытеснения и близости

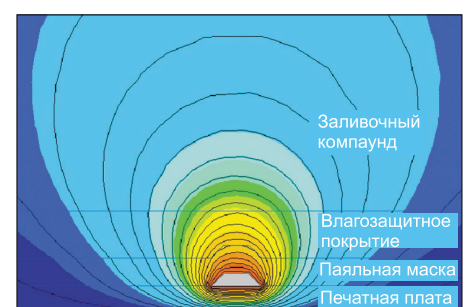


Рис. 9. Учет влияния технологических факторов на электромагнитные параметры (с разрешения проф. Л. Н. Кечиева, МИЭМ)

Настройка автоматически идентифицирует проводники, входящие в систему (включая линейные и точечные проводники), предоставляет пользователю графический интерфейс для заземления части проводников, определяет необходимое количество полевых задач для решения, автоматически формирует и решает необходимые задачи. Результатом решения каждой задачи, в которой ненулевой потенциал присвоен одному проводнику или паре проводников, является полная энергия электрического поля. Сформированная матрица энергии обращается с целью получения матрицы коэффициентов электростатической индукции или эквивалентной ей, но более удобной матрицы собственных и взаимных частичных емкостей.

Аналогичные вычисления могут быть выполнены относительно задачи расчета магнитного поля с целью вычисления матрицы собственных и взаимных частичных индуктивностей.

Выводы

ELCUT на сегодня является зрелым «коробочным» продуктом, пригодным для использования в разных отраслях инженерной, исследовательской и академической деятельности [8].

Для задач электроники, в частности двумерного расчета поля линий передачи в поперечном сечении, прямо «из коробки» ELCUT способен:

- вычислять волновое сопротивление линий передачи с неограниченным разнообразием формы, размеров и расположения проводников и диэлектриков, при условии, что заранее известна мода колебаний;
- вычислять потери в диэлектрике и в проводниках с учетом скин-эффекта и поверхностного эффекта;
- вычислять индуктивность проводников на переменном токе;
- вычислять матрицы частичных емкостей и частичных индуктивностей системы из нескольких проводников;
- оценивать тепловое состояние элементов в 2D- и 3D-моделях при задании условий конвективного теплообмена;
- проводить оптимизационный и статистический анализ.

Помимо развитого графического интерфейса, ELCUT предоставляет опытным пользователям и разработчикам программный интерфейс для широкого круга задач автоматизации: от написания простых скриптов для выполнения рутинных операций до интеграции ELCUT в существующий многопрограммный поток проектирования радиоэлектронной аппаратуры.

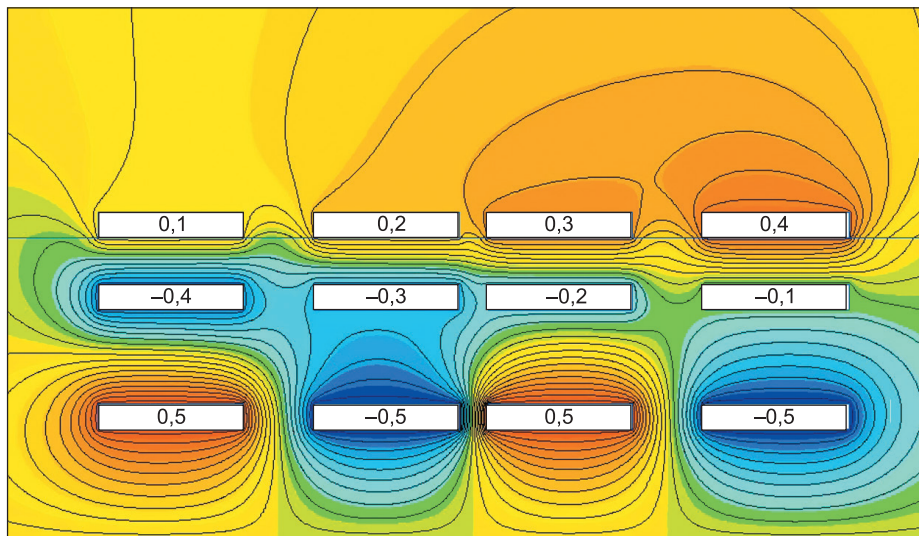


Рис. 10. Электрическое поле системы нескольких проводников

Программный интерфейс, называемый ActiveField, выполнен по технологии COM/ActiveX. Он содержит сотни объектов, методов и свойств, которыми можно пользоваться из большинства современных языков программирования на платформе Windows в одномашинной и многомашинной конфигурациях, а также из прикладных пакетов (MS Office, MATLAB и пр.).

На сайте программы представлены в свободном доступе пользовательская документация, а также обширный набор инструкций, видеоматериалов, записанных семинаров и технических статей по применению ELCUT в различных отраслях индустрии. ■

Литература

1. www.elcut.ru
2. Е. Э. Мазин, С. Д. Дубицкий, В. Г. Поднос, А. С. Любимцев. ELCUT 6.3. Руководство пользователя. CreateSpace Independent Publishing Platform. 2017.
3. Дубицкий С. Д., Поднос В. П. ELCUT — инженерная система моделирования двумерных физических полей // CADmaster. 2001. № 1.
4. С. Д. Дубицкий. ELCUT — конечно-элементный анализ низкочастотного электромагнитного поля // EDA Express. 2005. № 12.
5. С. Д. Дубицкий. ELCUT 5.1 — платформа разработки приложений анализа полей // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2004. № 1(5).
6. Бутырин П. А., Дубицкий С. Д., Коровкин Н. В. Использование компьютерного моделирования в преподавании теории электромагнитного поля // Электричество. 2014. № 10.

7. Затонов И. А. Применение программного пакета Elcut для подбора параметров магнитного поля бетатрона // Инженерия для освоения космоса: сб. научных трудов IV Всероссийского молодежного форума с международным участием. Томск, 12–14 апреля 2016.
8. Использование компьютерного моделирования и численных расчетов для решения инженерных задач // Сб. статей. СПб.: Любавич, 2015.
9. Коняев А. Ю., Назаров С. Л., Якушев Н. С. Оценка электромагнитных усилий, определяющих поведение немагнитных проводящих тел, в электродинамических сепараторах // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2014. Екатеринбург. 2014.
10. Рыбаков М. М. Факторы, влияющие на теплотеплопередачу через узел оконного откоса // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Т. 8. № 2.
11. Грешняков Г., Дубицкий С. Численная оценка токовой нагрузки XLPE кабельной системы // Силовая электроника. 2013. № 3.
12. Гуревич Э. И. и др. О применении нестационарных методов определения теплопроводности корпусной изоляции обмоток электрических машин // Электричество. 2011. № 6.
13. Сахно Л. И., Сахно О. И., Дубицкий С. Д., Вальков В. В., Зарываев Р. Г. Использование метода конечных элементов для комплексного расчета трансформаторов машин контактной сварки // Сварочное производство. 2016. № 1(974).
14. Кечиев Л. Н., Соловьев А. В. Методика анализа влияния технологических факторов печатных плат на их электрофизические параметры // Технологии приборостроения. 2006. № 1.