

## ELCUT —

### ИНЖЕНЕРНАЯ СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВУМЕРНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

*Определить вращающий момент электродвигателя, оценить взаимовлияние соседних проводящих дорожек на печатной плате, рассчитать тепловые потоки и мощности в системе электрообогрева лестничных ступеней, наглядно увидеть распределение вихревых токов и температур в устройстве индукционного нагрева — что общего между этими задачами? Все они решаются путем моделирования двумерного поля, и все являются примерами использования системы ELCUT.*

#### **Моделировать поле — когда и зачем?**

Проектирование большинства электромеханических изделий начинается с фазы расчета. Специальные подразделения определяют на основе проектных требований основные конструктивные размеры изделия, подбирают необходимые материалы и верифицируют полученные данные путем поверочного расчета. Сколько-нибудь сложное изделие подвергается при этом расчету в нескольких аспектах — выполняются расчеты магнитной цепи, электрической прочности, температурного состояния, вентиляции и охлаждения, механической прочности в рабочих и аварийных режимах. Как правило, каждый расчет выполняется в двух

направлениях: сначала синтез, когда на основе проектных требований выбираются геометрические размеры и физические параметры проектируемого изделия, а затем, на стадии анализа, детально проверяются корректность и оптимальность принятых решений.

Практически все виды расчетов, используемых в проектировании подобных систем, основаны на анализе соответствующего физического поля. И, тем не менее, в большинстве случаев непосредственное моделирование поля не выполняется. В чем тут дело? Между моделированием картины поля в устройстве и инженером-расчетчиком, как правило, стоит так называемая инженерная методика. Отталкиваясь от априорного представления о характере распределения поля в стандартизованной геометрической конфигурации, она сводит задачу к некоторой метафоре — упрощенной модели, удобной для манипулирования в задачах анализа и синтеза. Чаще всего такой метафорой является понятная всем инженерам электрическая цепь, методы анализа которой разработаны столетие назад. Совершенствование методики обычно означает добавление новых элементов эквивалентной электрической цепи и уточнение методов подбора их параметров.

Принципиальная ограниченность инженерных методик понятна всем. Чем более сложная схема замещения применяется для моделирования необычной или предельно нагруженной конструкции, тем более неопределенными становятся значения параметров этой эквивалентной схемы. Прекрасный анализ подобной ситуации, когда усложнение модели, неизбежно сопровождающееся уменьшением надежности ее параметров, приводит к менее обзримым и надежным результатам, можно найти в статье "О расчетных моделях сооружений и возможностях их анализа" (CADmaster, № 3, 2000).

Что же предлагается взамен бесконечного уточнения эквивалентных схем и других упрощающих инженерных метафор? Ответ известен уже по меньшей мере два десятилетия: применение программ прямого моделирования физических полей. Методы моделирования, из которых наиболее популярен метод конечных элементов, хорошо изучены, рынок соответствующих программных средств сформирован. Однако следует констатировать, что широкое применение полевого моделирования является в проектной практике скорее приятным исключением, нежели хорошей привычкой и повседневной необходимостью. Причина кроется не только в заметной цене доступных на рынке коммерческих программ, исчисляемой пятизначными (в долларах) цифрами, но и в высокой сложности их использования. Освоение приемов работы с большой многофункциональной конечно-элементной системой требует от нескольких дней до нескольких недель. Обычно в проектных организациях такую систему эксплуатируют специально подготовленный специалист или подразделение, что препятствует широкому использованию моделирования полей в качестве повседневного подручного средства инженера-расчетчика. Это же обстоятельство создает ложное впечатление, что полевое моделирование полезно только при поверочном анализе уже спроектированной системы и не может быть применено для

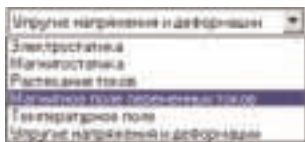
быстрых многовариантных расчетов, характерных для фазы синтеза.

Сделать полевое моделирование повседневным конструкторским инструментом — такая задача была поставлена перед разработчиками ELCUT: российского инженерного пакета моделирования двумерных физических полей. За 11 лет коммерческого существования пакета десятки российских и сотни зарубежных фирм и университетов по достоинству оценили две главные особенности ELCUT: предельную дружелюбность интуитивно понятного интерфейса пользователя, а также беспрецедентно высокую скорость расчета.

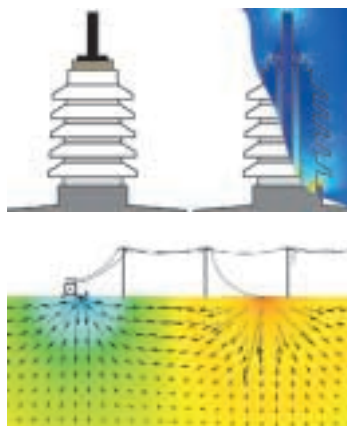
## Классы решаемых задач

Будучи двумерным пакетом, ELCUT может решать любую задачу только в плоскопараллельной или осесимметричной геометрии.

Решение задачи в ELCUT начинается с выбора формулировки.

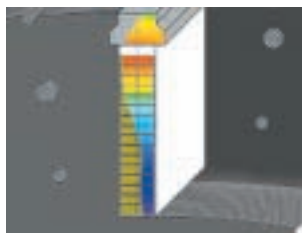


Классическая формулировка задачи электростатики дополнена здесь родственной ей задачей растекания токов в массивной проводящей среде.



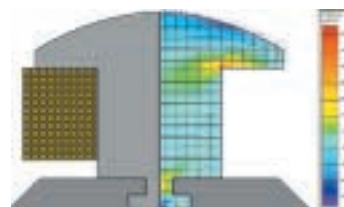
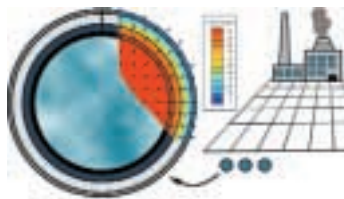
Нелинейная задача магнитостатики записана относительно векторного магнитного потенциала. Родственная ей задача магнитного поля переменных токов сформулирована в предположении, что все источни-

ки (токи) в системе изменяются во времени синусоидально с заданной частотой, и такой же характер имеет временное изменение поля. В этой постановке задача описывается уравнением относительно комплексного векторного магнитного потенциала, что естественно ограничивает нас классом материалов с постоянной магнитной проницаемостью.

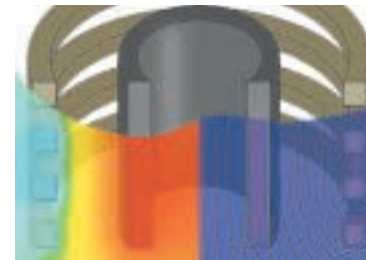


Задача расчета температурного поля допускает несколько видов нелинейности. Во-первых, теплопроводность может зависеть от температуры, во-вторых, можно определить источник поля, тепловая мощность которого будет зависеть от температуры, и, в-третьих, граничное условие радиационного теплообмена также приводит к нелинейной задаче.

Задача расчета упругого состояния сплошной среды в плоскопараллельном случае может быть сформулирована как задача плоских напряжений или плоских деформаций.



Кроме "чистых" задач ELCUT способен также решать связанные задачи. Например, рассчитанное температурное поле может быть учтено в задаче прочности; магнитные силы, возникающие, скажем, при коротком замыкании обмоток трансформатора, могут быть учтены при расчете механической стойкости обмоток и элементов их крепления.



Омические потери в проводниках, в том числе от вихревых токов, могут являться источниками тепла при расчете температурного состояния.

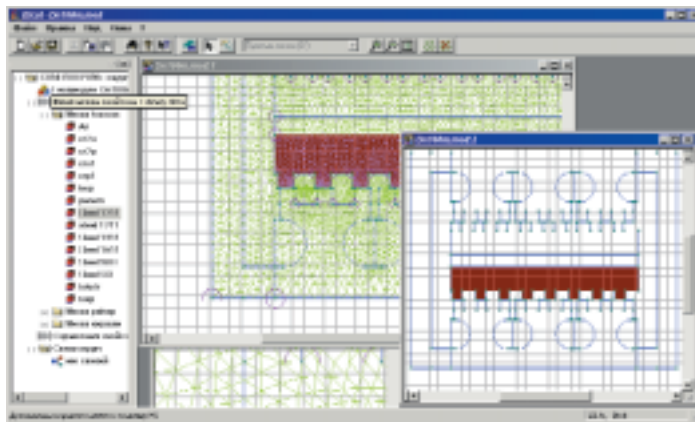
## Геометрическая модель — ввод и дискретизация

Для работы с двумерной моделью в ELCUT имеется редактор геометрической модели. Он оснащен небольшим, но тщательно отобранным набором инструментов.

Пользователь рисует модель мышью на экране, оперируя с вершинами и соединяющими их ребрами — прямыми или дугами окружностей. Двойной щелчок мыши порождает вершину; протаскив мышку от начала ребра в его конец, мы полностью определяем ребро. По мере построения модели ребра делят плоскость чертежа на подобласти, но пользователю об этом заботиться не надо — формирование многоугольных подобластей происходит полностью автоматически. Пересечение ребер, многосвязные области, изолированные вершины, висящие ребра — все это обрабатывается автоматически и не требует внимания пользователя. Возможность ввода координат вершин и сетка привязки облегчают точный ввод данных с чертежа, а если этого недостаточно — можно использовать двусторонний интерфейс с CAD-системой через файлы DXF.

Имеются инструменты для геометрических трансформаций фрагментов модели, а также их размножения и копирования.



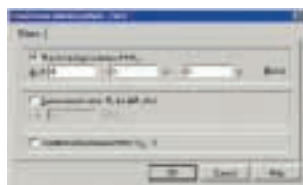


Закончив рисование модели, пора приступать к построению сетки. Как уже сказано, ELCUT использует метод конечных элементов. Пользователь пакета вполне может об этом и не знать, поскольку все процедуры метода скрыты в недрах программы и не требуют никакого вмешательства. К примеру, построение сетки треугольных конечных элементов может быть выполнено одним щелчком мыши. Такая автоматическая сетка всегда пригодна для начального прикидочного расчета, а во многих случаях подходит и для окончательного решения. Если этого недостаточно — можно сгустить или разредить сетку в нужных местах, указав желаемый пространственный шаг на любом наборе вершин. Генератор сетки работает в два этапа. (Сначала подобласти (в терминологии ELCUT — блоки) разрезаются на подблоки. При этом преследуются две цели: ликвидация геометрической многосвязности и оптимизация размера областей с точки зрения процесса решения.)

Для задания источников поля и граничных условий в редакторе модели нужно пометить геометрические объекты, которые понадобятся в дальнейшем, текстовыми метками (желательно mnemonicскими). В дальнейшем для каждой метки можно задать свойства материала, значения источников поля, граничные условия разных видов и пр. При этом физические свойства хранятся отдельно от геометрических данных, что облегчает многовариантные расчеты.

Затем задается магнитное поле. Магнитные свойства материалов могут быть заданы кривой намагничивания или константой. В последнем случае допустима анизотропия свойств.

На внешних и внутренних (!) ребрах могут быть поставлены граничные условия следующих типов: заданный потенциал (условие Дирихле), заданная плотность потока (условие Неймана) и специальный вид условия Дирихле, при котором потенциал заданной поверхно-



сти постоянный сверхпроводник.

В задачах других типов виды граничных условий в целом аналогичны. Для задачи упругости нагрузками могут быть объемные, поверхностные и точечные силы, термические деформации. На отдельных ребрах могут быть заданы условия закрепления, линейно зависящие от

## Источники поля и граничные условия

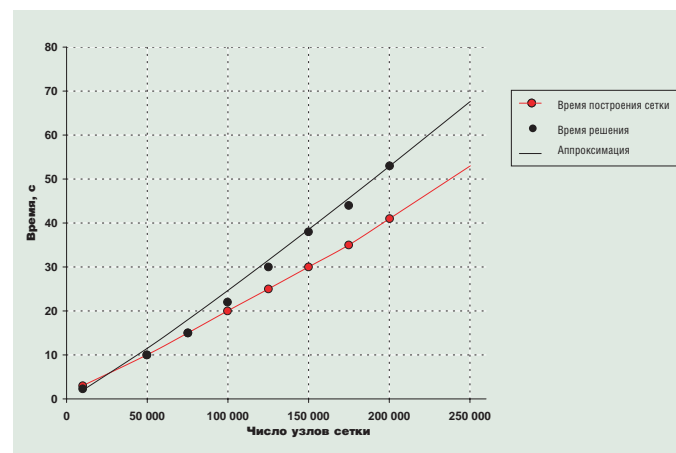
В магнитных задачах источниками поля являются токи (объемные, поверхностные или линейные), постоянные магниты и однородное внеш-

нее магнитное поле. Магнитные свойства материалов могут быть заданы кривой намагничивания или константой. В последнем случае допустима анизотропия свойств.

В задаче магнитного поля переменных токов в проводниках могут быть заданы токи или приложенные напряжения. Имеется также возможность указать последовательное или параллельное соединение проводников.

## Решение задачи

Сильной стороной ELCUT является необычно высокая скорость ре-



шения задачи. Она достигается применением фирменной технологии "метод геометрической декомпозиции". С точки зрения решения разреженной системы линейных алгебраических уравнений это вариант метода сопряженных градиентов с предобуславливанием матрицы. Технология хранения матрицы и ее обращения основана на декомпозиции области расчета на подблоки заранее оцененного оптимального размера, которая выполняется еще на этапе построения сетки. Выше приведены результаты теста производительности на компьютере с процессором Intel Celeron 300A, объемом памяти 128 Мб.

Как можно видеть на графике, метод обеспечивает почти линейную (точнее — в степени 1.1) зависимость времени решения задачи от ее размерности, против квадратичного роста, характерного для большинства аналогичных пакетов.

## Новости

### Осе' Technologies представляет новый мультизадачный репрографический комплекс TDS400

Компания Осе' Technologies представила новый репрографический комплекс TDS400. Эта система, предназначенная для цифрового тиражирования, печати и сканирования широкоформатных документов, станет первой в новой линии оборудования Осе' TDS (Technical Document Systems).

TDS400 — состоящая из плоттера, сканера и контроллера модульная система, центральное положение в которой занимает контроллер, — является мультизадачным комплексом, то есть предоставляет возможность параллельного выполнения процессов печати и сканирования, или сканирования в файл и копирования в реальном времени. Преемник Осе' 9400(-II), TDS400 обладает всеми его возможностями, а также имеет улучшенные характеристики и дополнительные функции, располагает широким набором функций, присущих цифровым репрографическим комплексам (многократное копирование, трансформации, масштабирование оригинала и т. п.).

Входящий в состав комплекса плоттер — новейшая разработка компании. Построенный по электрографической технологии, он обеспечивает производительную печать и копирование документов. TDS400 — первая широкоформатная система с разрешением при печати 600x600 dpi, что обеспечивает точную прорисовку деталей, четкость линий и символов, равномерность и глубину заливок, превосходную передачу полутонов. Производительность — 2 A0/мин. Система не требует времени на прогрев и мгновенно переходит из состояния ожидания в рабочее.

TDS400 комплектуется одним или двумя рулонными автоподатчиками бумаги. Это означает, что в двухрулонном варианте возможна печать до 300 чертежей формата A0 (2 рулона по 175 метров) без участия оператора. Плоттер имеет функцию Auto Rotate, благодаря которой, например, при установке носителя формата A0 документы формата A1 будут размещаться на бумаге горизонтально, что сокращает время вывода и экономит бумагу. Благодаря улучшенной дозировке подачи тонера, его расход по сравнению с другими системами сокращен, так что одной заправки достаточно для печати приблизительно 1200 листов формата A1 при пятипроцентном заполнении. TDS400 поддерживает все популярные форматы данных — такие, как HP-GL, HP-GL2, Calcomp, Tiff, Cals, широко используемые в CAD и EDMS приложениях, а также ASCII-форматы. Дополнительно поставляется модуль поддержки PostScript® 3™, обеспечивающий прямую печать файлов PDF-форматов.

Сканер комплекса TDS400 обеспечивает разрешение 400x400 dpi, имеет встроенную трехступенчатую систему улучшения качества оригиналов и специальные режимы сканирования: линия/текст, фотоизображение, "синька". Предусмотрена работа с документами нестандартных форматов. Максимальная длина оригинала при копировании — 15 метров. Режим многократного копирования до 99 копий.

В конце января 2001 года Consistent Software проведет в Москве презентацию TDS400, а с 1 февраля системы поступят в продажу.

На практике это означает, что задача в 100 000 узлов может быть решена за несколько секунд на рядовом персональном компьютере. Именно это уникальное свойство ELCUT позволяет говорить о нем как о легком и удобном инструменте для ежедневного использования.

### Анализ результатов

Основные виды анализа результатов решения в пакете ELCUT состоят в следующем:

- рисование картины поля различными способами;
- просмотр локальных значений поля "пробником";
- рисование графиков полевых характеристик вдоль заданного контура;
- вычисление интегральных величин по контуру и по объему;
- вычисление индуктивности, емкости и импеданса обмоток с помощью мастера;
- экспорт значений поля в другие программы вдоль контура и по площади с заданным шагом;
- вывод картинок в файл и на печать.

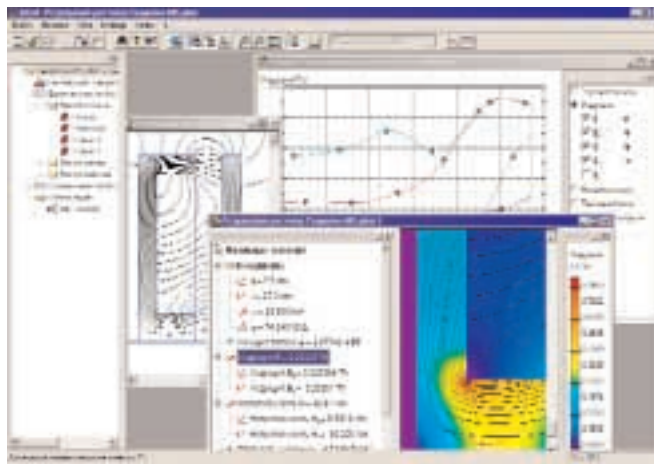
действующих или амплитудных значений.

Рядом с картиной поля можно увидеть панель "полевого калькулятора", в котором сведены локальные и интегральные значения, а также электротехнические параметры, вычисляемые с помощью мастера.

Инструмент рисования контуров позволяет задать разомкнутый или замкнутый контур, состоящий из отрезков и дуг окружностей. Этот контур используется для построения графиков, табулирования физических величин и вычисления интегралов. Интегральный калькулятор позволяет вычислять силу и момент, действующий на тела, погруженные в поле, потокосцепления, магнитодвижущую силу, тепловой поток, силу и момент реакции опоры, заряд проводника и множество других величин, важных для инженера-расчетчика.

### Кто и как использует ELCUT?

Пакет ELCUT существует в двух ипостасях. Во-первых, это профессиональная версия, способная решать задачи размерностью несколь-



Для рисования картины поля применяются цветная заливка, изолинии потенциала (температуры), изображение векторных величин с помощью семейства направленных отрезков. В задачах упругости также используется рисование искаженной формы тела и главных значений тензора напряженности. В задачах магнитного поля переменных токов все физические величины вычисляются и изображаются в виде мгновенных,

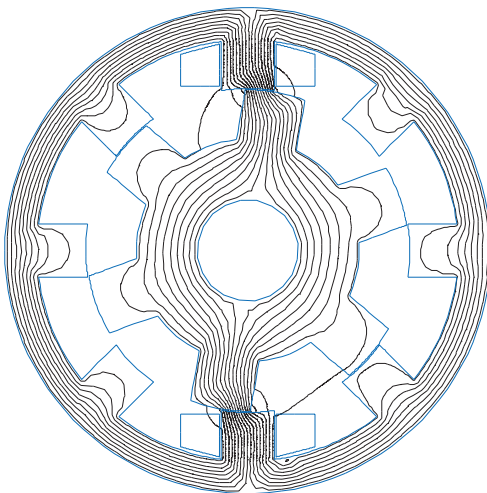
ко сотен тысяч степеней свободы, во-вторых, — студенческая версия. Последняя отличается от профессионального пакета только двумя особенностями: она решает задачи с числом узлов сетки до 200 и распространяется абсолютно бесплатно, в частности через web-сайт кооператива "TOP" <http://www.tor.ru/elcut>.

Нелегко даже приблизительно очертить рамки задач, для решения которых использовался ELCUT. Ка-



жется, что применимость пакета ограничивается только фантазией пользователя и его умением видеть полевые процессы за привычными инженерными формулами. Известно много случаев использования ELCUT в биологии, медицине, химии, строительной механике, геофизике. Тем не менее можно утверждать, что применение ELCUT наиболее эффективно для проектирования электротехнических устройств.

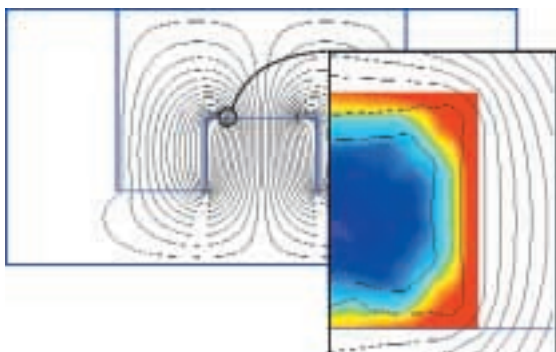
Чаще всего ELCUT применяется для расчета вращающего момента, потерь мощности и других характеристик электрических двигателей,



электрической прочности изоляционных конструкций — например, кабельных вводов,



индуктивности, емкости, волнового сопротивления и затухания линий передачи,



электрических и тепловых параметров установок индукционного нагрева, механической прочности катушек, создающих сильное магнитное поле.

Среди российских пользователей ELCUT — электромашиностроительные предприятия (Уралэлектротяжмаш, Электросила, Московский электростроительный завод), производители кабельной продукции (Севкабель, НИИ кабельной промышленности), приборостроительные организации (ЦНИИ Электроприбор, НИИ Домен, НПО Магнетон), научные центры (ФИАН им. Лебедева, Физико-технический институт им. Иоффе, НИИ электрофизической аппаратуры им. Ефремова, НИИ энергетики (Новочеркасск) и большое количество технических вузов.

Со следующего учебного года на электромеханическом факультете Санкт-Петербургского технического университета разворачивается программа широкого использования ELCUT, конечная цель которой — сделать полевые расчеты неотъемлемой частью хорошей инженерной практики.

Разумеется, никакая моделирующая программа не заменит инженерной интуиции, но правильный выбор инструмента позволяет минимизировать затраты, ускорить разработку и добиться оптимальных параметров проектируемого изделия. Не имеющая аналогов простота использования, широкий диапазон задач, высокая скорость и точность решения, умеренная цена во многих случаях делают ELCUT оптимальным выбором.

Семен Дубицкий,  
Владимир Поднос  
ПК "ТОР"

Санкт-Петербург  
Тел.: (812) 110-1659  
E-mail: support@tor.spb.su

# Системы Хранения Данных

Масштабному проекту  
масштабируемые системы

Библиотечные,  
иерархические  
и оперативные  
хранилища  
данных от

Hewlett-Packard,

NSM,

Plasmon...

Масштабируемые  
решения:

с ростом  
ваших потребностей  
растут и возможности  
систем.



**Consistent Software®**

Москва, 107066, Токмаков пер., 11.  
Тел.: (095) 913-2222, факс: (095) 913-2221  
E-mail: sales@csoft.ru Internet: http://www.csoft.ru