

РЕШЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

AUTOCAD ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА МОЛНИЕЗАЩИТЫ И ЗАЗЕМЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Д.С. Шишигин (Вологодский государственный университет)

Представлена разработка программы ЗУМ (приложение к AutoCAD) для расчета заземления и молниезащиты электрических подстанций. Программа состоит из вычислительного ядра и интерфейса, связанного с AutoCAD (технология COM). Результаты расчетов визуализируются 3D графиками, динамические процессы анимируются. Разработан оригинальный метод построения графиков в dxf кодах, отличающийся быстродействием. Рассмотрены способы борьбы со сложностью кода и повышения его быстродействия. Приведен пример расчета молниезащиты электрической подстанции.

Ключевые слова: AutoCAD приложение, заземление, молниезащита, электрическая подстанция.

Введение

Удары молнии продолжают наносить огромный ущерб объектам электроэнергетики, нефтегазового комплекса, железнодорожного транспорта, военной инфраструктуры, несмотря на постоянное совершенствование защитных мероприятий. Задача проектировщика — средствами компьютерного имитационного моделирования найти технические решения, исключающие аварии, и воплотить их в чертежах. Эта задача может быть решена только при наличии современного программного обеспечения: многофункционального, надежного, производительного и интегрированного в технологию САПР. Дефицит подобных комплексов программ для рассматриваемого класса задач имеет место в нашей стране.

Защиту от прямых ударов молнии осуществляют системы молниезащиты, которая принципиально не изменилась со времен Франклина и Ломоносова. Проектировщик выбирает вертикальные и тросовые молниеводы, строит их зоны защиты, внутри которых располагает защищаемые объекты. Зоны защиты представляют собой простейшие геометрические фигуры, которые объединяются. Молниеводов может быть много (десятки и сотни на электрической подстанции), их положение и высоту надо варьировать. Программисту необходимо реализовать несколько национальных стандартов построения зон защиты для разных отраслей промышленности, а также нормы Международной электротехнической комиссии (МЭК).

Ток молнии, который в расчетах принимается ≥ 100 кА, через заземлитель стекает в землю. Проектировщику требуется рассчитать параметры заземлителя (сопротивление, напряжения, токи), чтобы обосновать безопасность устройства для персонала и оборудования. Это вторая, более сложная задача.

Молния может ударить в подходящие линии электропередач, по которым волна перенапряжения, попадая на подстанцию, может повредить электрооборудование и прежде всего силовые и измерительные трансформаторы. Проектировщик должен выбрать

их средства защиты, что потребует решения третьей задачи — грозозащиты линий.

Для современного высокотехнологического производства, оборудованного микропроцессорными системами управления, не менее опасны и вторичные проявления молний в виде кондуктивных и электромагнитных помех, приводящие к отказу или ложному срабатыванию автоматики. Уровень напряженности электромагнитного поля не должен превышать норму в местах расположения аппаратуры. Экранирование металлоконструкциями существенно снижает интенсивность поля. Перед проектировщиком возникает следующий класс задач электромагнитной совместимости (ЭМС) и электромагнитного экранирования, в частности.

Рассмотренные задачи в настоящее время решаются по отдельности с помощью российских и зарубежных программ, однако только единый подход на основе многофункциональной платформы позволяют решить эту сложную, комплексную и практически важную для всех отраслей промышленности задачу эффективно.

Другое требование к программе определяется технологией автоматизированного проектирования — программу следует интегрировать в САПР. Современная тенденция во многих отраслях техники такова, что вместо автономных программ с авторскими геометрическими редакторами, которые неконкурентоспособны и уходят в прошлое, разрабатываются AutoCAD-приложения. Требование импорт замещения предполагает, что приложение должно работать с аналогичными САПР типа NanoCAD.

Рассмотрение технологии разработки подобной программы — цель настоящей работы. В работе показана архитектура программы ЗУМ, средства научной графики в AutoCAD, способы борьбы со сложностью кода, повышения его быстродействия на основе Intel Math Kernel Library (далее Intel MKL), а также применение программы для проектирования молниезащиты электрической подстанции.

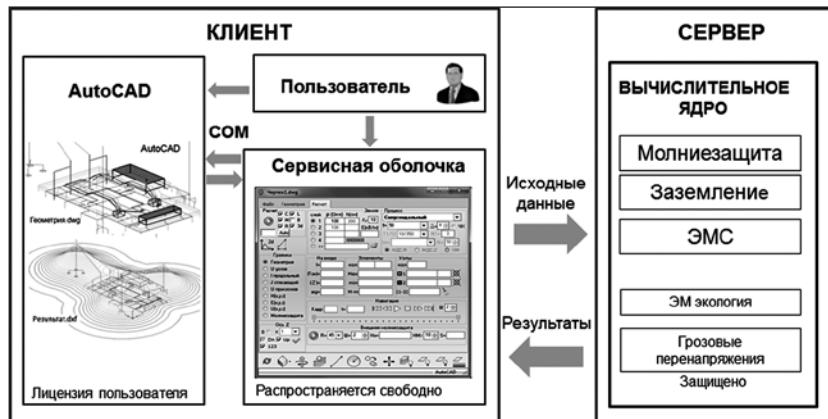


Рис. 1. Структура программы ЗУМ

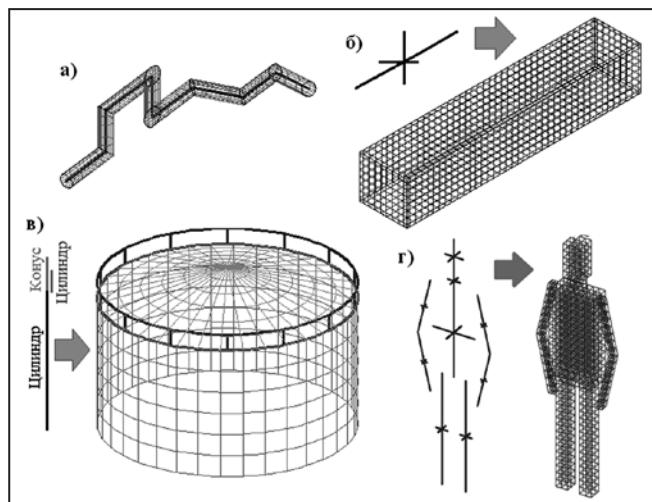


Рис.2. Поддержка в геометрическом моделировании, создание сеток: кабель (а), экран (б), резервуар (в), модель человека (г)

AutoCAD как среда для инженерных и научных расчетов

AutoCAD — основной инструмент для проектировщика во всех отраслях техники. Отсюда стремление и инженерные расчеты для обоснования проектных решений проводить в среде AutoCAD без повторного ввода сложных геометрических моделей в сторонних программах. Эта возможность реализуется в AutoCAD приложениях. Объектная модель AutoCAD открывает доступ ко всем методам, свойствам и событиям с геометрическими примитивами, что позволяет считывать 3D геометрические модели или создавать чертежи в AutoCAD по данным расчета из собственной программы [1].

Визуализация результатов расчетов в виде 2D, 3D графиков, анимация динамических процессов — обязательный атрибут современной программы. Но в AutoCAD нет компонента 3D-график, что составляет главную трудность при разработке приложений для технических расчетов.

Создадим компонент 3D-график. Будем рассматривать произвольный график как совокупность линий, каждую из которых можно нарисовать стандарт-

ным для AutoCAD методом *AddLine*. Но оказалось, что этот способ применим для графиков небольшой размерности (сотни линий), но становится медленным с тысячами, десятками тысяч линий, характерных для наших задач. При анимации число линий еще увеличивается пропорционально числу кадров. Графики с десятками тысяч линий строятся минутами на современном ПК.

Таким образом, система AutoCAD, созданная для интерактивной работы, не адаптирована для разработки технических приложений, где требуется визуализация и анимация 3D научной графики с большими данными. Разработка подобных графических инструментов является необходимым условием использования AutoCAD в качестве среды для инженерных и научных расчетов.

Разработка средств научной графики в AutoCAD

В основу решения задачи положена оригинальная идея: большие массивы данных для построения и анимации 3D-графиков в AutoCAD следует сохранять в dxf-формате (data exchange format). Фактически график заранее рисуется в dxf-кодах, а численные значения сохраняются в расширенных данных (XDATA), связанных с каждой линией. Размерность dxf-файла может превышать миллион строк, но он быстро создается и загружается в AutoCAD командой Import. В динамическом режиме создается последовательность временных кадров, каждый из которых сохраняется в отдельном слое, один слой делается видимым. Переключение между слоями создает эффект анимации, аналогичный просмотру avi-файлов. Система навигации кадров, аналогичная плееру, создает покадровый просмотр динамических режимов в ручном режиме и анимацию при автоматическом включении/выключении кадров.

Таким образом, созданы эффективные средства научной графики в AutoCAD, включающие 2D, 3D графики и их анимацию, удобные для проектировщиков и соответствующие требованию решаемых задач.

Программа ЗУМ

Программа ЗУМ [2] включает (рис. 1): вычислительное ядро и сервисную оболочку (интерфейс). Ядро представлено в виде набора динамических библиотек (dll). Для ускорения матричных операций используются процедуры пакета Intel MKL. Управление AutoCAD осуществляется через объектную модель (технология СОМ). Графики предварительно строятся в dxf-формате и автоматически загружаются в AutoCAD. Для удобства пользователя основные команды AutoCAD продублированы в программе. Созданы сценарии, автоматизирующие типовые геометрические построения (рис. 2).

Вычислительное ядро

Это набор математических моделей и методов для решения заданного класса задач. В наших за-

Таблица 1. Сравнение стандартного и оптимального алгоритма умножения матриц

Компилятор	Стандартный алгоритм	Построчное умножение
MS Visual Compiler	94,3 с	15,8 с
Intel C++ Compiler	117,9 с	13,2 с
Delphi XE3 Compiler	96,1 с	15,6 с

Размерность матриц – 2000. Ноутбук: ОС Windows 7 64-bit, Intel Core i7 4x2,2 ГГц, ОЗУ 6 Гб.

Таблица 2. Сравнение пакетов *Alglib* и *Intel MKL*

Операция	AlgLib	Intel MKL	Сравнение
Умножение матриц $[A][A]$	11,8 с	0,6 с	19 раз
Решение СЛАУ $[A][X]=[B]$	3,9 с	0,3 с	13 раз
Обращение матрицы $[A]$	28,8 с	1,1 с	26 раз
Решение комплексной СЛАУ $[C][X]=[B]$	46 с	0,9 с	51 раз
Обращение комплексной матрицы $[C]$	125 с	3,6 с	34 раз

Размерность матриц – 2000. Ноутбук: ОС Windows 7 64-bit, Intel Core i7 4x2,2 ГГц, ОЗУ 6 Гб.

дачах моделируется удар молнии или короткое замыкание на электрической подстанции. Требуется рассчитать сопротивление заземления, токи, потенциалы всех проводников, а также напряженности электрического и магнитного поля. Подобные задачи по постановке, методам и требуемым результатам являются цепно-полевыми, а для их решения требуются две взаимосвязанные модели — полевая и цепная. Полевая модель позволяет рассчитать электромагнитные параметры элементов, которые далее используются в цепной модели для расчета токов элементов. По найденным стекающим токам стержней в полевой модели определяется распределение потенциала и напряженности электрического поля, по найденным продольным токам определяется напряженность магнитного поля. Подробная информация по используемым нами моделям и методам представлена в [3,4].

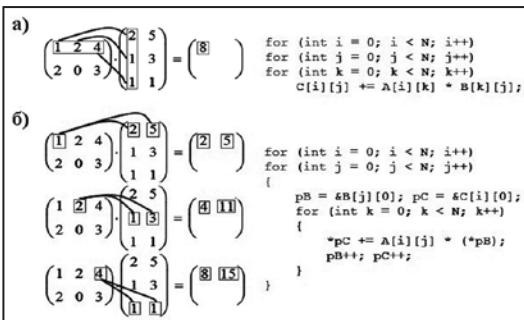


Рис.3. Алгоритмы умножения матриц: стандартный способ (а), построчное умножение (б)

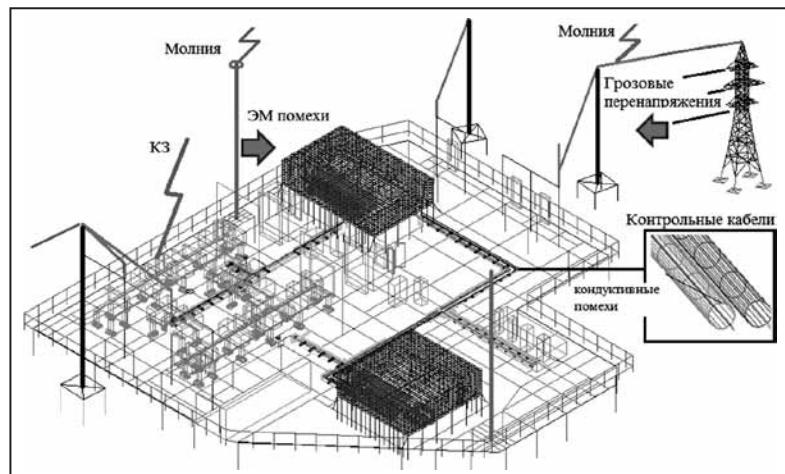


Рис.4. Геометрическая модель электрической подстанции и внешние воздействия

Мысль рождается, как молния, сразу, без помарок и исправлений...

Валентин Грудев

Простота кода

По примеру математических пакетов ядро представлено в виде dll-процедур с набором тестовых задач. Ядро разрабатывают специалисты, многие из них далеки от программирования. Мы убедились, что если отладить решение в Mathcad на тестовых задачах, используя матричные операции, то далее получаем простой, понятный код, способствующий длительному жизненному циклу программы.

Быстродействие кода

Быстродействие компьютерной программы — один из основных критерии, определяющих ее конкурентоспособность, косвенный признак эффективности заложенных в ней алгоритмов.

Алгоритмическая оптимизация кода — один из основных способов повышения производительности. Современный процессор работает в 15 и более раз быстрее оперативной памяти (ОЗУ). Поэтому задача программиста — уменьшить число обращений к ОЗУ за счет быстрой кэш памяти. Кэш сохраняет последние использованные инструкции и данные, так что циклы и операции с массивами выполняются быстрее. Кэш-промахом называется ситуация, когда данных, необходимых процессору, нет в кэш памяти, и он вынужден обращаться к медленной внешней памяти. При кэш-попадании доступ к внешней памяти не требуется.

Идеи по оптимизации кода можно найти в тексте программ математического пакета *Alglib* (распространяется свободно). Известно, что стандартный алгоритм умножения матрицы требует умножения строк первой матрицы на столбцы второй (рис. 3 а). Элементы строки матрицы расположены в памяти друг за другом, и доступ к ним будет максимально быстрым, так как выборка данных из ОЗУ осуществляется строками кэша (прочитав *i*-й элемент, в кэш еще автоматически попадают несколько следующих за ним элементов). С другой стороны, элементы столбца матрицы находятся на расстоянии *n * sizeof(element)* байт друг от друга и доступ к ним будет максимально медленным. Учитывая эту особенность,

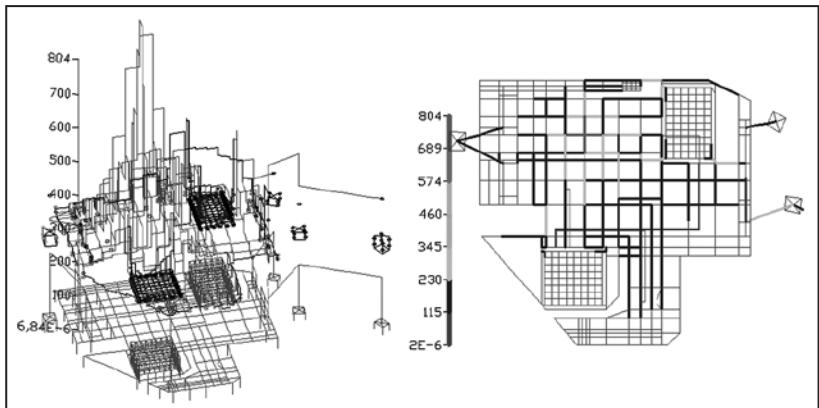


Рис.5. Распределение тока на электрической подстанции при КЗ (два варианта изображения)

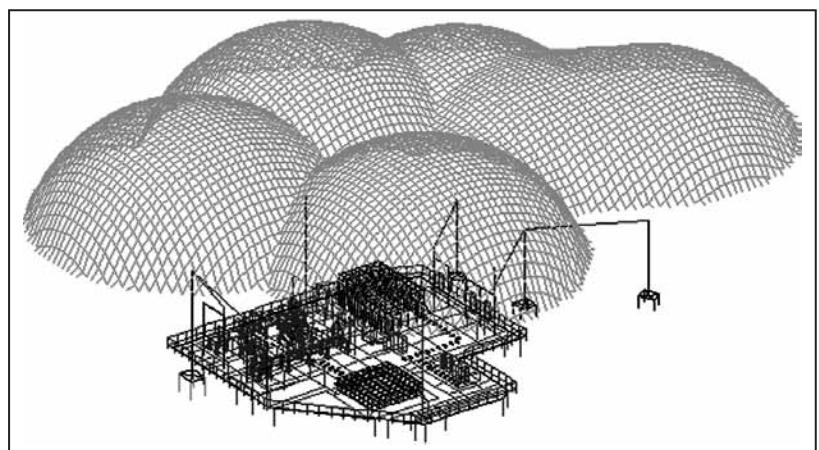


Рис. 6. Зона ориентировки молнии над электрической подстанцией

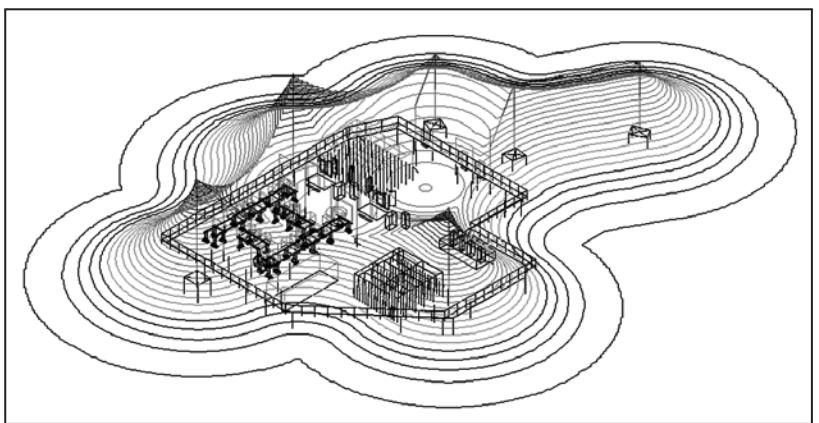


Рис.7. Зоны защиты электрической подстанции от удара молнии

можно осуществить умножение построчно (рис. 3 б). В этом случае число кэш-промахов минимально и быстродействие возрастает в 6...9 раз, что существенно (табл. 1). Выбор компилятора практически не влияет на производительность вычислений. Таким образом, структура данных и алгоритмы должны быть продуманы для исключения кэш-промахов.

Отдельное исследование выполнено по ускорению матричных операций, которые относятся к наиболее трудоемкой части алгоритма. Сравнивались возмож-

ности свободно распространяемого пакета *Alglib* с алгоритмической оптимизацией кода, эффективность которого по сравнению со стандартными алгоритмами показана ранее, и коммерческой библиотеки *Intel MKL* с низкоуровневой оптимизацией и многопоточностью. Заметим, что этот пакет используется в системах *Mathcad* и *Matlab*. Результаты представлены в табл. 2.

Таким образом, *Intel MKL* существенно повышает быстродействие матричных вычислений по сравнению с пакетом *Alglib* и его аналогами.

В настоящее время существует тенденция к переходу от вычислений на центральных процессорах (CPU) к вычислениям на графических процессорах (GPU). Использование NVIDIA CUDA с типичными характеристиками позволило ускорить произведения матриц еще в 2 раза по сравнению с *Intel MKL*. В целом нам удалось повысить быстродействие матричных операций в 100...300 раз по сравнению со «студенческими» алгоритмами. Таким образом, существуют значительные резервы повышения производительности вычислений, которые должны быть реализованы в программах для сложных многовариантных расчетов при проектировании.

Тестирование, апробация и применение программы

Тестирование программы, выполненное для задач с известным аналитическим решением и задач других авторов, подтвердило достоверность вычислительного ядра [5]. Тестирование производительности программы показало, что расчет одного варианта задачи, характерной для современной электрической подстанции, занимает менее минуты, что на порядок выше, чем у конкурирующих программ. Это позволяет проектировщику рассмотреть большое число вариантов.

Программа апробирована и используется для проектирования реальных объектов.

В качестве примера выберем молниезащиту и заземление электрической подстанции в соответствие со стандартами ФСК ЭЭС (рис. 4). Вначале анализируем режимы короткого замыкания (КЗ), в частности находим распределение тока (рис. 5). Далее анализируем надежность молниезащиты (рис. 6, 7). Установлено, что молниеотводы перехватывают удары молнии. Далее моделируем удар молнии поочередно в каждый молниеотвод и находим распределение потенциала и тока. Анимация позволя-

ет рассмотреть процесс в динамике и детализировать для любого момента времени (кадра). По графику потенциала убеждаемся в отсутствие обратных перекрытий с молниевводов на электрооборудование. В противном случае корректируем расположение молниевводов. Максимум напряжения, приложенного к экрану контрольного кабеля не должен превышать допустимую величину. В противном случае, усиливаем экранирующий эффект кабельного канала. Напряженность магнитного поля в местах расположения микропроцессорной аппаратуры (с учетом объемного экранирования металлоконструкциями) не должна превышать допустимый уровень (рис. 8). В противном случае корректируем расположение молниевводов, усиливаем экранирующий эффект кабельных каналов и металлоконструкций зданий, используем аппаратуру с повышенным классом помехоустойчивости.

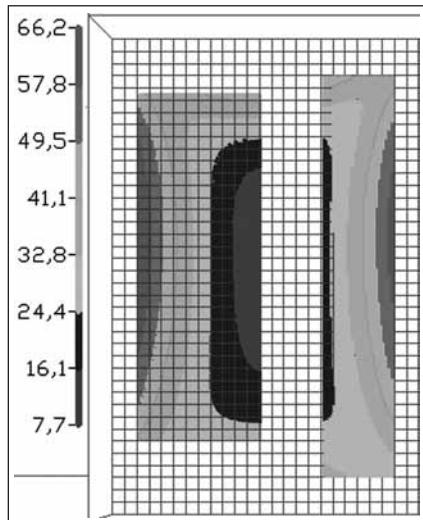


Рис.8. Распределение напряженности магнитного поля в местах расположения микропроцессорных систем управления с учетом экранирования при ударе молнии

расчеты и изображает результаты в AutoCAD. Представленная программа ЗУМ отвечает современным требованиям к расчету заземления и молниезащиты объектов электроэнергетики и других отраслей промышленности.

Список литературы

1. Полещук Н.Н. AutoCAD: разработка приложений, настройка и адаптация. СПб.: БХВ-Петербург. 2006. 992 с.
2. Шишигин Д.С. Разработка AutoCAD приложения для расчета заземления и молниезащиты электрических подстанций [Электронный ресурс] // Конференция «Разработка ПО 2013». Режим доступа: http://2013.secr.ru/2013/files/045_shishigin.pdf.
3. Шишигин С.Л. Математические модели и методы расчета заземляющих устройств // Электричество. 2010. № 1. С.16-23.
4. Шишигин С.Л., Мещеряков В.Е., Шишигин Д.С. Математические модели и методы в задачах заземления и ЭМС // Российская конф. по молниезащите: Сб. трудов. СПб. 2014. С.128-135.
5. Шишигин Д.С., Шишигин С.Л. Разработка программного обеспечения для расчета молниезащиты, заземления и ЭМС, интегрированного в AutoCAD // Российская конф. по молниезащите: Сб. трудов. СПб. 2014. С.135-141.

Заключение
Современные принципы разработки программ для технических расчетов, работающих в составе САПР, основаны на СОМ технологии. Программа считывает геометрическую модель из AutoCAD, выполняет

**Шишигин Дмитрий Сергеевич – аспирант кафедры автоматики и вычислительной техники Вологодского государственного университета
Контактный телефон (921) 064-63-34.
E-mail: shishigind@yandex.ru**