

УДК 621.316.9

М.Ю. ТОЛКАЧЕВ

*Национальный технический университет «ХПИ», Украина***ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К ЗАДАЧАМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОЛНИЕЗАЩИТЫ**

Предложен новый подход к оценке уровней электромагнитных полей внутри зданий и сооружений, вызванных разрядом молнии. В основу разработанного программного обеспечения положено использование вероятностных методов определения равноуровневых пространственных зон внутри зданий и сооружений. Возможность созданного программного обеспечения интерактивно взаимодействовать с инструментальной средой SolidWorks позволила проводить анализ электромагнитной обстановки внутри ограниченных пространств. При этом появилась возможность выдавать рекомендации по размещению электрооборудования внутри зон с прогнозируемым уровнем электромагнитной обстановки на ранних стадиях проектирования.

Ключевые слова: электромагнитное поле, молниезащита, электромагнитная обстановка, имитационная модель.

Введение

Надежность работы энергетических и промышленных объектов во многом определяется надежностью работы электронной (сейчас, как правило, цифровой) аппаратуры защиты, автоматики, связи и т.п. Специфика современных объектов такова, что устанавливаемая на них электронная аппаратура часто подвергается воздействию высоких уровней электромагнитных помех, которые вызывают ее сбои и отказы в работе.

Суперпозиция помех от различных источников в конкретном месте объекта называется электромагнитной обстановкой (ЭМО). Следует отметить большой разброс параметров ЭМО, (например, уровней помех при коммутационных операциях [2,3]). Так на объектах с непрерывным технологическим циклом и связанных с повышенной точностью передачи информационных данных, где выполняющая критически важные функции, цифровая аппаратура оказывается размещенной рядом с мощными источниками электромагнитных помех.

В сложившейся ситуации представляется необходимым проводить контроль ЭМО на объектах перед размещением на них современной цифровой аппаратуры защиты, автоматики, АСУ, АСКУЭ и связи.

Актуальность темы. При проектировании энергетических и промышленных объектов, зданий и помещений управления и связи в части соблюдения условий ЭМО большое внимание уделяется проблеме ЭМС. Под ЭМС оборудования понимается его способность работать в электромагнитной обстановке с соблюдением всех параметров и функций [1].

При существующем подходе к проектированию зданий и сооружений особое значение приобретает возможность использования программных средств анализа, которые адаптированы к форматам и позволяют производить анализ на ранних стадиях проектирования.

Развитие средств вычислительной техники стимулировало распространение инженерного анализа практически на все отрасли, где используется проектирование, как одиночных изделий, так и больших наукоемких проектов в машиностроении, архитектуре, и т.д. Многообразие физических процессов в наукоемких изделиях, субъективность в постановке задач анализа, в подходах к идеализации протекающих процессов, в выборе методов решения и многие другие причины привели к созданию огромного числа специальных методик, алгоритмов и программ, предназначенных для решения задач анализа проектов.

Так, при проектировании изделий машиностроения, архитектуры, судостроения, аэрокосмической и электротехнической отраслей для решения таких специфических задач, как влияние электромагнитных полей в любых средах используются универсальные программы. Все универсальные программы анализа имеют стандартные форматы обмена графической информацией с пакетами конструирования. Геометрическая модель проектируемого изделия предварительно создается на этапе конструирования в CAD-системе. Система Solidworks вошла в число ведущих систем этого уровня.

Основным средством анализа является программа Cosmos/DesignStar 3, совместимая с большинством распространенных САПР, например Auto-

Desk Inventor, Solid Edge, SolidWorks, Pro/Engineer и др. В ней применен модернизированный анализ по методу конечных элементов для объемных моделей систем, что позволило включить в программу в комбинации с ранее известными функциями также возможность нелинейного анализа механических конструкций, вычисление динамических потоков и расчет электромагнитной совместимости. В Cosmos/DesignStar по сравнению с другими программами этот анализ выполняется очень эффективно. Результаты анализа выводятся в графической форме, с отображением изменения напряжений и сил во времени.

Благодаря оптимальным алгоритмам, продукты COSMOS позволяют проводить анализ в несколько раз быстрее большинства аналогов. Важной отличительной особенностью COSMOS является глубокая интеграция расчетных модулей между собой, а также прямое взаимодействие с SolidWorks, что позволяет проводить анализ на стыке различных процессов и решать задачи оптимизации, оперативно внося изменения в конструкцию.

Совокупность разнообразных электромагнитных источников помех является сложными динамическими системами, которые функционируют в условиях существенной априорной неопределенности и случайным образом воздействуют на разнообразное оборудование и сети передачи данных [2].

С точки зрения теории моделирования радиоэлектронное оборудование и сети связи, подверженные воздействию ЭМИ и ЭМП, организованы настолько сложно, что адекватное (с необходимой степенью достоверности) математическое описание их и исследование традиционными способами невозможно. В данной ситуации метод статистического имитационного моделирования является эффективным средством исследования объектов различной степени сложности. Этот метод положен в основу анализа электромагнитной обстановки внутри проектируемого объекта, который проводится с помощью разработанного программного обеспечения.

Адаптация метода статистического имитационного моделирования для исследования ЭМО

Разработанное программное приложение взаимодействует с инструментальной средой SolidWorks и ее компонентом COSMOSDesignSTAR. Взаимодействие включает в себя управление, дополнительный анализ электромагнитной обстановки внутри проектируемого объекта и передачу дополнительных вычислений в инструментальную среду SolidWorks и встроенным ее компонентам COSMOSDesignSTAR.

Приложение, управляющее COSMOSEms реализовано в виде отдельной сборки. Оно работает со следующими пространствами имен в COSMOSEms:

- SolidWorks.Interop.sldworks. Основной модуль для работы с SolidWorks и его приложениями. Он использует основные методы интерфейсов для связи с другими модулями, определения конфигурации, объемной визуализации, прорисовки объекта, конвертации свойств, применения материалов и т. д.

- SolidWorks.Interop.swconst. Использует перечисления свойств

swAlignViewTypes_e, swAngleUnit_e, swAnnotationType_e, swArrowPosition, swArrowStyle_e, swBitmapControlStandardTypes_e, swConfigurationOptions_e, swDwgImportEntitiesPositioning_e, swFitType_e и т.д., которые являются общим и основным набором и используются в многочисленных операциях.

- SolidWorksTools. Использует интерфейс _Attribute для интеграции и для управления операциями в COSMOSEms.

- SolidWorksTools.File. Для работы с графическими файлами. Содержит методы CreateFileFromResourceBitmap, BitmapHandler, и т. д.

- SolidWorks.Interop.sw3dprinter. Использует встроенные интерфейсы IComparable, IConvertible, IFormattable, ISw3DPrinter для сбора статистических данных, корректировки масштаба, сопоставления размерностей, вывода визуализации на печать.

- Interop.prjMeshCheck. Используется для построения сетки объекта, анализа координат узлов, для связи по протоколу Http.

Для взаимодействия с COSMOSDesignSTAR используется структура классов (рис. 1).

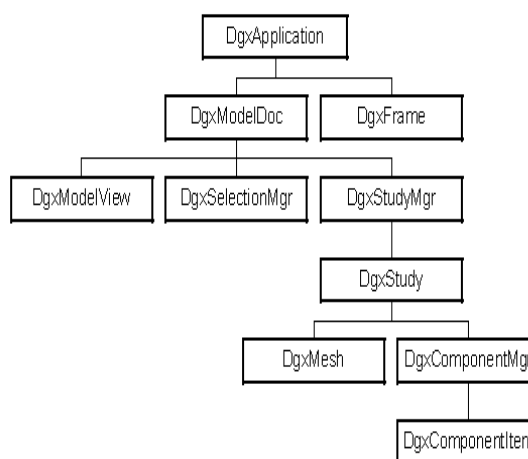


Рис. 1. Структура классов COSMOSDesignSTAR

Функционально система «приложение – инструментальная среда» структурно разбивается на блоки, в которых объединены общие функции (рис. 2).



Рис. 2. Взаимодействие блоков имитационной модели

Блок имитации внешних воздействий формирует реализации случайных процессов протекания токов и расположения источников. Результатом его работы становится имитация воздействия внешних электромагнитных полей. Блок математических моделей содержит характеристики здания, сооружения, контролируемых объектов внутри объема анализа, расчетные аналитические выражения для суперпозиции ЭМП от разных источников, оцифрованные таблицы и графики для численного решения интегральных уравнений и определения вероятности повреждения молнией систем связи. С помощью приложения, пользуясь визуализацией в COSMOSems задаются места расположения, характеристики источников ЭМП, их допустимые диапазоны, предельные характеристики и размещение объектов защиты внутри помещения, основываясь на допустимых уровнях воздействий на данные РЭС. Необходимая информация поступает в блок обработки результатов, который предназначен для получения характеристик по электромагнитной обстановке в помещении. Причем информация поступает по каждому статическому набору случайных процессов на вход с последующим анализом критических областей ЭМО для расположенных внутри контролируемого объема объектов. Блок управления реализует способ исследования имитационной модели, основное его назначение – автоматизация процесса проведения.

Разработка аналитической модели ЭМО

Совокупность внешних воздействий на конкретную систему реализуется в условиях существенной априорной неопределенности. Результат такого воздействия на окружающую среду X представляет собой случайную функцию $F(x_1; x_2 \dots x_n)$ вида

$$X = F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

где $x_i; i[1, n]$ – случайные экзогенные аргументы X . Сумма в правой части (1) является обобщенной, то есть представляет собой совокупность полугрупповых операций: ассоциативных и коммутативных, которые имеют стохастический характер. В качестве X рассматриваются уровни напряженности электри-

ческого E , В/м и магнитного H , А/м полей, а также плотность потока энергии $ППЭ$, мкВт/см², которые в реальных условиях являются случайными величинами.

Для описания свойств (1) в модели использованы распределения одномерных устойчивых законов, к которым приводят предельные теоремы ТВ.

Данные модели позволяют получить конечные варианты экспоненциального и нормального, а также равномерный закон распределения случайных величин. Таким образом, они являются теоретической основой для построения наиболее общих и достоверных моделей электромагнитных воздействий.

Каноническая форма записи характеристической функции (ХФ) одномерного устойчивого закона имеет вид

$$f_1(u) = \exp \left\{ j\alpha u - b|u|^\gamma \left[1 + jc(u/|u|)\Omega(u, \gamma) \right] \right\}, \quad (2)$$

где $u [-\infty; \infty]$ – аргумент ХФ и $\alpha [-\infty; \infty]$, $b [0; \infty]$, $c [-1; 1]$, $\gamma [0; 2]$ – числовые параметры ХФ, причем $\Omega(u; \gamma) = \operatorname{tg}(\pi\gamma/2)$, если $\gamma \neq 1$ и $\Omega(u; \gamma) = (2/\pi) \ln |u|$, если $\gamma = 1$.

Численное определение n -мерной плотности распределения вероятностей для ХФ (2) при взаимно независимых x_i , производится путем введения существенной области преобразования Фурье – объема n -мерного пространства

$$V_n(u, x) = \prod_{i=1}^n (u_{m2} - u_{m1})_i (x_{m2} - x_{m1})_i \quad (3)$$

где $u_i [u_{m1}, u_{m2}]$; $x_i [x_{m1}, x_{m2}]$ – аргументы, соответственно, ХФ и плотности распределения вероятности моделируемой i -ой случайной величины.

Моделирование непрерывных случайных чисел R_i , распределенных по устойчивому закону с заданной интегральной функцией распределения $P(R)$, проводилось следующим образом:

значения равномерно распределенной случайной величины g_i выбирались случайным образом на интервале от 0 до 1 и подставлялись в уравнение $P(R) = g_i$;

начиная с нуля и с шагом ΔR значения R подставлялись в $P(R) = g_i$ до тех пор, пока разность $g_i - P(R)$ не меняла свой знак и переставала превышать заданное число $\varepsilon \ll 1$;

при выполнении только первого условия значения R изменялись в обратном порядке с шагом $\Delta R/2$ – вновь или только до перемены знака (тогда снова изменялись знак и величина шага), или до перемены знака и выполнения второго условия и т.д.

На выходе итерационного процесса значение R принималось равным R_i . При помощи данного алгоритма формировался массив $N_R = 10^4$ значений слу-

чайных чисел R_i , с точностью $\varepsilon < 5\%$ соответствующий устойчивой модели с ХФ вида (2).

С точки зрения электромагнитной безопасности в произвольной точке M , выбранной случайным образом, может быть зафиксировано воздействие $N \gg 1$ источников ЭМИ (рис. 3).

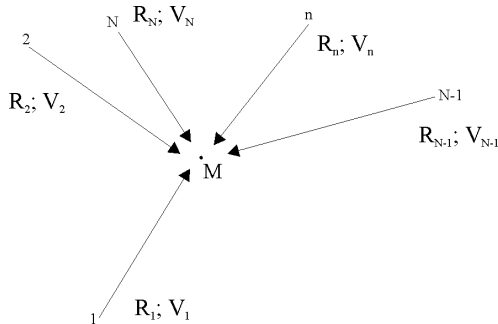


Рис. 3. К определению среднего уровня ЭМИ

Каждый из этих источников в этой точке M на расстоянии R_n создает плотность потока энергии (ППЭ) в единицу времени с уровнем $ППЭ_n = E_n^2 / Z_{cn}$; $n [1; N]$, где Z_c – волновое сопротивление окружающей среды;

$$E_n = (30P_{An}G_{An}\eta_\phi)^{0,5} V_n F(\alpha)F(\varphi) / R_n,$$

где P_{An} – мощность n -го источника; G_{An} и $F(\alpha) \approx 1$; $F(\varphi) \approx 1$ – соответственно, коэффициент усиления относительно изотропного излучателя и нормированные диаграммы направленности антен-

ны РЭС в вертикальной и горизонтальной плоскостях; $\eta_\phi \approx 1$ – КПД антенно-фидерного тракта РЭС; V_n – множитель ослабления напряженности поля свободного пространства.

В произвольный момент времени в точке M возможно воздействие от k источников электромагнитных воздействий ($k \leq N$), где N – максимальное количество источников ЭМИ ($N = 1 \dots 500$). Поэтому суммарный средний уровень воздействия ЭМП в точке M будет иметь вид

$$ППЭ_{cp} = \sum_{n=0}^N p_n \frac{P_{An}G_{An}V_n^2}{4\pi R_n^2} = \sum_{n=0}^N p_n ППЭ_n \quad (4)$$

где p_n – вероятность активности n -го источника, причем P_{An} и G_{An} являются детерминированными, а V_n и R_n – случайными величинами, моделируемыми устойчивым законом с ХФ вида (2). Значения $R_n [R_{min}; R_{max}]$ и $V_n [0; 1]$ разыгрываются по методу Монте-Карло, причем R_{min} и R_{max} определяются, исходя из размеров исследуемого объема помещения. Для обеспечения репрезентативности выборки значения R_n разыгрывается $K \gg 1$ раз и для каждого расстояния значения V_n разыгрываются $L \gg 1$ раз, после чего из полученного массива случайным образом выбираются значения V_n и R_n для подстановки в (4) и производится формирование массива средних значений $ППЭ_{cp}$, создаваемых в данном помещении.

В качестве примера реализации рассмотрено помещение с устройствами автоматики и коммуникациями связи площадью 120 м^2 , состоящее из 2-х комнат (рис. 4), для которого $R_{min} = 0,3 \text{ м}$; $R_{max} = 17 \text{ м}$.

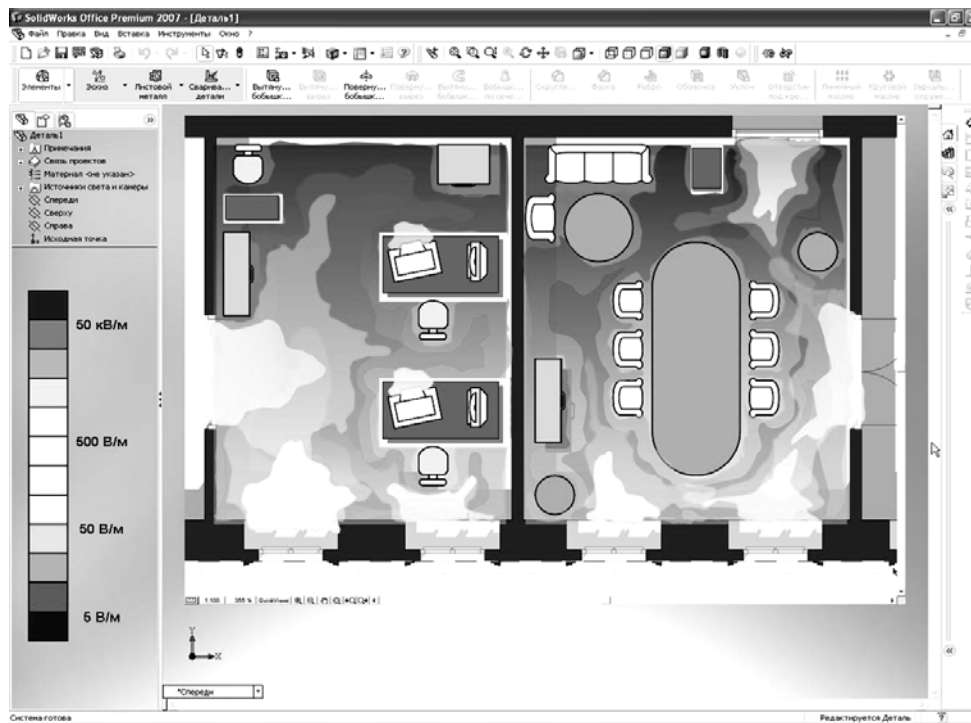


Рис. 4. Пример определения равноуровневых зон внутри объекта

Задан возможный набор источников ЭМП с характеристиками тока от разряда молнии в шине (15 кА при импульсе 20 мкс), от разряда молнии на расстоянии 100м и токе 80кА, короткого замыкания в линии электропередач на расстоянии 100м и токе 40кА, аварийный режим контактной сети железной дороги на расстоянии 1200м и токе 14кА. Применено параметрическое моделирование при постановке эйлеровской сетки с шагом 0,05м. Показана визуализация ЭМО в плоскости пола помещения. Цветовые и тоновые градации напряженности ЭМП обеспечивают наглядное представление ЭМО [3]. Цветовая шкала напряженности представлена слева.

Заклучение

В рамках метода статистического имитационного моделирования разработана и реализована имитационная модель расчёта уровней ЭМП при произвольном воздействии вектора электромагнитного излучения в объеме помещения в виде прикладной программы, управляющей средой конструирования SolidWorks,. Это позволяет производить количественную оценку безопасности объектов автоматизации и коммуникаций по фактору ЭМО.

Разработаны рекомендации, показаны возможности предложений по реконфигурации качественной и количественной структуры электромагнитного поля

внутри объекта и внешних рецепторов, создающих суперпозицию внутри создаваемого объекта на всех этапах проектирования.

Разработана аналитическая модель средствами имитационного моделирования, позволяющая эффективно решать задачи, связанные с анализом и прогнозированием электромагнитной безопасности объектов автоматизации и коммуникаций внутри помещений. Полученные результаты представляют также интерес для решения аналогичных задач в области обеспечения электромагнитной совместимости и информационной безопасности для объектов различного назначения.

Литература

1. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений РД 34.21.122 87, М.: «Энергоатомиздат», 1989 г.
2. Рикетс Л.У. Электромагнитный импульс и методы защиты / Л.У. Рикетс, Дж.Э. Бриджес, Дж. Майлетта; пер. под ред. Н.А. Ухина. – М.: Атомиздат, 1979. – 328 с.
3. Серков А.А. Автоматизация процессов обеспечения молниезащиты на основе программного пакета SOLIDWORKS / А.А. Серков, М.Ю. Толкачев // *Радиоелектронні і комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал.* – 2007. – № 7(26). – С. 87-89.

Поступила в редакцию 2.02.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Системы информации» А.А. Серков, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

ЙМОВІРНІСНИЙ ПІДХІД К ЗАДАЧАМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЛИСКАВКОЗАХИСТУ

М.Ю. Толкачев

Запропонован новий підхід до оцінки рівнів електромагнітних полів, які викликані розрядом блискавки, усередині зданий та споруд. В основу розробленого програмного забезпечення покладено застосування ймовірносних методів визначення просторових зон одного рівня усередині зданий та споруд. Можливість створеного програмного забезпечення інтерактивно взаємодіяти з інструментальною середою SolidWorks дозволяє проводити аналіз електромагнітної обстановки усередині обмежених просторів. При цьому з'явилася можливість видавати рекомендації по розміщенню електрообладнання у зонах з рівнем електромагнітної обстановки, який прогнозується, на ранніх стадіях проектування.

Ключові слова: електромагнітне поле, блискавкозахист, електромагнітна обстановка, імітаційна модель.

STOCHASTIC APPROACH TO LIGHTNING PROTECTION PROBLEMS

M.U. Tolkachov

A new approach is suggested for estimation of electromagnetic fields induced by lightning inside buildings. The software is based on stochastic methods for determining equilevel zones inside a building. The software's interoperability with SolidWorks allows analysis of electromagnetic conditions inside restricted spaces. The analysis results in guidelines as to arrangement of electric equipment in the zones with predictable electromagnetic conditions.

Key words: electromagnetic field, lightning protection, electromagnetic conditions, simulation model.

Толкачев Максим Юрьевич – старший преподаватель кафедры «Системы информации» Национального технического университета «ХПИ», Харьков, Украина, e-mail: mtolk@vk.kh.ua.