



УДК 621.3.049.77.029:681.3.06

DOI: 10.22184/1993-8578.2023.16.9s.170.178

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В ТУСУР

### DEVELOPING SOFTWARE FOR MODELLING RADIOELECTRONIC EQUIPMENT WITH RESPECT TO ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IN TUSUR

КУКСЕНКО С. П.

*kserygp@tu.tusur.ru*

KUKSENKO S. P.

*kserygp@tu.tusur.ru*

ГАЗИЗОВ Т. Р.

*talgat@tu.tusur.ru*

GAZIZOV T. R.

*talgat@tu.tusur.ru*

КВАСНИКОВ А. А.

*aleksejkvasnikov@tu.tusur.ru*

KVASNIKOV A. A.

*aleksejkvasnikov@tu.tusur.ru*

ДЕМАКОВ А. В.

*demakov\_av@tu.tusur.ru*

DEMAKOV A. V.

*demakov\_av@tu.tusur.ru*

ИВАНОВ А. А.

*anton\_ivn@tu.tusur.ru*

IVANOV A. A.

*anton\_ivn@tu.tusur.ru*

КЛЮКИН Д. В.

*dv\_klyukin@tu.tusur.ru*

KLYUKIN D. V.

*dv\_klyukin@tu.tusur.ru*

АЛХАДЖ ХАСАН А.

*alhaj.hasan.adnan@tu.tusur.ru*

ALHADGE HASAN A.

*alhaj.hasan.adnan@tu.tusur.ru*

МАКСИМОВ А. Е.

*mae@tusur.ru*

MAKSIMOV A. YE.

*mae@tusur.ru*

ОСИНЦЕВ А. В.

*kubenet@gmail.com*

OSINTSEV A. V.

*kubenet@gmail.com*

*Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники  
634050, г. Томск, просп. Ленина, 40*

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics  
(TUSUR University)  
40 Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russia*

Кратко изложены особенности разработки программного обеспечения для моделирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости, проводимой в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники. Приведены некоторые результаты их работы.

*Ключевые слова:* радиоэлектронное средство; электромагнитная совместимость; вычислительная электродинамика; система автоматизированного проектирования.

#### ВВЕДЕНИЕ

Конкуренция производителей требует регулярного и быстрого появления с минимальными затратами все более совершенных видов радиоэлектронных средств (РЭС). Однако выполнение этого требования с ростом сложности РЭС становится невозможным без применения автоматизированного проектирования. Поэтому наличие эффективной системы автоматизированного проектирования (САПР) с возможностью моделирования особенно важно для плодотворной работы современного специалиста, а ее использование позволяет существенно снизить затраты времени на разработку конечного изделия и повысить его качество. К сожалению,

отечественные системы моделирования и проектирования, отвечающие современным требованиям, практически отсутствуют, а имеющиеся разработки, из-за недостатка должной поддержки, являются, как правило, узкоспециализированными либо создаются исключительно за счет энтузиазма разработчиков. Поэтому на российских предприятиях часто используются зарубежные САПР, однако их приобретение и поддержка требуют значительных финансовых затрат, что может препятствовать разработке перспективных РЭС. В связи с этим актуальна кооперация отечественных разработчиков для создания перспективной и мощной отечественной САПР.

Цель данной работы — представить имеющиеся наработки и дальнейшие направления исследования по созданию такой САПР, проводимых в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР).

**ОСОБЕННОСТИ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗРАБОТКИ**

Следуя общей тенденции развития САПР, в ТУСУР ведутся работы по реализации нескольких вычислительных методов электродинамики для последующего объединения в единой программной оболочке. Ранее с использованием метода моментов разработана система TALGAT, главным образом предназначенная для квазистатического моделирования целостности сигналов в межсоединениях [1]. Теперь для расширения возможностей разрабатываемой САПР и валидации результатов моделирования, согласно [2], также реализуются другие численные методы, а именно: метод конечных разностей во временной области для моделирования и анализа СВЧ-устройств и антенн, метод конечных элементов для оценки распределения статических полей в межсоединениях, метод матрицы линий передачи и аналитические математические модели для оценки эффективности экранирования корпусов типовых РЭС. Для оптимизации анализируемых конструкций широко используются генетические алгоритмы и эволюционные стратегии, а также оригинальные вычислительные алгоритмы для многовариантного анализа, ускорения решения СЛАУ и оценки качества сетки. Кроме того, ведутся работы по интеграции схмотехнического симулятора, что позволяет полностью покрыть требуемая инструментарий разработчиков РЭС в части схмотехнического, квазистатического и электродинамического моделирования. Указанные программные средства исторически развиваются раздельно, поэтому на данный момент ведутся работы по их интеграции в разрабатываемую САПР, имеющую единый графический интерфейс пользователя. Далее рассмотрены особенности основных разрабатываемых программных средств, а также представлены некоторые результаты их работы.

**ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Программное средство FEM2D, реализованное на языке C++, предназначено для двумерного электростатического анализа произвольных многопроводных линий передачи (МПЛП) и кабелей на основе расчета их матриц первичных погонных параметров методом конечных элементов [3]. Графический интерфейс, а также некоторые вспомогательные процедуры для работы FEM2D реализованы с применением фреймворка Qt [4]. Средство включает в себя релактор геометрической модели и submodule управления, дискретизации, вычисления и визуализации. Алгоритм его работы приведен на рис. 1.

Построение геометрических моделей выполняется посредством использования геометрических примитивов. В ходе работы вычисляются матрицы коэффициентов электростатической (C) и электромагнитной (L) индукции, собственных и взаимных частичных емкостей, импедансов (Z) и др. Также выполняется построение картин распределения потенциалов (φ) и напряженности электрического поля (E). Submodule дискретизации формирует расчетную сетку по алгоритму триангуляции Делоне с использованием программной библиотеки Fade 2D [5]. При построении расчетной сетки происходит нумерация узлов и треугольников и их сопоставление с заданными электрофизическими параметрами анализируемой структуры. Полученная расчетная сетка отображается в submodule визуализации. На ее основе submodule вычисления формирует СЛАУ с разреженной матрицей, решение которой выполняется с использованием алгоритмов из библиотеки Armadillo [6]. Результатом вычисления являются потенциалы φ в узлах расчетной сетки. Полученная матрица потенциалов используется для вычисления матриц первичных погонных параметров. Submodule визуализации служит для отображения результатов вычислений. Так, пользователю доступны полученные матрицы, а также картины распределения потенциалов и электрического поля, визуализация которых производится при помощи библиотеки OpenGL [7] по алгоритму из [8].

На рис. 2 приведено поперечное сечение 3-проводного плоского кабеля [9]. Его параметры: относительные

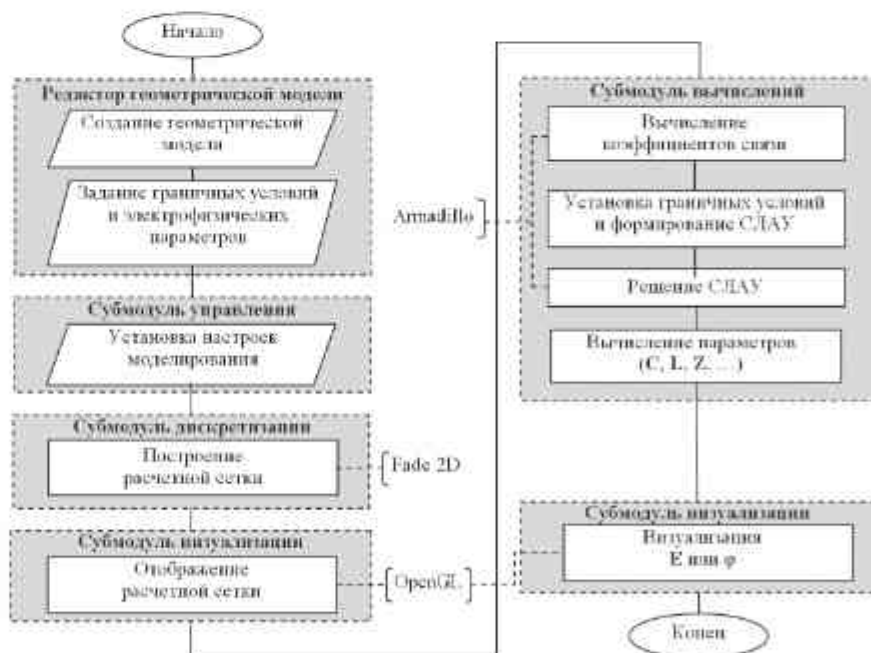
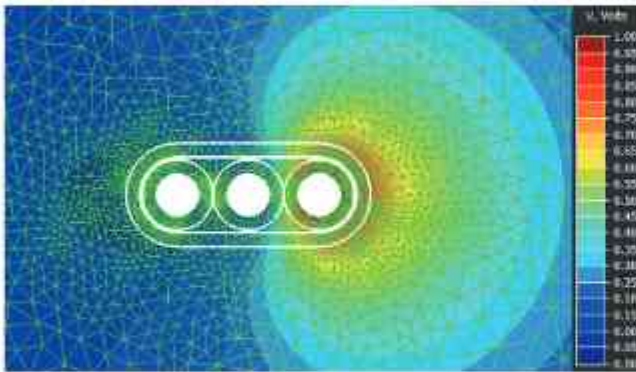
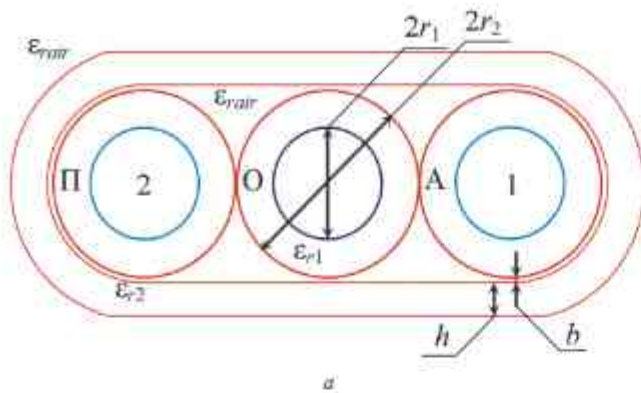


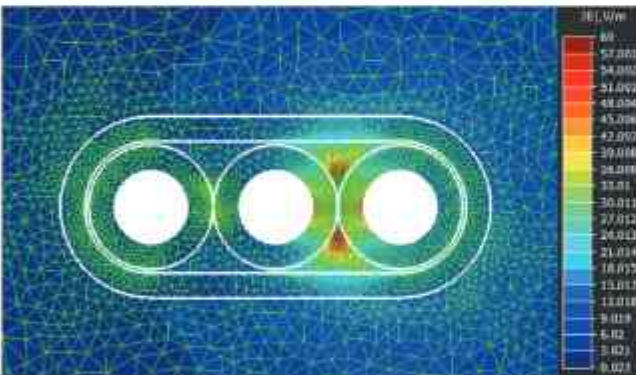
Рис. 1. Алгоритм работы FEM2D

Таблица 1. Матрицы C, L и Z для кабеля из рис. 2

Источник	C, пФ/м	L, нГн/м	Z, Ом/м
FEM2D	$\begin{bmatrix} 58,654 & -4,997 \\ -4,997 & 58,700 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 379,858 & 39,539 \\ 39,539 & 379,663 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 81,125 & 35,127 \\ 35,127 & 81,073 \end{bmatrix}$
FEMM	$\begin{bmatrix} 59,253 & -5,037 \\ -5,037 & 59,259 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 378,466 & 39,564 \\ 39,564 & 378,499 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 80,566 & 34,920 \\ 34,920 & 80,566 \end{bmatrix}$



б



в

Рис. 2. Геометрическая модель поперечного сечения 3-проводного плоского кабеля (П — пассивный, О — опорный, А — активный проводники) с дополнительной изоляцией (а) и распределения в нем потенциалов (б) и электрического поля (в)

диэлектрические проницаемости  $\epsilon_{r_{out}} = 1$ ,  $\epsilon_{r_1} = 3,5$  и  $\epsilon_{r_2} = 3$ ; радиусы проводников и изоляции  $r_1 = 1,4$  мм и  $r_2 = 2,4$  мм соответственно; толщина внешней изоляции  $h = 0,95$  мм; расстояние между внутренней и внешней изоляцией  $b = 0,15$  мм.

В табл. 1 приведены рассчитанные матрицы  $C$ ,  $L$  и  $Z$ , полученные в FEM2D и FEMM [10]. Результаты хорошо согласуются,

Таблица 2. Первая строка матрицы  $C$  для МПЛП из рис. 3

Источник	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$	$C_{15}$	$C_{16}$	$C_{17}$	$C_{18}$	$C_{19}$	$C_{10}$
FasterCap	96,7	-9,65	$-3,01 \cdot 10^{-1}$	$3,23 \cdot 10^{-2}$	$1,43 \cdot 10^{-2}$	$4,87 \cdot 10^{-3}$	$5,29 \cdot 10^{-3}$	$-2,03 \cdot 10^{-3}$	$-2,02e \cdot 10^{-2}$	$1,66 \cdot 10^{-2}$
PathWave ADS	91,74	-8,37	$-1,35 \cdot 10^{-1}$	$-1,99 \cdot 10^{-1}$	$-7,51 \cdot 10^{-1}$	$-7,78 \cdot 10^{-1}$	$-7,78 \cdot 10^{-1}$	$-7,75 \cdot 10^{-1}$	$-7,74 \cdot 10^{-1}$	$-8,49 \cdot 10^{-1}$
GNU Octave	98,48	-9,95	$-1,39 \cdot 10^{-1}$	$-5,11 \cdot 10^{-1}$	$-3,22 \cdot 10^{-1}$	$-8,37 \cdot 10^{-2}$	$-5 \cdot 10^{-2}$	$-3,45 \cdot 10^{-2}$	$-2,49 \cdot 10^{-2}$	$-2,44 \cdot 10^{-2}$

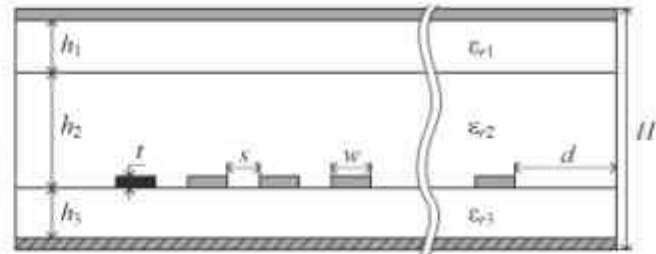


Рис. 3. Геометрическая модель поперечного сечения МПЛП

а максимальное поэлементное различие матриц — не более 1%. На рис. 2 также приведены полученные в FEM2D картины распределения напряженности электрического поля и потенциалов.

### ВЫЧИСЛЕНИЕ МАТРИЦ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ МЕТОДОМ МОМЕНТОВ

С использованием синтаксиса GNU Octave разработано программное средство для вычисления матриц коэффициентов электростатической и электромагнитной индукции методом моментов для произвольных МПЛП [11]. Построение поперечного сечения линии передачи выполняется посредством специальных синтаксических конструкций. Дискретизация области решения основана на разбиении границ поперечного сечения структуры на сегменты с возможностью настройки параметров сегментации (равномерная/неравномерная, проекционная и адаптивная, которая основана на апостериорных индикаторах ошибки вычисляемых параметров) [12]. Вычисленные матрицы  $C$  и  $L$  выводятся в текстовом виде, а параметры сегментации — в графическом. После вычисления матриц производится их проверка на выполнение критериев точности с выдачей сообщения о результатах проверки. В качестве критериев используются степень симметрии матрицы  $C$ , необходимость ее диагонального преобладания и отрицательности внедиагональных элементов. Кроме того, для микрополосковых МПЛП, если их одинаковые проводники расположены на одном уровне над диэлектрической подложкой, значения внедиагональных элементов матрицы по мере удаления от диагонального должны уменьшаться. Невыполнение этих критериев может оказать значительное влияние на физичность результатов последующих расчетов. Между тем в других программных средствах не осуществляют такой проверки.

На рис. 3 приведено поперечное сечение тестовой МПЛП из [13], а в табл. 2 — результаты элементы первой строки матрицы  $C$ , полученные в программных средствах FasterCap, PathWave ADS и GNU Octave. Видно, что только результаты из GNU Octave удовлетворяют установленным критериям. Так, не все внедиагональные элементы из FasterCap имеют отрицательные значения, а в PathWave ADS последний элемент по абсолютному значению превышает предыдущий.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕНН НА ОСНОВЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТРЕУГОЛЬНОЙ АППРОКСИМАЦИИ МЕТОДОМ МОМЕНТОВ**

На основе языка C++ разработано программное средство [14] для расчета радиотехнических характеристик (РТХ) антенн с использованием поверхностной аппроксимации, RWG-базисных функций и метода моментов [15]. Модель антенны импортируется в программное средство в формате *step*, а для ее триангуляции используются библиотеки CGAL [16] и Gmsh [17]. Кроме того, применяется несколько моделей источников возбуждения [18]. Все это позволяет использовать разработанное средство в образовательном процессе ТУСУР. Рассчитанные характеристики (коэффициент усиления, фазовая диаграмма направленности, амплитудная диаграмма направленности и др.) отображаются в графическом виде и могут быть сохранены в текстовом формате. Алгоритм работы программного средства приведен на рис. 4.

При вычислениях в диапазоне частот используется одна расчетная сетка, строящаяся для верхней границы частотного диапазона. На основе дискретизированной

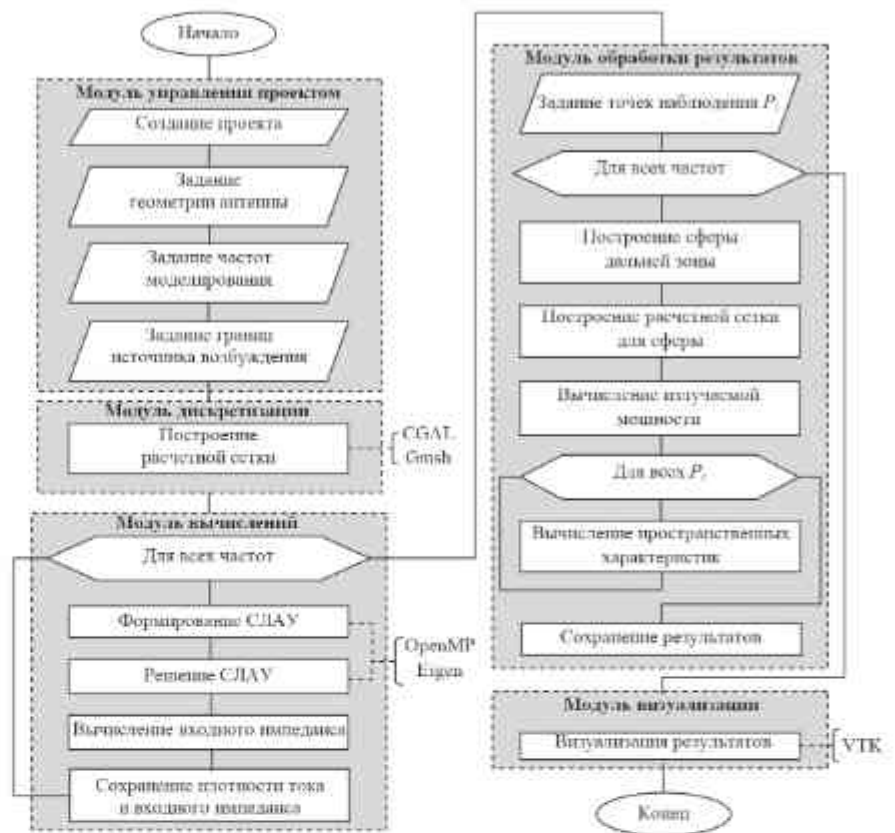


Рис. 4. Алгоритм работы программного средства для моделирования антенн на основе поверхностной треугольной аппроксимации методом моментов

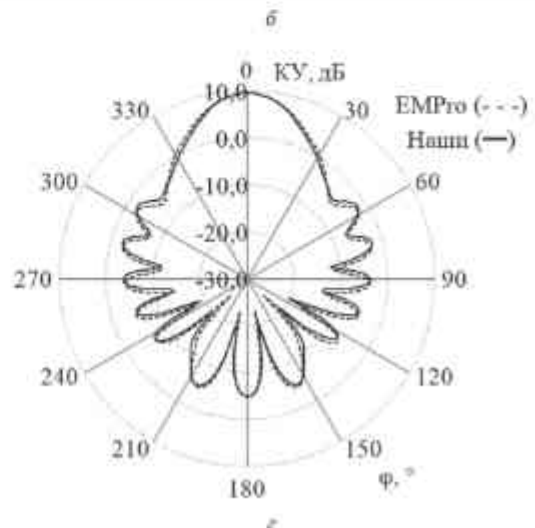
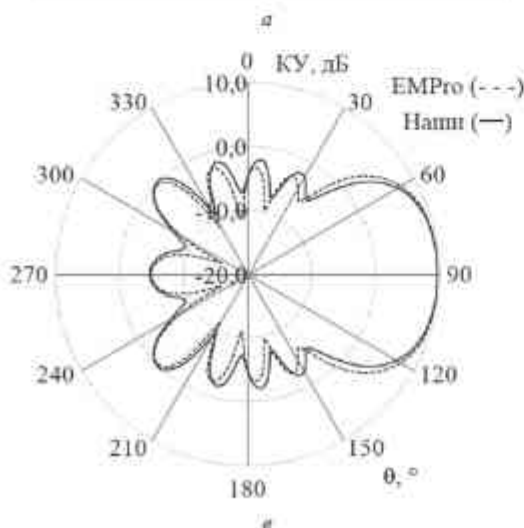
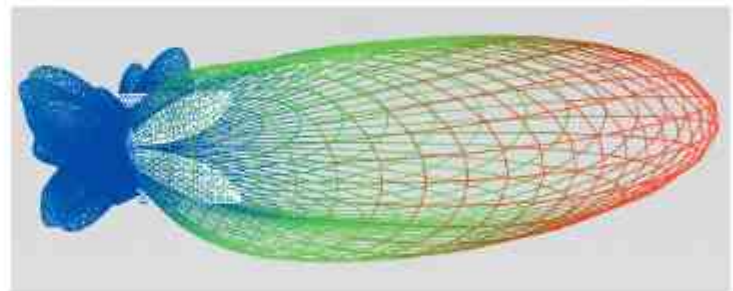
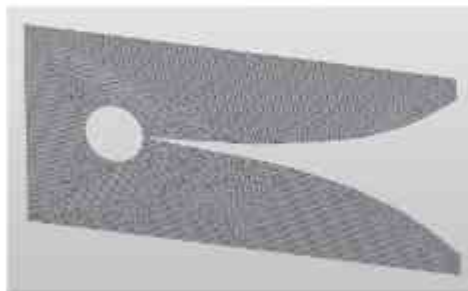


Рис. 5. Вычислительная сетка антенны Вивальди (а), КУ (б) и его проекции в плоскостях  $\varphi = 0^\circ$  (а) и  $\theta = 90^\circ$  (б) на частоте 2 ГГц

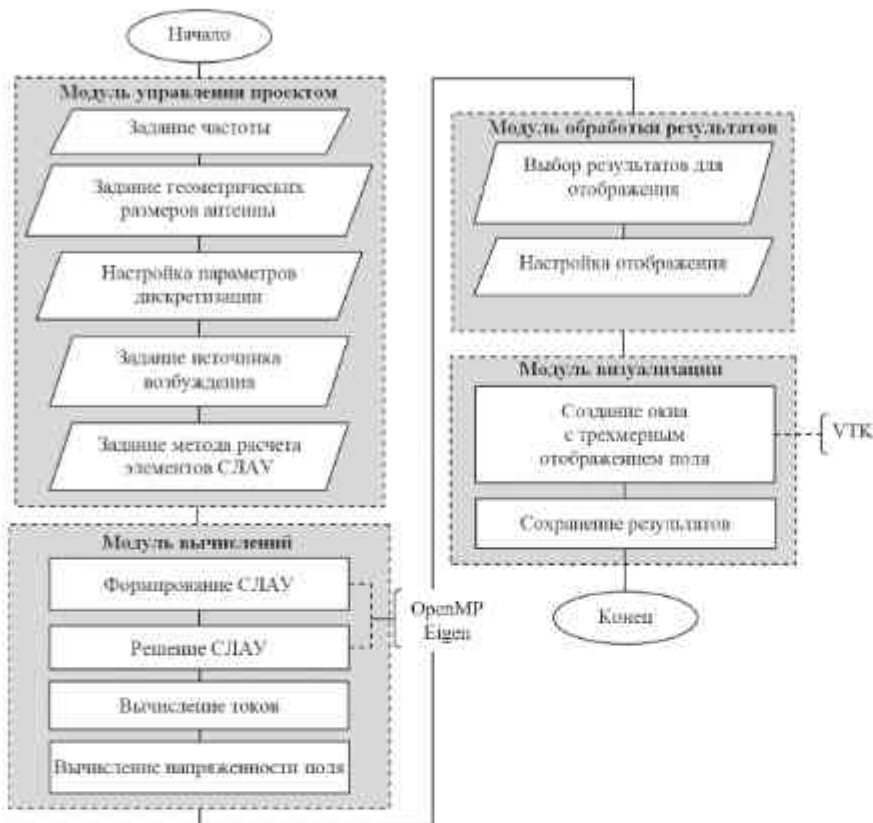


Рис. 6. Алгоритм работы программного средства для моделирования антенны на основе тонкопроводной аппроксимации методом моментов

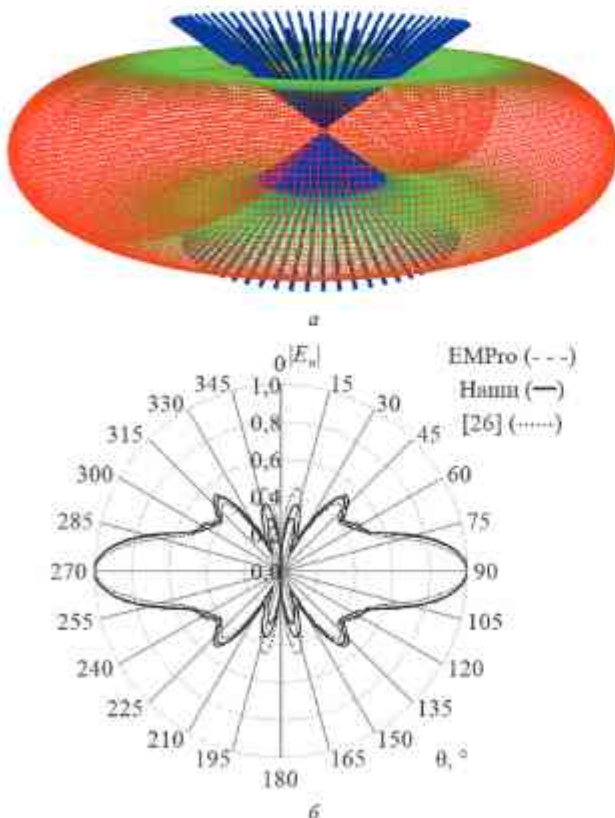


Рис. 7. ДН (а) и ее нормированная проекция в плоскости  $\varphi = 90^\circ$  (б) на частоте 1 ГГц для аппроксимированной проводами биконической антенны

модели антенны модуль вычисления формирует СЛАУ и выполняет ее решение на каждой заданной частоте с использованием процедур из библиотеки Eigen и директивы OpenMP. Затем полученные векторы плотностей поверхностных токов используются в модуле обработки результатов для вычисления РТХ антенны. Этот модуль также осуществляет формирование массивов данных для двумерного отображения характеристик излучения антенны в требуемых сечениях. Модуль визуализации служит для отображения трехмерной сцены, модели антенны и вычисленных пространственных характеристик. В нем также реализуются элементы графического интерфейса, служащие для вывода характеристик излучения на указанных плоскостях и полярной системе координат. Для реализации модуля используются библиотеки и средства разработки Qt, OpenCascade и VTK.

На рис. 5 приведены результаты вычисления коэффициента усиления (КУ) антенны Вивальди в разработанном программном средстве и САПР EMPro (метод конечных разностей во временной области). Видно, что результаты достаточно хорошо согласуются между собой.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕНН НА ОСНОВЕ ТОНКОПРОВОДНОЙ АППРОКСИМАЦИИ МЕТОДОМ МОМЕНТОВ

Разработано программное средство [19] для расчета РТХ антенны на основе тонкопроводной аппроксимации и метода моментов [20]. Построение модели антенны выполняется посредством внутреннего скриптового языка программы, а дискретизация области решения основана на разбиении поверхности модели на отрезки проводов. Рассчитанные РТХ (коэффициент усиления, фазовая диаграмма направленности, амплитудная диаграмма направленности и др.) отображаются в графическом виде и доступны для сохранения в текстовом формате. Алгоритм работы программного средства приведен на рис. 6.

Графический интерфейс разработан с применением фреймворка Qt. Для матричных вычислений использованы библиотека Eigen и директивы стандарта OpenMP. Отображения трехмерных данных реализованы с помощью VTK, а построение графиков — Qt [21]. У пользователя есть возможность ввода специальных команд, а также конструкций языков программирования (циклы, условия, функции). Кроме того, есть интерпретатор языка Python, позволяющий существенно расширить функционал системы за счет возможности написания скриптов на полноценном языке программирования, а также подключения сторонних библиотек. При разработке модулей использован язык программирования C++, выбор которого обусловлен его безопасностью, возможностью писать обобщенный код, работой с памятью на низком уровне, быстрым исполнением кода и продвинутой оптимизацией.

При вычислениях используются следующие правила [22]:

- длина провода и длина волны должны быть много больше его радиуса;

- провода сетки не должны пересекаться по длине друг с другом без образования угла;
- параллельные провода не должны находиться слишком близко друг к другу (расстояние между осями двух или более проводов, соединенных параллельно, должно превышать их наибольший радиус более чем в четыре раза);
- минимальным числом базисных функций для электрически закороченных проводов должно быть 3, а для электрически коротких и несимметричных антенн — 8–10;
- соотношение длин отрезков проводов, соединенных между собой, не должно превышать 10–15. При этом параллельные провода должны иметь одинаковое число сегментов (базисных функций);
- для каждого отдельного провода необходимо раздельно задавать число сегментов (базисных функций). При этом не рекомендуется использовать менее 8–10 сегментов;
- следует избегать использования очень коротких сегментов с длиной менее чем 0,0001 длины волны;
- длина сегментов должна более чем в 8–10 раз превышать их радиус;
- радиус провода при использовании проводной сетки определяется через площадь поверхности проводов (правило эквивалентной площади) [23];
- если проводная сетка покрывает поверхность, имеющую нерегулярную форму, то правило эквивалентной площади может быть обобщено [24].

На рис. 7 приведены ДН биконической антенны, полученные в разработанном программном средстве, САПР EMPro (метод конечных разностей во временной области) и по аналитическим

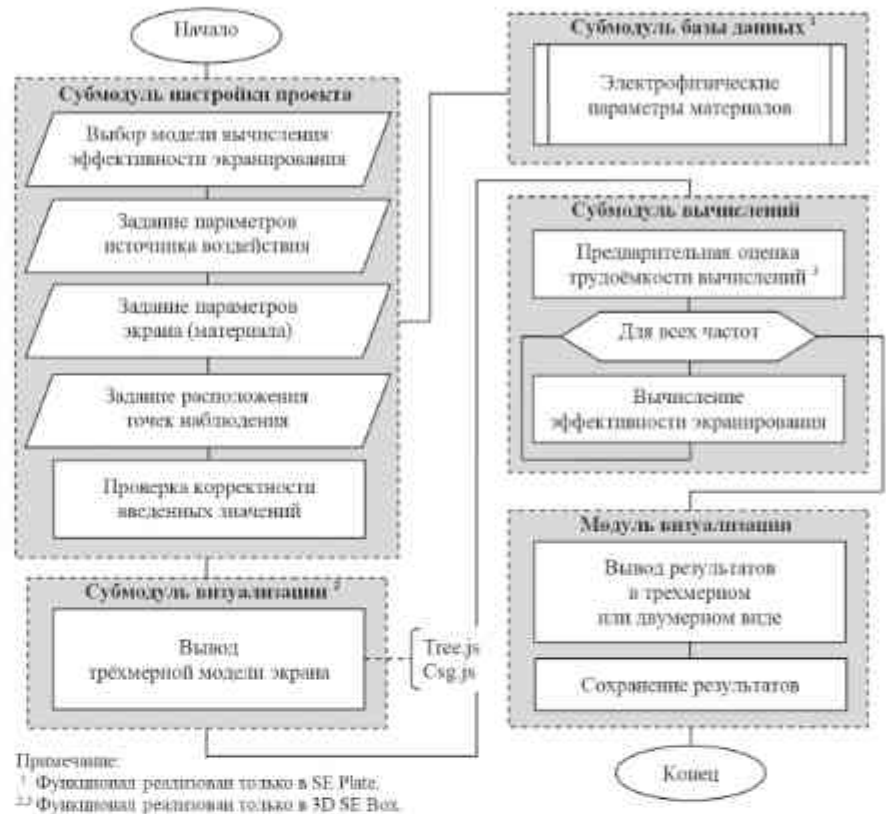


Рис. 8. Обобщенный алгоритм работы программных средств 3D SE Box и SE Plate для вычисления ЭЭ

выражениям из работы [25]. Видно, что результаты достаточно хорошо согласуются между собой.

### ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ КОРПУСОВ РЭС И ИХ МАТЕРИАЛОВ

Для вычисления эффективности экранирования (ЭЭ) корпусов РЭС, а также материалов, применяющихся для их изготовления, разработаны программные средства 3D SE Box [26] и SE

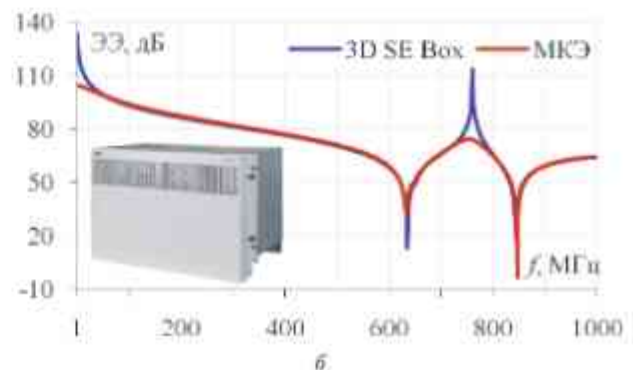
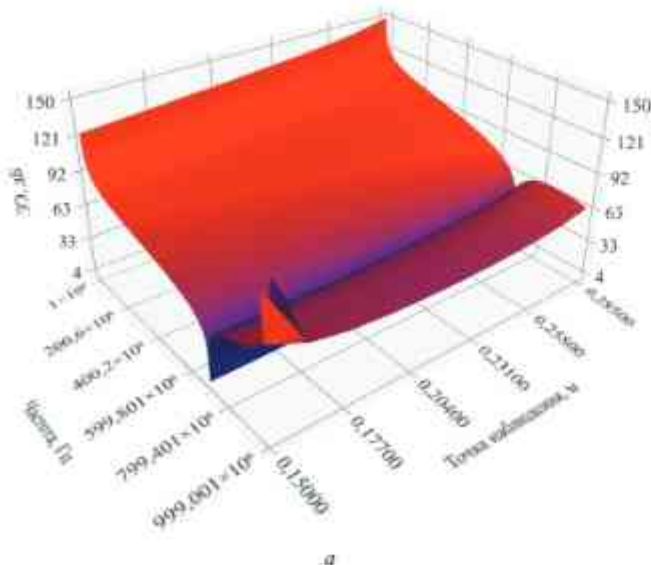


Рис. 9. Пример трёхмерного отображения ЭЭ (а) и частотные зависимости ЭЭ корпуса мультиплексора ABB FOXS15 (б)

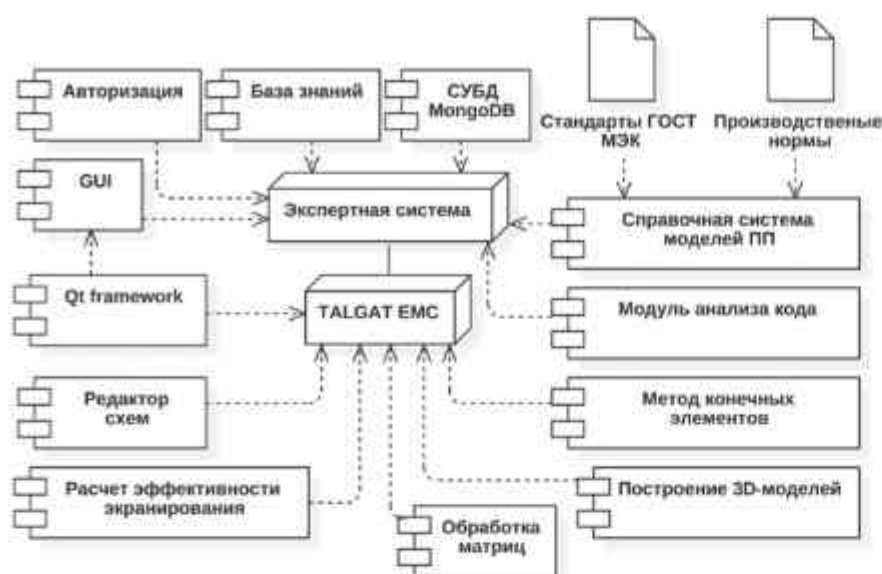


Рис. 10. Диаграмма компонентов прототипа ЭС

Plate [27], основанные на аналитических математических моделях, в том числе самостоятельно разработанных автором [28]. Программные средства созданы на основе языка программирования C++ с применением среды разработки Qt и библиотек Tree.js и Csg.js (JavaScript). Обобщенный алгоритм работы двух разработанных программ представлен на рис. 8. На первом шаге пользователь задает параметры для вычисления, а также выбирает необходимую аналитическую модель. При этом во избежание ошибок ввода в обоих программных средствах выполняется автоматическая проверка корректности (физичности) заданных параметров. Кроме того, для удобного использования программы 3D SE Vox в ее интерфейсе добавлена интерактивная трехмерная модель корпуса ПЭС, которая видоизменяется в зависимости от введенных пользователем параметров [29], а при настройке проекта в SE Plate имеется возможность применения встроенной базы данных, содержащей электрофизические параметры широко распространенных металлов

и композитных материалов [30]. На следующем шаге на основе заданных параметров вычисляется ЭЭ. Перед этим в 3D SE Vox производится предварительная оценка времени вычисления и объема требуемой для них памяти, что позволяет объективно оценить целесообразность вычисления в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. На завершающем шаге работы программ производится вывод полученных результатов и при необходимости их сохранение в текстовый файл. Отличительной чертой разработанных программных средств является возможность вычисления и трехмерной визуализации ЭЭ в зависимости от частоты источника воздействия и расположения точки наблюдения. Пример трехмерной зависимости ЭЭ для среднегабаритного корпуса ПЭС из стандарта [2] представлен на рис. 9а.

### ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА

Развитие экспертных систем (ЭС) позволяет ускорить процесс разработки ПЭС и повысить их надежность за счет использования накопленного опыта экспертов и общепринятых правил, используемых в процессе проектирования. Это особенно актуально при необходимости учета требований ЭМС [31]. В частности, использование ЭС позволяет сократить время работы разработчика с инструментами САПР за счет накопленной базы знаний, содержащей в себе базу правил и фактов, сформированных в виде логических утверждений. Поэтому для систематизации большого опыта моделирования различных ПЭС в ТУСУР также разрабатывается ЭС, являющаяся своего рода «надстройкой» над разрабатываемой САПР и включающая в себя, помимо прочего, базу данных помеховых сигналов [32], максимальных допустимых уровней согласно нормативной документации, специализированный математический инструментальный для оценки и проверки проектных норм. Кроме того, она будет предназначена для автоматизированных испытаний микроконтроллеров на излучаемую помехозащиту и восприимчивость и позволит организовать модульное тестирование блоков микроконтроллера с учетом их реализации и функционирования. Разрабатываемая ЭС фактически сопряжена с системой TALGAT для отладки и апробации режимов ее работы [33].

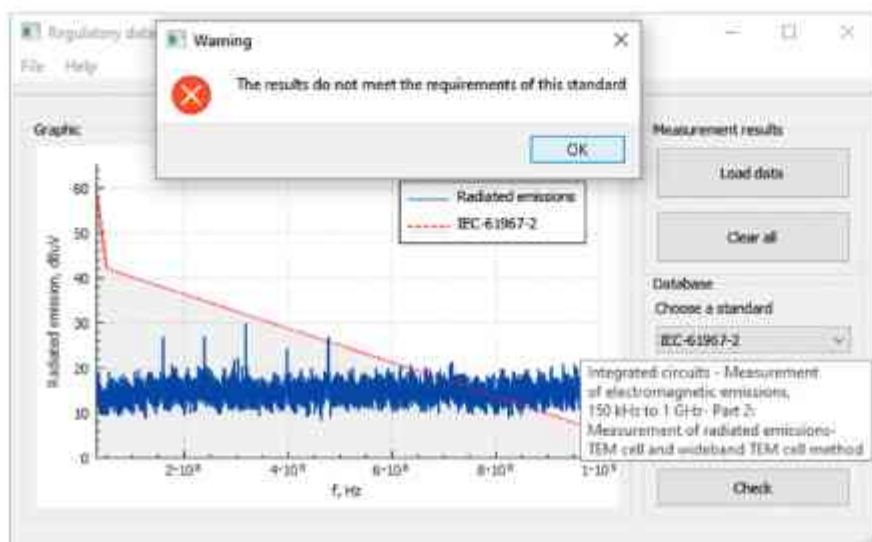


Рис. 11. Пользовательский интерфейс программного модуля для проверки на соответствие требованиям стандартов по ЭМС и пример его использования для оценки излучаемой помехозащиты микроконтроллера

и композитных материалов [30]. На следующем шаге на основе заданных параметров вычисляется ЭЭ. Перед этим в 3D SE Vox производится предварительная оценка времени вычисления и объема требуемой для них памяти, что позволяет объективно оценить целесообразность вычисления в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. На завершающем шаге работы программ производится вывод полученных результатов и при необходимости их сохранение в текстовый файл. Отличительной чертой разработанных программных средств является возможность вычисления и трехмерной визуализации ЭЭ в зависимости от частоты источника воздействия и расположения точки наблюдения. Пример трехмерной зависимости ЭЭ для среднегабаритного корпуса ПЭС из стандарта [2] представлен на рис. 9а.

На рис. 9б приведены результаты вычисления частотной зависимости ЭЭ для корпуса мультиплексора AVB FOX515 с перфорированной лицевой стенкой, выполненных в программном средстве 3D SE Vox и с помощью численного метода конечных элементов. Видно, что частотные зависимости хорошо согласуются, а среднее отклонение результатов не превышает 1,6 дБ.

### ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА

Развитие экспертных систем (ЭС) позволяет ускорить процесс разработки ПЭС и повысить их надежность за счет использования накопленного опыта экспертов и общепринятых правил, используемых в процессе проектирования. Это особенно актуально при необходимости учета требований ЭМС [31]. В частности, использование ЭС позволяет сократить время работы разработчика с инструментами САПР за счет накопленной базы знаний, содержащей в себе базу правил и фактов, сформированных в виде логических утверждений. Поэтому для систематизации большого опыта моделирования различных ПЭС в ТУСУР также разрабатывается ЭС, являющаяся своего рода «надстройкой» над разрабатываемой САПР и включающая в себя, помимо прочего, базу данных помеховых сигналов [32], максимальных допустимых уровней согласно нормативной документации, специализированный математический инструментальный для оценки и проверки проектных норм. Кроме того, она будет предназначена для автоматизированных испытаний микроконтроллеров на излучаемую помехозащиту и восприимчивость и позволит организовать модульное тестирование блоков микроконтроллера с учетом их реализации и функционирования. Разрабатываемая ЭС фактически сопряжена с системой TALGAT для отладки и апробации режимов ее работы [33].

Диаграмма компонентов прототипа ЭС приведена на рис. 10.

Для проверки соответствия результатов моделирования и измерений требованиям и рекомендациям международных и российских стандартов по ЭМС разработан программный модуль. Данный вид проверки предоставляет оператору дополнительную информацию о соответствии характеристик модели предельным установленным нормам. Интерфейс прототипа модуля представлен на рис. 11, где также показан процесс проверки соответствия уровня излучаемой помехи миссии микроконтроллера требованиям стандарта МЭК 61967-2.

Разработан прототип программного модуля анализатора кода языка системы TALGAT, который выполняет проверку правил построения типовых структур. Функциональные возможности прототипа позволяют выявлять различные ошибки в процессе моделирования на начальном этапе их проектирования, при этом процедура вычисления не будет начата до момента их устранения. Интерфейс анализатора кода состоит из трех рабочих областей. Область *Insert structures code* необходима для загрузки кода модели, разработанной в системе TALGAT. Вторая область *Structure* предназначена для графического отображения структуры модели. В третьей области *Variable* находятся переменные анализируемой модели и их значения. В случае выявления ошибок в коде программа выделяет желтым цветом строку, содержащую ошибку, и отображает информационное окно, содержащее список ошибок и справочную информацию с рекомендациями по их устранению (рис. 12).

### НОВИЗНА РЕЗУЛЬТАТОВ

Авторы считают, что в данной работе новым является следующее: на основании совокупности оригинальных авторских научных результатов разработаны программные средства для электростатического и электродинамического моделирования РЭС, в том числе с учетом ЭМС. Они могут быть использованы в качестве вычислительных модулей отечественной САПР.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описаны основные функциональные возможности разработанных в ТУСУР программных средств для электростатического и электродинамического моделирования элементов РЭС с учетом ЭМС. В программных средствах использовано несколько численных методов и аналитических математических моделей. Работы по созданию новых программных средств и расширению имеющихся функциональных возможностей ведутся постоянно, поэтому авторы открыты к любому научному и практическому сотрудничеству.

*Работа выполнена при поддержке грантов Минобрнауки РФ FEWM-2022-0001 и FEWM-2020-0039.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Газизов Т.Р., Заболотский А.М., Куксенко С.П., Газизов Т.Т., Квасников А.А., Комнатной М.Е., Суворовцев Р.С. Моделирование элементов критичной радиоэлектронной аппаратуры: новые подходы, модели и алгоритмы, их реализация и применение // Наноиндустрия, 2020. — Т. 13. — № S5-2 (102). — С. 425–432.

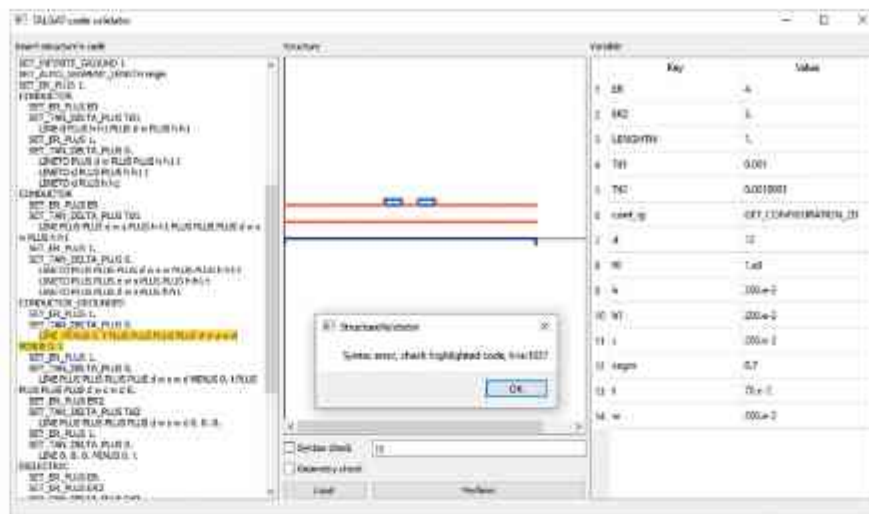


Рис. 12. Пользовательский интерфейс синтаксического анализатора кода ЭС

2. IEEE Std 1597.1-2008. Standard for validation of computational electromagnetics computer modeling and simulation, 2008. — 41 p.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021660469 РФ. FEM2D 2021 / Ключкин Д.В., Квасников А.А., Куксенко С.П., Ипанов А.А., Комнатной М.Е. — Заявка №2021619672. Дата поступления 23.06.2021. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 25.06.2021.

4. One framework. One codebase. Any platform. [Электронный ресурс]: Qt | Cross-platform software development for embedded & desktop. — URL: <https://www.qt.io> (дата обращения: 20.06.2022).

5. Delaunay Triangulation Libraries 2D/2.5D [Электронный ресурс]: Delaunay Triangulation C++ Library for 2D and 2.5D point clouds. URL: <http://www.geom.at/products/fade2d> (дата обращения: 20.06.2022).

6. Armadillo [Электронный ресурс]: Armadillo C++ library for linear algebra & scientific computing. — URL: <http://arma.sourceforge.net> (дата обращения: 20.06.2022).

7. The Industry's Foundation for High Performance Graphics [Электронный ресурс]: OpenGL — The Industry Standard for High Performance Graphics. — URL: <https://www.opengl.org> (дата обращения: 20.06.2022).

8. Мочалов Д.М., Ключкин Д.В. Алгоритмы визуализации результатов моделирования линий передачи методом конечных элементов // Электронные средства и системы управления, 2021. — Ч. 2. — С. 41–43.

9. Belousov A. O., Vlasova N. O., Gordeyeva V. O., Gazizov T. R. Breaking the Symmetry of Cable Structures as an Instrument for Improving Modal Decomposition to Protect Critical Equipment against UWB Pulses // Symmetry, 2022. №6 (14). P. 1228.

10. Finite Element Method Magnetics [Электронный ресурс]: Home Page: Finite Element Method Magnetics. — URL: <http://www.FEMM.info> (дата обращения: 20.11.2022).

11. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2022662895. Программа для расчета матриц коэффициентов электростатической и электромагнитной индукции методом моментов. Авторы: Максимов А.Е., Куксенко С.П. Заявка №2022662295. Дата поступления 01.07.2022. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ: 07.07.2022.





12. Максимов А. Е., Куксенко С. П. Исследование методов построения адаптивных сеток при квазистатическом анализе многопроводных линий передачи методом моментов // Журнал радиоэлектроники, 2021. — № 1. — С. 1–25.
13. Maksimov A. E., Kuksenko S. P. Accurate capacitance matrices for multiconductor transmission lines // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2022. Vol. 64. № 5. P. 1514–1521.
14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680875 РФ. Программа для моделирования антенн на основе поверхностной треугольной аппроксимации. Квасников А. А., Демаков А. В., Ключин Д. В., Иванов А. А., Алхадж Хасан А., Максимов А. Е., Куксенко С. П. Заявка № 2022680455. Дата поступления 02.11.2022. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 08.11.2022.
15. Rao S., Wilton D., Glisson A. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape // IEEE Transactions on antennas and propagation, 1982. Vol. 30. № 3. P. 409–418.
16. CGAL. официальный сайт The Computational Geometry Algorithms Library [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.graphics.rwth-aachen.de/software/openmesh/intro> (дата обращения: 20.11.2022).
17. Gmsh. официальный сайт Gmsh [Электронный ресурс]. — URL: <https://gmsh.info> (дата обращения: 20.11.2022).
18. Квасников А. А., Демаков А. В., Иванов А. А., Ключин Д. В., Комнатнов М. Е., Куксенко С. П. Система компьютерного моделирования антенн методом моментов // Системы управления, связи и безопасности, 2022. — № 1. — С. 49–66.
19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022681597 РФ. Программа для моделирования антенн на основе тонкопроводной аппроксимации / Гализов Т. Р., Квасников А. А., Алхадж Хасан А., Онищенко И. А., Куксенко С. П. — Заявка № 2022680447. Дата поступления 02.11.2022. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 15.11.2022.
20. Harrington R. F. Field computation by moment methods. — NY: Macmillan, 1968. — 240 p.
21. Qwt [электронный ресурс]. — URL: <https://qwt.sourceforge.io> (дата обращения 20.11.2022).
22. Alhaj Hasan A., Klyukin D. V., Kvasnikov A. A., Komnatnov M. E., Kuksenko S. P. On wire-grid representation for modeling symmetrical antenna elements // Symmetry, 2022. Vol. 14 (7). P. 1354.
23. Ludwig C. Wire grid modeling of surfaces // IEEE Transactions on antennas and propagation, 1987. Vol. AP-35. № 9. P. 1045–1048.
24. Trueman W., Kubina S. J. Fields of complex surfaces using wire grid modeling // IEEE Transactions on magnetics, 1991. Vol. 27. № 5. P. 4262–4267.
25. Papas C. H., King R. Radiation from wide-angle conical antennas fed by a coaxial line // Proceedings of the IRE, 1951. Vol. 39. P. 49–51.
26. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020615414 РФ. 3D SE BOX 2020 / А.А. Квасников, А.А. Иванов, С.П. Куксенко, М.Е. Комнатнов — Заявка № 2020614561. Дата поступления 21.05.2020. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22.05.20.
27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021660961 РФ. Вычисление эффективности экранирования металлов, сплавов и композиционных материалов / А.А. Иванов, И.А. Онищенко, А.А. Квасников, М.Е. Комнатнов. — Заявка № 2021619699. Дата поступления 23.06.2021. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 05.07.2021.
28. Иванов А. А. Методы программы и устройство для оценки эффективности экранирования типовых экранирующих конструкций радиоэлектронных средств: дис. ... канд. тех. наук: 2.2.13 / Иванов Антон Андреевич. — Томск, 2021. — 184 с.
29. Иванов А. А., Квасников А. А., Куксенко С. П., Комнатнов М. Е. Прототип программного модуля для оценки эффективности экранирования корпусов радиоэлектронных средств // Технологии электромагнитной совместимости, 2019. — № 4 (71). — С. 5–15.
30. Ivanov A. A., Kvasnikov A. A., Onishchenko I. A. et al. Analytical model and software for evaluating the shielding materials properties // International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electronic devices (EDM 2021). Russia, 30 June–4 July 2021. P. 1–4.
31. Квасников А. А., Куксенко С. П. Обзор экспертных систем по электромагнитной совместимости технических средств // Доклады ТУСУР, 2021. — Т. 24. — № 4. — С. 7–18.
32. Свидетельство о государственной регистрации БД № 2021622840. База данных кондуктивных помеховых сигналов / Квасников А. А., Куксенко С. П., Гализов А. Т., Зиновьев К. Е. — Заявка 2021622763. Дата поступления 30.11.2021. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 09.12.2021.
33. Kvasnikov A. A., Kuksenko S. P., Idrisov F. F. Prototype of EMC Expert system for optimal design of radioelectronic equipment // Journal of physics: conference series, 2021. Vol. 1862. № 012022. P. 1–6.