

# Программное обеспечение для проектирования оптимальной сети высоковольтного электропитания космического аппарата

А.А. Квасников, С.П. Куксенко, А.А. Иванов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск,  
aleksejkvasnikov@gmail.com

**Аннотация** — Описана типовая процедура автоматизированного проектирования оптимальной сети высоковольтного электропитания космического аппарата. Приведены общие сведения о системе моделирования электромагнитной совместимости TALGAT. Описаны её новые подсистемы для проектирования технических решений по синтезу и мониторингу сети высоковольтного электропитания космических аппаратов. Рассмотрены функциональные возможности разработанных подсистем и описано их использование для проектирования сети высоковольтного электропитания космического аппарата.

**Ключевые слова** — оптимальная сеть высоковольтного электропитания, силовая шина электропитания, электромагнитная совместимость, проектирование, базы данных, имитационное моделирование.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В силовой электронике паразитные параметры могут привести к нестабильной работе активных элементов из-за перенапряжений, падения напряжения, дисбаланса токов, резонанса в конденсаторах и т.д. [1, 2]. Для снижения влияния паразитных параметров электрических соединений в контурах тока между источником и потребителем применяют силовые шины электропитания (СШЭП). Разработка СШЭП является комплексной задачей, которая включает в себя проведение имитационного моделирования поведения сети электропитания при воздействии на нее полезных и помеховых сигналов, выявление мест превышения допустимых уровней сигналов в узлах сети, построение оптимальной (с точки зрения помехоустойчивости, помехозащищенности, надежности и уменьшения массы) топологии сети электропитания в зависимости от нагрузочных характеристик имитаторов нагрузки. Поэтому поиск решения многокритериальной задачи по проектированию оптимальной СШЭП в целях повышения ее помехозащищенности и надежности является трудоемким процессом, при котором целесообразно использование средств специализированного программного обеспечения (ПО). Анализ современных тенденций показывает, что разработка данного класса ПО ведется в направлении повышения уровня эффективности использования программных средств и включает в себя расширение функциональных возможностей систем, связанное с увеличением количества задач, решаемых ПО в данной прикладной области, а также разработку интуитивного интерфейса пользователя и внедрение элементов экспертной си-

стемы, что позволяет разработчикам более эффективно решать поставленные задачи [3,4]. Цель данной работы – демонстрация результатов разработки ПО для проектирования технических решений по синтезу и мониторингу оптимальной сети высоковольтного электропитания (ОСВЭ) космического аппарата.

Разработанное ПО состоит из нескольких подсистем, каждая из которых может быть применена на разных этапах проектирования ОСВЭ. В состав ПО входят подсистемы: проектирования топологии ОСВЭ; проектирования технических решений по синтезу и мониторингу ОСВЭ; баз данных (БД); импорта и экспорта информации; локализации превышения допустимых уровней сигналов в узлах сети; поддержки принятия решений; оценки эффективности экранирования. При этом разработанное ПО применимо для проектирования сетей электропитания произвольного назначения, в том числе для радиоэлектронных средств, используемых в космической, транспортной, военной и других отраслях промышленности.

## II. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМЕ

Типовая процедура автоматизированного проектирования ОСВЭ включает в себя 4 основных этапа: задание исходных данных; моделирование; анализ и обработка результатов; вывод результатов. На первом этапе производится задание структуры ОСВЭ, геометрических размеров её элементов, а также параметров полезных и помеховых сигналов, воздействующих на сеть электропитания. Для осуществления процедур, предусмотренных на первом этапе, ПО должно включать в себя: графический редактор, пригодный для проектирования топологии ОСВЭ и базу данных сигналов, которые потенциально могут воздействовать на сеть электропитания. На этапе моделирования выполняются процедуры расчёта погонных параметров двумерных структур проводников и диэлектриков, имитационного моделирования сети электропитания, оценки эффективности экранирования (ЭЭ) элементов и устройств ОСВЭ. При этом необходимо, чтобы ПО содержало соответствующие подсистемы и модули, реализующие математические модели и вычислительные алгоритмы процедур этапа моделирования. На третьем этапе производится анализ и оценка процессов, происходящих в моделируемом объекте, оптимизация параметров моделируемых структур проводников и диэлектриков. Для реализации процедур этапа анализа, ПО должно включать в себя модули одно- и

многовариантного анализа структур проводников и диэлектриков, а также подсистемы, позволяющие дополнить анализ уровней сигналов в узлах сети. На этапе вывода информации осуществляется отображение результатов расчёта и моделирования, формирование и вывод справочно-аналитической информации на основе выбранного критерия оптимизации. Для этого необходимо, чтобы ПО включало в себя модули и подсистемы, реализующие механизмы графического вывода результатов расчета и формирования справочно-аналитической информации на основании этих результатов.

Исходя из описанных функциональных требований, в качестве основы для разработки ПО, выбрана отечественная система моделирования электромагнитной совместимости TALGAT, возможности которой были расширены за счет внедрения новых подсистем [5].

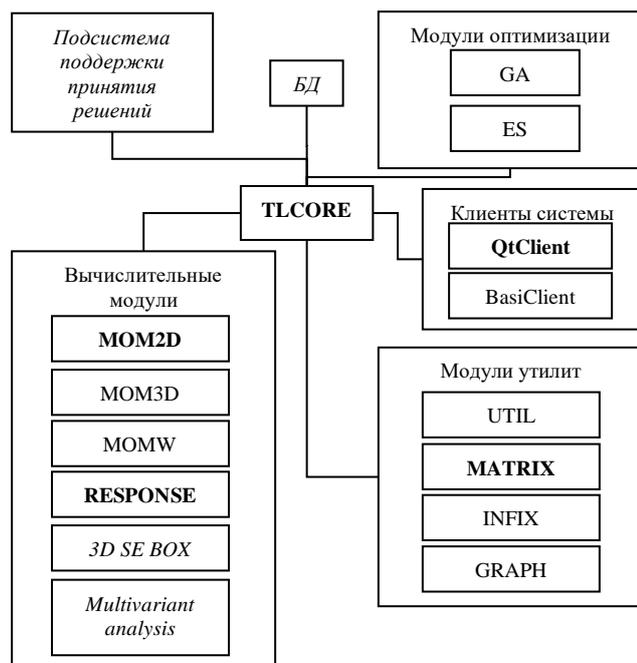


Рис. 1. Структурная схема разработанного ПО на основе системы TALGAT

Общая структурная схема разработанного ПО представлена на рис. 1. Курсивом отмечены новые подсистемы, полужирным шрифтом – подсистемы, функционал которых был доработан. В состав разработанного ПО входят: ядро системы (TLCORE); вычислительные модули (MOM2D – двухмерный квазистатический анализ структур из проводников и диэлектриков, MOM3D – трехмерный квазистатический анализ, RESPONSE – вычисление откликов вдоль отрезков многопроводных линий передачи произвольных схем, MOMW – электродинамический анализ проводных структур, 3D SE BOX – оценка эффективности экранирования, Multivariant analysis – многовариантный анализ погонных параметров произвольных двухмерных структур из проводников и диэлектриков); клиенты системы (графическая оболочка); модули оп-

тимизации (ES – эволюционные стратегии, GA – генетические алгоритмы); подсистемы принятия решений и баз данных; вспомогательные модули утилит.

### III. ПОДСИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО СИНТЕЗУ И МОНИТОРИНГУ ОСВЭ

Как было отмечено выше, для проектирования ОСВЭ ПО должно обладать рядом функциональных возможностей. В данном разделе представлено описание подсистем, вошедших в состав системы TALGAT, и ранее разработанных подсистем, без упоминания которых дальнейшее описание системы будет неполным. Так, в список подсистем вошли: подсистема проектирования топологии ОСВЭ, используемая при создании схемы СШЭП; подсистема проектирования технических решений, применяемая при проведении имитационного моделирования поведения сети электропитания при воздействии на нее полезных и помеховых сигналов; подсистема БД, которая содержит готовые технические решения (алгоритмы, структуры) по синтезу и мониторингу ОСВЭ и оцифрованные помеховые сигналы, которые могут использоваться при проведении имитационного моделирования поведения сети; подсистема импорта и экспорта информации, служащая для упрощения и автоматизации процесса наполнения баз данных системы и подготовки отчетов по результатам расчета системы; подсистема локализации превышения допустимых уровней сигнала в сети, используемая для оценки процессов, происходящих в моделируемом объекте; подсистема поддержки принятия решений, используемая для формирования отчетов на основе нормирующих параметров сигналов, воздействующих на сеть электропитания; подсистема оценки эффективности экранирования, применяемая для расчёта и трехмерного отображения ЭЭ элементов и устройств ОСВЭ. Далее кратко рассмотрены ключевые особенности каждой из подсистем.

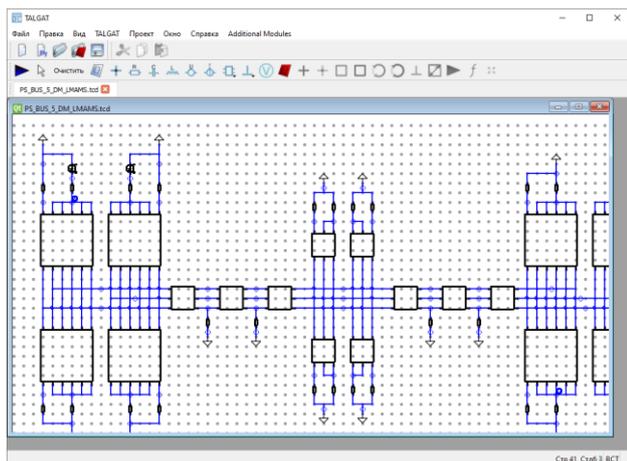
#### A. Подсистема проектирования топологии ОСВЭ

Для построения произвольной топологии ОСВЭ из отрезков регулярных линий передачи и эмуляции нагрузок в виде схем из элементов с сосредоточенными параметрами использован функционал ранее реализованного графического редактора системы TALGAT [6]. Окно графического редактора подсистемы проектирования топологии ОСВЭ представлено на рис. 2. Построение схемы производится посредством взаимодействия с графическими элементами верхнего меню редактора системы.

#### B. Подсистема проектирования технических решений

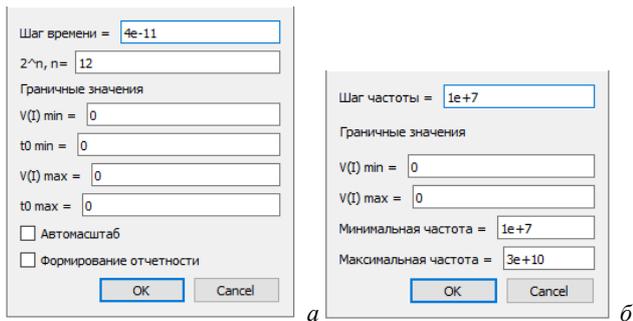
Для вычисления частотного и временного откликов при проведении имитационного моделирования поведения сети электропитания при воздействии на нее полезных и помеховых сигналов может быть использован ранее разработанный модуль системы TAGLAT – RESPONSE [7]. Работа модуля основывается на применении скриптового языка ядра системы TALGAT двумя способами: с помощью непосредственного составления алгоритмов на скриптовом язы-

ке и с помощью взаимодействия с пользовательским интерфейсом программы, описанного в предыдущем подразделе.



**Рис. 2. Графический редактор подсистемы проектирования топологии ОСВЭ**

Настройка алгоритма временного анализа производится с помощью ввода входных данных в окно соответствующих настроек (рис. 3а). Для временного анализа пользователю доступно задание шага времени и числа отсчетов по времени. Предусмотрены детальные настройки графического отображения откликов. Также доступна функция автоматического масштабирования графика. В нижней части интерфейса расположена флаговая кнопка «Формирование отчетности», служащая для запуска подсистемы аналитической и информационно-справочной поддержки принятия решений.

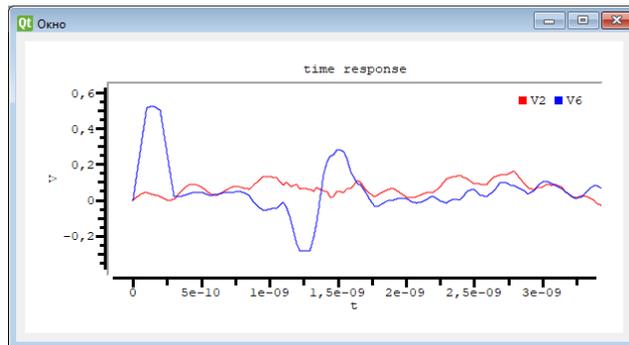


**Рис. 3. Окна настроек временного (а) и частотного (б) анализов**

Интерфейс окна настроек частотного анализа представлен на рис. 3б. Окно содержит входные поля для задания диапазона частот, шага по частоте и минимального и максимального значений напряжений. После задания параметров подсистема генерирует код, который выполняется ядром системы. В результате выполнения кода, система автоматически отображает окно, содержащее графическое отображение результирующего отклика.

На рис. 4 представлен пример отображения временного отклика. Окно отображения отклика полностью интерактивно и предоставляет пользователю воз-

можности масштабирования графика, навигации по нему и изменения положения легенды.

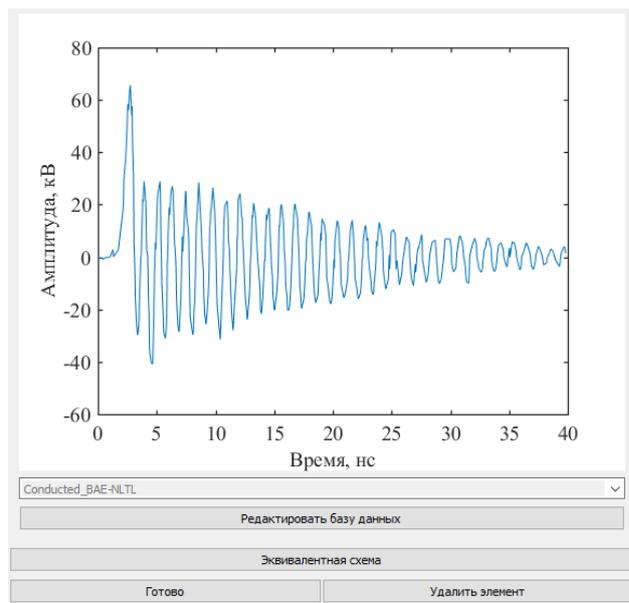


**Рис. 4. Пример отображения временного отклика**

### С. Подсистема баз данных

Разработанная подсистема БД состоит из баз потенциально опасных сигналов сверхкоротких импульсов и готовых технических решений по проектированию ОСВЭ [8]. Подсистема предназначена для хранения пользовательских и предварительно созданных технических решений, а также оцифрованных сигналов, используемых другими подсистемами.

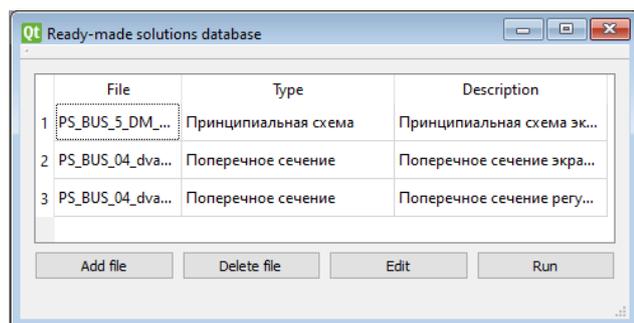
При разработке БД сигналов использованы оцифрованные сигналы, полученные из публично зарегистрированных генераторов высоковольтных импульсов, которые могут быть рассмотрены как потенциальные источники преднамеренных электромагнитных помех [9]. Доступ к базе данных помеховых сигналов осуществляется с помощью взаимодействия с элементом «Источник напряжения» графического редактора подсистемы проектирования топологии. Интерфейс окна выбора сигнала представлен на рис. 5.



**Рис. 5. Интерфейс окна выбора сигнала из БД**

На рис. 6 представлен интерфейс окна БД готовых технических решений. Верхняя часть окна содержит таблицу элементов БД, в которой указаны: название

файла, его тип (принципиальная схема, поперечное сечение, готовый сценарий) и описание. Также реализован функционал редактирования БД и охранный механизм, препятствующий редактированию предоставленных элементов БД.

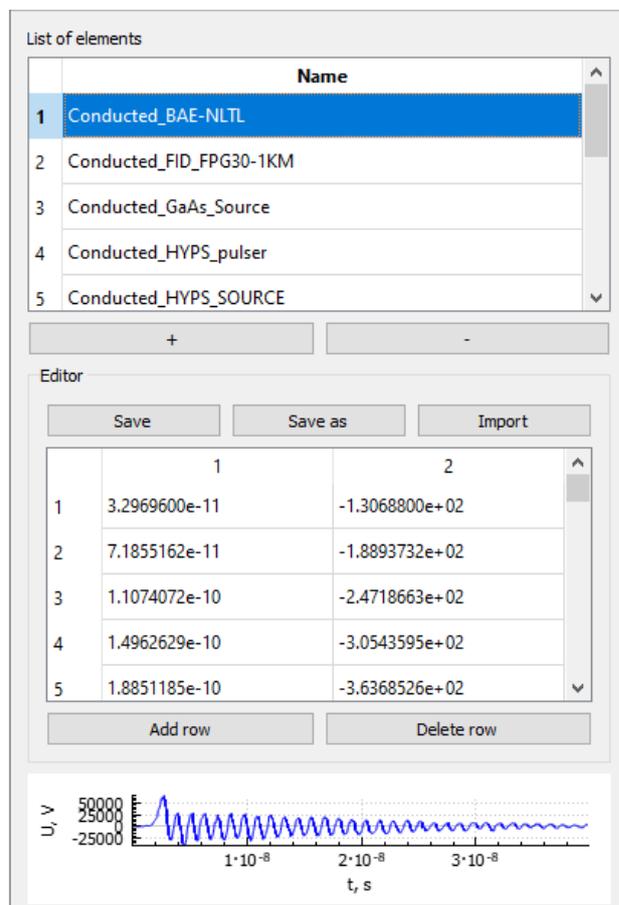


**Рис. 6. Интерфейс окна БД готовых технических решений**

#### D. Подсистема импорта и экспорта информации

Для обеспечения наполнения подсистемы БД разработана подсистема импорта информации, которая может быть использована для подготовки отчетов, содержащих результаты расчетов, выполненных в системе TAGLAT. Интерфейс окна подсистемы представлен на рис. 7. В верхней части интерфейса находятся элементы БД в виде текстового списка. При нажатии на строку из БД, таблица в центре окна заполняется данными из выбранного документа, при этом в нижней части документа отображается форма выбранного сигнала. Реализовано два способа заполнения нового элемента БД: автоматизированный (путем загрузки данных из внешнего текстового файла) и ручной (путем заполнения таблицы в центре окна подсистемы). Также имеется возможность экспорта (сохранения) данных в сторонний файл.

Заполнение БД готовых технических решений производится из главного окна соответствующей подсистемы (рис 6). Импорт файлов доступен по нажатию на кнопку «Добавить файл» в главном окне БД. Пользователю доступен выбор файла из произвольной директории, задание типа документа и добавление описания к загруженному файлу. Для внесения изменений в загруженный элемент БД применяется кнопка «Редактировать». Для автоматической подготовки отчетов на основе результатов расчетов, выполненных в системе TAGLAT, разработана подсистема экспорта информации. Вызов подсистемы производится в окне динамической визуализации откликов сигналов с помощью кнопки «Export data». При ее нажатии подсистема формирует отчет, включающий в себя максимальные и минимальные значения норм, портреты по нормам  $N_1$ – $N_5$ , экстремумы сигнала в узлах сети и временные отклики в этих узлах, а также на входе и выходе исследуемой принципиальной схемы [9]. После этого данные выводятся в окне предварительного просмотра отчета, который может быть сохранен в формате PDF, либо распечатан напрямую из системы TAGLAT (рис. 8).



**Рис. 7. Интерфейс подсистемы импорта полезных и помеховых сигналов**

#### E. Подсистема локализации превышения допустимых уровней сигналов в узлах сети

Для визуализации изменения формы сигнала, а также выявления экстремумов сигнала, при его прохождении через отрезки линий передачи произвольной сложности, может быть использована подсистема локализации превышения допустимых уровней сигналов в узлах сети. Работа с подсистемой ведется с помощью взаимодействия с графическим редактором, описанным в подразделе А. После построения топологии пользователь может выбрать сигнал из подсистемы базы данных или задать его самостоятельно. Для запуска окна настроек алгоритма переходного анализа необходимо выбрать соответствующий элемент в главном окне программы. В данном окне доступны выбор типа анализа, а также окно настроек системы анимированной динамической визуализации сигналов «DynaVis». Настройка динамической визуализации включает в себя задание номеров начального и конечного узлов, а также числа кадров в секунду выходной анимации. Задание числа подынтервалов вдоль каждого отрезка проводников анализируемой структуры осуществляется на этапе построения топологии графическим редактором, описанным в подразделе А.

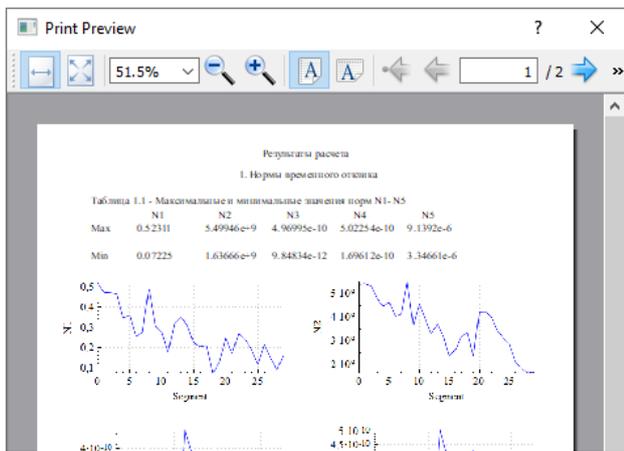


Рис. 8. Окно предварительного просмотра автоматически сгенерированного отчёта

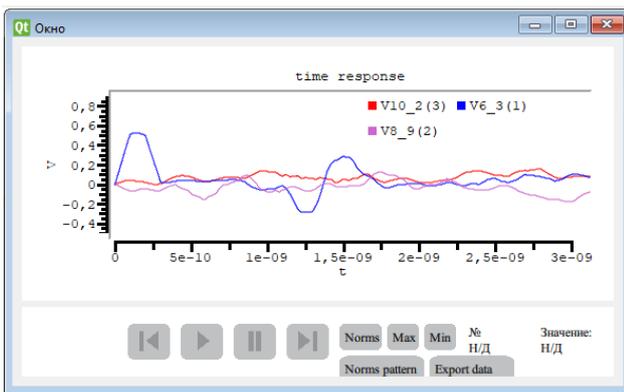


Рис. 9. Окно динамической визуализации сигнала

В результате своей работы подсистема автоматически генерирует и запускает код, который выводит окно с формами сигнала в заданных узлах, а также окно с динамическим отображением распространения сигнала в анализируемой структуре (рис. 9). Пользователю доступны элементы управления динамического изображения. Кнопки «Max» и «Min», расположенные в окне динамической визуализации сигнала, отвечают за отображение экстремумов сигнала. При нажатии на одну из этих кнопок анимация останавливается и на графике отображается форма сигнала с экстремумом. При этом на исследуемой принципиальной схеме отображается координата вдоль проводника отрезка линии передачи, в которой локализован экстремум сигнала.

В центральной части окна динамической визуализации расположена кнопка «Norms», при нажатии на которую производится расчет  $N$ -норм, применяемых для определения предела восприимчивости исследуемой принципиальной схемы [9]. Расчет  $N$ -норм выполняется путем применения математических операторов ко всей форме сигнала. Рассчитанные максимальные и минимальные значения нормирующих параметров выводятся в отдельном окне. Результаты применения функционала подсистемы представлены в работах [10–12].

## F. Подсистема поддержки принятия решений

Для формирования аналитической справочной информации на основе  $N$ -норм сигналов, воздействующих на сеть электропитания, разработана подсистема поддержки принятия решений.

Для анализа произвольной топологии, заданной пользователем, применяются нормы  $N_1–N_5$  и 10 сигналов, реализованных в прототипе подсистемы БД. Запуск подсистемы осуществляется путем нажатия флагового переключателя «Формирование отчетности» в меню настроек временного анализа в подсистеме проектирования технических решений.

Работа подсистемы осуществляется следующим образом. Подсистема в автоматическом режиме выполняет расчет откликов заданной топологии на воздействие 10 помеховых сигналов, реализованных в БД. Для каждого из сигналов в каждом сегменте топологии рассчитывается 5 норм, после чего определяются сегменты структуры, в которых значения норм максимальны. Затем в отклике, полученном для данного сегмента, определяется максимальное значение напряжения, которое нормируется относительно максимального значения напряжения входного сигнала. Полученные результаты отображаются в ячейках таблицы на главном окне подсистемы, где также указываются номер отрезка линии передачи и номер сегмента, в которых выявлено максимальное значение  $N$ -нормы. В зависимости от нормированного максимального значения напряжения изменяется цвет фона соответствующих ячеек таблицы (от зеленого к темно-красному), указывая пользователю наиболее уязвимые места заданной топологии. В таблице справа также указываются значения максимального напряжения входного сигнала, применяемые при заполнении ячеек, а слева отображаются названия используемых сигналов. Интерфейс окна подсистемы формирования аналитической информации представлен на рис. 10.



Рис. 10. Главное окно подсистемы формирования аналитической информации

При нажатии на ячейки таблицы в нижней части главного окна подсистемы строятся портреты  $N$ -норм, нормированные относительно значений  $N_1–N_5$  входного помехового сигнала, что позволяет подробно рас-

смотреть уязвимые узлы заданной пользователем топологии сети без привязки к амплитуде воздействия.

В состав подсистемы также входит разработанный модуль многовариантного анализа погонных параметров произвольных двухмерных структур. Модуль позволяет выполнить многократные вычисления матриц погонных параметров  $R$ ,  $L$ ,  $C$  и  $G$  при изменении параметров исследуемого поперечного сечения линий передачи и может быть применен для поиска оптимального решения при проектировании конструкции СШЭП и ее проводных отводов. Интерфейс модуля многовариантного анализа представлен на рис. 11. Для выполнения многовариантного анализа в поле «Код структуры» необходимо ввести соответствующий программный код. В таблице задаются переменные с именами, соответствующими заданному коду структуры, а также шаг изменения этих переменных «Step». Общий диапазон изменения переменной определяется шагом и числом, введенным в поле «Количество изменений переменной» в верхней части окна.

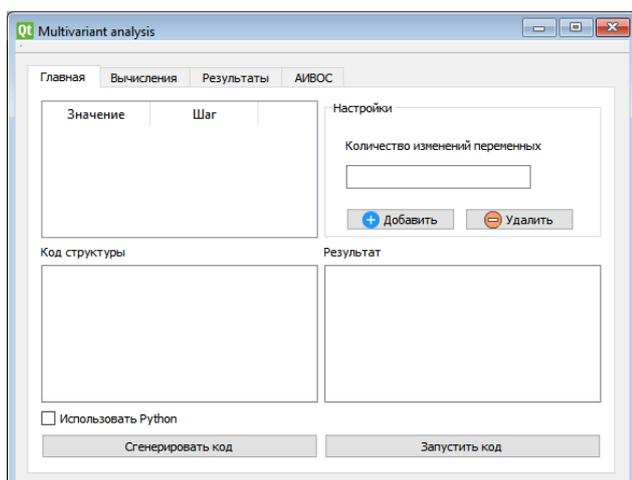


Рис. 11. Главное окно модуля многовариантного анализа

На вкладке «Вычисления» доступен выбор матриц погонных параметров  $R$ ,  $L$ ,  $C$  и  $G$ . При выборе флагового переключателя «Визуализация геометрии» на каждом шаге вычислений выполняется построение поперечного сечения структуры с её текущими параметрами. Переключатель «Автоматический выбор» реализует алгоритмы ускорения многократного решения СЛАУ [13]. В случае, если этот переключатель не активирован, выполняет полный пересчёт структуры на каждом шаге. Для запуска алгоритма ускорения решения предварительно выполняется оценка трудоёмкости вычислений. При активации флагового переключателя «Гибридный метод» становится доступным детальная настройка данного метода. Доступен ввод количества итераций, значение точности вычислений и вектор начального приближения. Также для выбора доступен вариант использования решений СЛАУ, полученных на предыдущих итерациях. Если геометрические размеры структуры изменяются в процессе многовариантного анализа, то для ускорения вычислений применяется алгоритм перенумерации сегментов

структуры, требующий номеров сегментов, соответствующих изменяемой переменной.

В модуле многовариантного анализа имеется возможность запуска алгоритма адаптивного итерационного выбора оптимальной сегментации (АИВОС) [14]. При нажатии соответствующего переключателя на вкладке «АИВОС» пользователю доступен выбор между равномерной и неравномерной сегментацией структуры. Алгоритм равномерной сегментации реализует равномерное учащение разбиений структуры на каждом шаге итерационного процесса. Неравномерная сегментация позволяет локально учащать сегментацию и, тем самым, получать более гладкую аппроксимацию плотности распределения заряда.

### G. Подсистема оценки эффективности экранирования

Для оценки эффективности экранирования элементов и устройств ОСВЭ разработана подсистема оценки эффективности экранирования [15]. Главное окно подсистемы представлено на рис. 12. В левом верхнем углу пользователю доступен выбор нескольких типовых экранирующих структур: цилиндрический корпус, прямоугольный корпус с одной апертурой и перфорированной стенкой. После выбора типа структуры пользователю доступен ввод её параметров: размеров корпуса, толщины стенок, размеров и положения апертуры и т.д. При вводе значений параметров анализируемого корпуса производится предварительная оценка трудоёмкости расчетов эффективности экранирования и объема требуемой памяти.

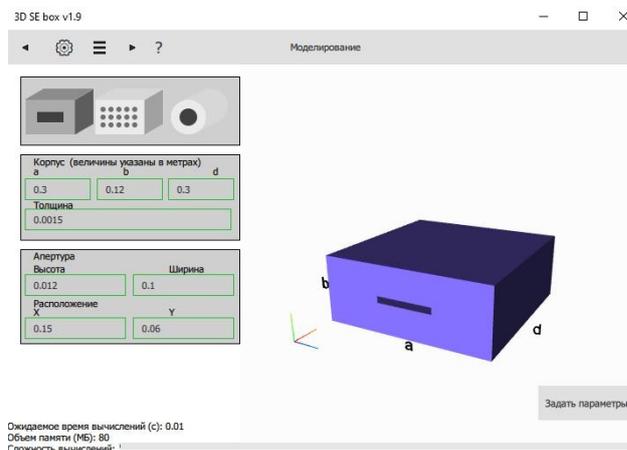


Рис. 12. Главное окно подсистемы оценки эффективности экранирования

По нажатию на кнопку «Задать параметры» модуль автоматически переходит к окну задания параметров вычислений, где задаются частотный диапазон, положение точки наблюдения, математическая модель и др. Отличительной особенностью подсистемы является возможность трехмерного отображения ЭЭ в зависимости от частоты воздействия и положения точки наблюдения внутри корпуса. Данный функционал позволяет выявлять и локализовывать области, в которых ЭЭ принимает наихудшие значения, а также выполнять комплексную оценку ЭЭ в различных точках

наблюдения, что может быть полезно для выбора оптимального расположения элементов и узлов технического средства внутри экранирующего корпуса на начальной стадии проектирования. Пример трехмерного отображения ЭЭ корпуса с апертурой представлен на рис. 13. Полученная частотная зависимость может быть представлена в двухмерном виде в требуемой точке наблюдения, а также сохранена в текстовом формате.

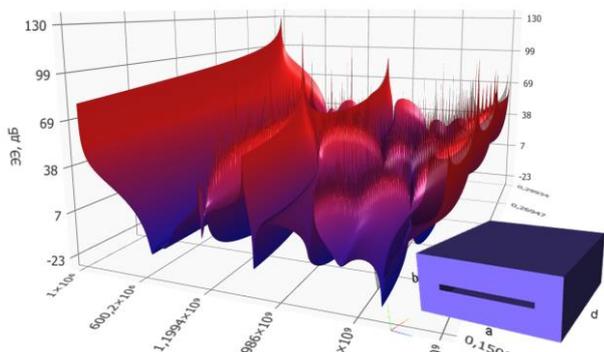


Рис. 13. Результат оценки ЭЭ корпуса  $300 \times 120 \times 300 \text{ мм}^3$  с апертурой  $200 \times 12 \text{ мм}^2$

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты разработки ПО для проектирования ОСВЭ космического аппарата и кратко описаны особенности реализованных подсистем. Возможности ПО могут быть использованы при проектировании не только сетей электропитания, но и различных радиоэлектронных средств с учётом требований по электромагнитной совместимости.

#### ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-70020.

#### ЛИТЕРАТУРА

[1] Influence of the cabling geometry on paralleled diodes in a high power rectifier / E. Clavel, J. Roudet, J.-L. Schanen, A. Foutanet // IEEE Conf. Record of the Industry Applications Conference. – San Diego, CA, USA, 6–10 Oct. 1996. – Vol. 2. – P. 993–998.

[2] Electric vehicle drive inverters simulation considering parasitic parameters / W. Huiqing, L. Jun, Z. Xuhui, W. Xuhui // 13th Power Electronics and Motion Control Conference. EPE-PEMC. – Poznan, Poland, 1–3 Sept. 2008. – P. 417–421.

[3] Keyer C. EMC Expert Systems for our modern working environment / C. Keyer, F. Leferink // International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE. – Rome, Italy, 17–21 Sept. 2012. – P. 1–5.

[4] Голикова Ж.В. Проблемы и тенденции развития в области современного имитационного моделирования / Ж.В. Голикова, А.Г. Янишевская // Россия молодая:

передовые технологии – В промышленность. – 2015. – № 3. – С. 81–83.

- [5] Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко [и др.] // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. – 2015. – № 2(36). – С. 45–50.
- [6] Лежнин Е.В. Улучшение пользовательского интерфейса системы TALGAT / Е.В. Лежнин, А.О. Мелкозеров // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2(24). – Ч. 1. – С. 137–140.
- [7] Заболоцкий А.М. Временной отклик многопроводных линий передачи / А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов; Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. – Томск: Томский государственный университет, 2007. – 152 с.
- [8] Квасников А.А. Разработка базы данных помеховых сигналов системы анализа электромагнитной совместимости / А.А. Квасников // Научная сессия ТУСУР–2018: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 16–18 мая 2018 г. – Т. 2. – С. 266–269.
- [9] Study and classification of potential IEMI sources / N. Mora, F. Vega, G. Lugrin, F. Rachidi, M. Rubinstein // System and assessment notes. – Note 41. – July 8, 2014. – P. 1–48.
- [10] Diagnostics of the printed circuit board bus of a spacecraft autonomous navigation system with using the N-norms / R.R. Gazizov, B.S. Muhambetzhanova, T.T. Gazizov, A.A. Kvasnikov // Journal of physics: conference series. – 2019. Vol. 560, No. 1. – P. 1–5.
- [11] Хомушку Ч.Л. Локализация экстремумов перекрестных помех от двухстороннего преднамеренного воздействия в шине печатной платы / Ч.Л. Хомушку // 24-я Межд. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-24-2018)». – Томск, Россия, 28 ноября, 2018. – С. 173–177.
- [12] Мухамбетжанова Б.С. Локализация максимумов N-норм в шине печатной платы / Б.С. Мухамбетжанова, Р.Р. Газизов // Материалы XIV международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск, Россия, 28 – 30 ноября, 2018. – С. 293–295.
- [13] Куксенко С.П. Электромагнитная совместимость: моделирование / Под ред. Т.Р. Газизова // Томск: В-Спектр, 2018. – 190 с.
- [14] Аширбакиев Р.И. Адаптивный итерационный выбор оптимальной сегментации границ проводников и диэлектриков в задачах электростатики / Р.И. Аширбакиев, В.К. Салов // Доклады ТУСУР. – 2013. – № 3(29). – С. 159–161.
- [15] Прототип программного модуля для оценки эффективности экранирования корпусов радиоэлектронных средств / А.А. Иванов, А.А. Квасников, С.П. Куксенко, М.Е. Комнатнов // Технологии электромагнитной совместимости. – 2019. – №4. – С. 5–15.

# Software for Designing an Optimal High Voltage Power Supply Network of a Spacecraft

A.A. Kvasnikov, S.P. Kuksenko, A.A. Ivanov

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk  
aleksejkvasnikov@gmail.com

**Abstract** — This paper presents a general computer-aided procedure for designing an optimal power supply network. The procedure consists of several stages, for each of which modules and subsystems are developed based on electromagnetic compatibility modeling system TALGAT. These subsystems include: topology design subsystem, technical solutions design subsystem, database subsystem, information import and export subsystem, signal levels localization subsystem, decision support subsystem, shielding effectiveness subsystem. The functional capabilities of the developed subsystems and their use for the design of high-voltage power supply networks of spacecraft are described.

**Keywords** — power supply network, power bus, electromagnetic compatibility, design, database, simulation modelling.

## REFERENCES

- [1] Influence of the cabling geometry on paralleled diodes in a high power rectifier / E. Clavel, J. Roudet, J.-L. Schanen, A. Foutanet // IEEE Conf. Record of the Industry Applications Conference. – San Diego, CA, USA, 6–10 Oct. 1996. – Vol. 2. – P. 993–998.
- [2] Electric vehicle drive inverters simulation considering parasitic parameters / W. Huiqing, L. Jun, Z. Xuhui, W. Xuhui // 13th Power Electronics and Motion Control Conference. EPE-PEMC. – Poznan, Poland, 1–3 Sept. 2008. – P. 417–421.
- [3] Keyer C. EMC Expert Systems for our modern working environment / C. Keyer, F. Leferink // International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE. – Rome, Italy, 17–21 Sept. 2012. – P. 1–5.
- [4] Golikova Z.V. Problemy i tendencii razvitiya v oblasti sovremennogo imitacionnogo modelirovaniya (Problems and development trends in the field of modern simulation) / Z.V. Golikova, A.G. Yanishevskaya // Rossiya molodaya: peredovye tekhnologii – V promyshlennost'. – 2015. – No. 3. – P. 81–83. (In Russian).
- [5] Novye vozmozhnosti sistemy modelirovaniya elektromagnitnoj sovmestimosti TALGAT (New features of the TALGAT EMC simulation system) / S.P. Kuksenko [et al.] // Dokl. Tomsk. gos. un-ta sistem upr. i radioelektroniki. – 2015. – No. 2(36). – P. 45–50. (In Russian).
- [6] Lezhnin E.V. Uluchshenie polzovatelskogo interfejsa sistemy TALGAT (TALGAT System User Interface Enhancement) / E.V. Lezhnin, A.O. Melkozerov // Doklady TUSUR. – 2011. – No. 2(24). – CH. 1. – P. 137–140. (In Russian).
- [6] Lezhnin E.V. Uluchshenie polzovatelskogo interfejsa sistemy TALGAT (TALGAT System User Interface Enhancement) / E.V. Lezhnin, A.O. Melkozerov // Doklady TUSUR. – 2011. – No. 2(24). – CH. 1. – P. 137–140. (In Russian).
- [7] Zabolotsky A.M. Vremennoy otklik mnogoprovodnykh liniy peredachi (Time response of multi-wire transmission lines) / A.M. Zabolotsky, T.R. Gazizov; Federal'noe agentstvo po obrazovaniyu, Tomskij gosudarstvennyj universitet sistem upravleniya i radioelektroniki. – Tomsk: Tomskij gosudarstvennyj universitet, 2007. – 152 p. (In Russian).
- [8] Kvasnikov A.A. Razrabotka bazy dannyh pomekhovykh signalov sistemy analiza elektromagnitnoj sovmestimosti / A.A. Kvasnikov (Development of a database of interfering signals of the electromagnetic compatibility analysis system) // Nauchnaya sessiya TUSUR–2018: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. – Tomsk, 16–18 maya 2018 g. – Vol. 2. – P. 266–269. (In Russian).
- [9] Study and classification of potential IEMI sources / N. Mora, F. Vega, G. Lugin, F. Rachidi, M. Rubinstein // System and assessment notes. – Note 41. – July 8, 2014. – P. 1–48.
- [10] Diagnostics of the printed circuit board bus of a spacecraft autonomous navigation system with using the N-norms / R.R. Gazizov, B.S. Muhambetzhanova, T.T. Gazizov, A.A. Kvasnikov // Journal of physics: conference series. – 2019. Vol. 560, No. 1. – P. 1–5.
- [11] Homushku C.L. Lokalizaciya ekstremumov perekrestnykh pomekh ot dvuhstoronnego prednamerennogo vozdejstviya v shine pechatnoj platy (Localization of extremes of crosstalk from double-sided intentional exposure in the PCB bus) / C.L. Homushku // 24-ya Mezhd. nauch.-prakt. konf. «Prirodnye i intellektual'nye resursy Sibiri (SIBRESURS-24-2018)». – Tomsk, Rossiya, 28 noyabrya, 2018. – P. 173–177. (In Russian).
- [12] Muhambetzhanova B.S. Lokalizaciya maksimumov N-norm v shine pechatnoj platy (Localization of the maximums of N-norms in the PCB bus) / B.S. Muhambetzhanova, R.R. Gazizov // Materialy XIV mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya». – Tomsk, Rossiya, 28 – 30 noyabrya, 2018. – P. 293–295. (In Russian).
- [13] Kuksenko S.P. Elektromagnitnaya sovmestimost': modelirovanie (Electromagnetic Compatibility: Simulation) / Pod red. T.R. Gazizova // Tomsk: V-Spektr, 2018. – 190 p.
- [14] Ashirbakiev R.I. Adaptivnyj iteracionnyj vybor optimal'noj segmentacii granic provodnikov i dielektrikov v zadachah elektrostati (Adaptive iterative selection of optimal segmentation of the boundaries of conductors and dielectrics in problems of electrostatics) / R.I. Ashirbakiev, V.K. Salov // Doklady TUSUR. – 2013. – No. 3(29). – P. 159–161. (In Russian).
- [15] Prototip programmnoho modulya dlya ocenki effektivnosti ekranirovaniya korpusov radioelektronnykh sredstv (Prototype software module for evaluating the effectiveness of shielding enclosures of electronic equipment) / A.A. Ivanov, A.A. Kvasnikov, S.P. Kuksenko, M.E. Komnatov // Tekhnologii elektromagnitnoj sovmestimosti. – 2019. – No. 4. – P. 5–15. (In Russian).