

УДК: 621.316

Моделирование помехозащищенной сети электропитания космического аппарата

Куксенко С.П.

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
ТУСУР, пр. Ленина, 40, Томск, 634050, Россия*

e-mail: ksergp@tu.tusur.ru

Статья поступила 20.04.2019

Аннотация

Показана актуальность использования математического моделирования с учетом требований электромагнитной совместимости при проектировании энергосистемы космического аппарата (КА). Описаны особенности разработки прототипа программного обеспечения для проектирования элементов распределительной сети КА, разработанного в ТУСУРе. Представлены результаты квазистатического моделирования силовой шины электропитания (СШЭП) и подключенных к ней проводных отводов, а также разработки модуля для оценки эффективности экранирования корпусов с апертурами и базы данных кондуктивных помеховых сигналов для моделирования отклика сети электропитания на преднамеренные воздействия. Апробирован подход к ускорению моделирования проводных отводов до 19 раз, за счет использования математической модели, учитывающей частичные изменения в матрице системы линейных алгебраических уравнений при многократных вычислениях.

Ключевые слова: сеть электропитания, космический аппарат, моделирование.

Введение

Успешность космической отрасли была и остается важным показателем развитости всего государства. Так, одни страны только начинают осваивать космос, а другие, наоборот, давно и широко его используют. При этом лидирующие позиции занимают российские компании, а основополагающий подход к безопасности космических полетов был и остается одной из составляющих их успешности [1]. Так, Акционерное общество «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева» (АО «ИСС») наряду с Boeing Satellite Systems, Lockheed Martin, Thales Alenia Space и EADS Astrium является одной из 5 ведущих мировых компаний, создающих КА различного назначения.

Согласно стратегии развития Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» на период до 2025 г. и перспективу до 2030 г., расширение международного сотрудничества и связанные с этим растущие потребности заказчиков диктуют новые требования к конечному изделию. С учетом особенностей эксплуатации космической техники (открытый космос) и расширения её функциональных возможностей, требуются применение новейших технологий, а также повышение качества и надежности [2, 3]. При этом расширение функциональных возможностей КА ведет к обострению проблемы обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС). Так, одной из главных причин отказов КА является электростатический разряд [4]. Еще одной растущей проблемой является использование преднамеренных воздействий [5, 6]. Поэтому при испытаниях космической техники на соответствие требований по ЭМС (согласно AEROSPACE № TOR-2005(8583)-1, МЭК 61000-2-13, AIAA S-121-2009, ГОСТ Р 56531-2015 и

MIL-STD-461G) уделяется внимание как излучаемым, так и кондуктивным эмиссиям. К сожалению, экранирование, фильтрация и заземление (классические методы обеспечения ЭМС) не обеспечивают в нужной мере ЭМС КА, ухудшая при этом его массогабаритные характеристики, что приводит к необходимости поиска новых технических решений и тщательной их проработки.

В последнее время наметилась тенденции увеличения срока активного существования КА и использования КА в негерметичном исполнении. Последнее увеличило проникновение помеховых излучений внутрь КА. В свою очередь, эти излучения наводят токи на проводниках, находящихся внутри КА. Наиболее критичными из них являются проводники электропитания.

Вместо кабельной разводки питания часто используют СШЭП различной структуры [7–9] и топологии [10–12]. Для их защиты разрабатывают специальные помехозащитные устройства [13–15], а для проектирования используют математическое моделирование [16–22], позволяющее существенно экономить затраты времени и денег. При этом рассмотрение всей сети электропитания не выполняется из-за сложности подобного вида моделирования. Между тем это позволит проектировать помехозащищенную сеть электропитания с уменьшенной массой.

Энергосистема КА представляет собой систему радиоэлектронных и электротехнических средств, которая имеет уникальные характеристики и нормы отличные от большинства других энергосистем. Поэтому, прежде всего, система должна быть высоконадежной и помехоустойчивой. При движении на орбите система электропитания КА работает полностью в автономном режиме, ее ремонт и

замена практически невозможны. Выход из строя энергосистемы может привести к потере КА. В то же время нецелесообразно повышать надежность энергосистемы только лишь за счет увеличения её избыточности, поскольку увеличивается масса КА, что нежелательно.

Состояние исследований в мире, в части сети электропитания КА, позволяет заключить следующее. Типовая и широко используемая система распределения питания КА включает в себя некоторый тип контроллера, который служит для распределения питания между панелями солнечных батарей, аккумуляторных батарей и общих нагрузок КА. Подача питания от контроллера в нагрузку осуществляется по силовой шине [23]. В зависимости от того, как батарея подключена к шине, системы бывают регулируемые солнцем и полностью регулируемые. В регулируемой солнцем шине (применяется в системах, где требования к мощности нагрузки до 3 кВт), скорость заряда батареи контролируется регулятором мощности, но разряжается батарея непосредственно на шину через диод. Шина при такой системе проста и, следовательно, более надежна. Однако, изменение номинального напряжения на шине достигает 25%, что требует дополнительного оборудования для контроля качества постоянного напряжения, поступающего от источника в распределительное устройство. В полностью регулируемой шине (применяется в системах, где требования к мощности нагрузки выше 3 кВт), когда заряд и разряд батареи контролируются регулятором мощности, напряжение шины контролируется в пределах нескольких процентов за весь период орбиты. Подобные системы позволяют не задействовать дополнительное оборудование для контроля качества постоянного напряжения. Так, типичное

изменение напряжения на шине составляет от 2 до 5% от номинального напряжения [24].

Значение напряжения питания постоянного тока зависит от конкретного производителя и назначения КА. Так, известны системы на 28 В и 30 В (КА малой мощности), 70 В и 100 В (КА средней мощности), 120 В (КА большой мощности, международная космическая станция), 150 В и 200 В (КА сверхбольшой мощности). Повышение напряжения связано с необходимостью уменьшения массы кабельной сети КА при повышении его мощности. Из-за переходных процессов, возникающих при переключении питания, производители вынуждены в блоках и узлах нагрузки размещать защитные фильтры, для предотвращения их выхода из строя, что увеличивает массу полезной нагрузки и КА в целом и уменьшает их помехоустойчивость и надежность. Таким образом, для уменьшения массы КА и повышения срока активного существования требуется новый подход к организации сети электропитания КА и специализированное программное обеспечение для её проектирования.

Цель данной работы – представить особенности использования математического моделирования при проектировании распределенной сети электропитания КА, отличающейся повышенной помехоустойчивостью, помехозащищенностью и уменьшенной массой.

Прототип программного обеспечения

При разработке прототипа программного обеспечения за основу взята система TALGAT [25]. Она спроектирована по модульному принципу, что позволяет при

разработке нового модуля использовать все её возможности. Основными являются вычислительные модули MoM2D и MoM3D (вычисление матриц погонных параметров двухмерных и трехмерных структур соответственно), RESPONSE (квазистатический анализ) и MoMW (электродинамический анализ проводных структур), а также модули оптимизации ES (эволюционные стратегии) и GA (генетические алгоритмы). Отдельно стоит отметить, что данная система уже использовалась при выполнении «космических проектов» [26, 27]. Для моделирования сети электропитания функционал системы доработан в части средств создания топологии сети, локализации экстремумов сигналов в узлах сети и оценки эффективности экранирования (ЭЭ), а также реализации базы данных преднамеренных помеховых сигналов. С её помощью выполнено предварительное моделирование сети электропитания в части её элементов.

Особенности моделирования сети электропитания

Первоначально выполнено исследование влияния формы поперечного сечения плоской СШЭП на её погонные параметры с помощью модуля MOM2D и получено оптимальное поперечное сечение, при котором достигается баланс между паразитными параметрами, тепловыми свойствами, массой и габаритами конструкции СШЭП. Общий вид СШЭП и поперечные сечения её частей – на рис. 1.

Для подключения нагрузки к СШЭП используются проводные отводы с соединителями на концах. В зависимости от предполагаемой нагрузки, отводы могут быть как в виде одиночного проводника, так и жгута. За основу взяты широко используемые провода марки БС 35-1298, для покрытия которых использована

экранирующая лента (ЛМММс). Для сопряжения с СШЭП и достижения баланса между паразитными параметрами и массой отводов, с помощью модуля MOM2D выполнен выбор размеров поперечных сечений. В качестве примера, на рис. 2 приведены поперечные сечения разработанных ответвлений, в виде жгутов из 2 и 5 проводов. Также разработаны жгуты из 10 и 20 проводов.

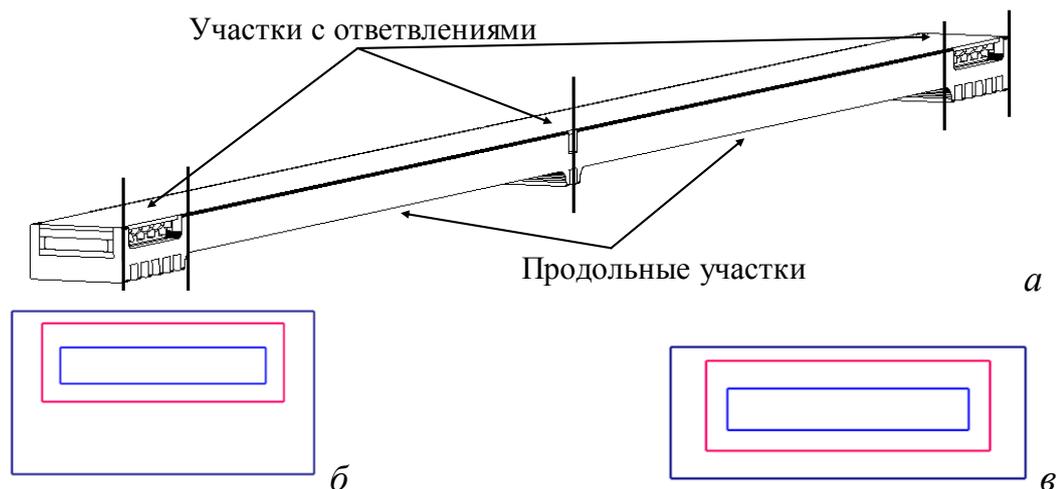


Рис. 1. Общий вид макета СШЭП (а) и её поперечные сечения в участках с ответвлениями (б) и в продольных частях (в)



Рис. 2. Поперечные сечения проводных отводов в виде жгутов из 2 (а) и 5 проводов (б) марки БС 35-1298

Для оценки помехоустойчивости сети электропитания в части СШЭП и проводных отводов разработано несколько вариантов принципиальных схем. На рис. 3 приведен один из них. Так, модель СШЭП, состоит из двух участков с ответвлениями в виде линий передачи Trl_6 и Trl_9 и двух продольных участков и Trl_7 и Trl_8 . В начале и конце центрального проводника включены проводные отводы в виде жгута из 5 проводов (Trl_1-Trl_5 , $Trl_{10}-Trl_{14}$, $Trl_{19}-Trl_{28}$), а в центре – из 2 проводов

($Trl_{15}-Trl_{18}$). Для имитации лабораторных испытаний на концах линий передачи, эмулирующих СШЭП, включена нагрузка 50 Ом.

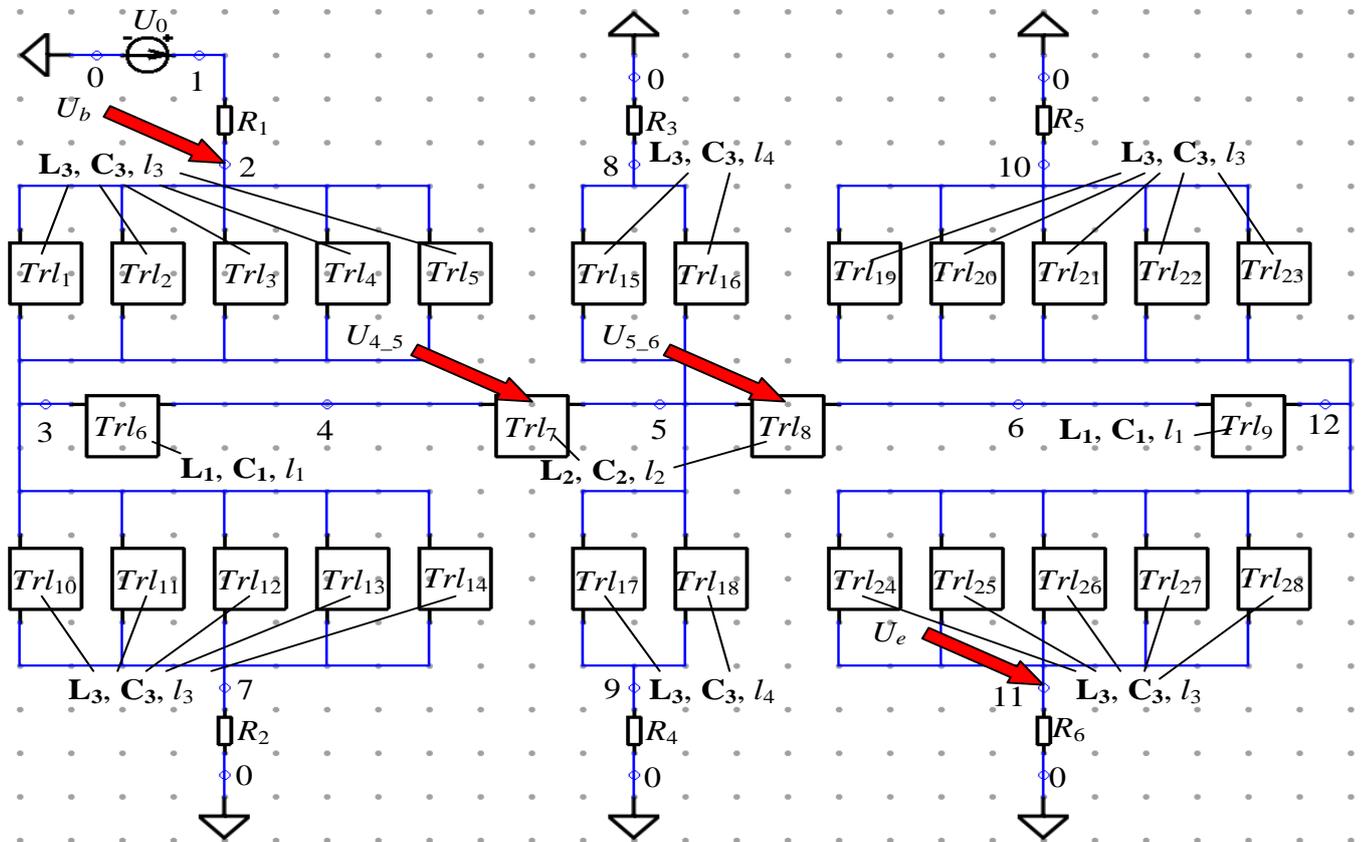


Рис. 3. Вариант схемной модели сети электропитания
(в части СШЭП и проводных отводов)

При моделировании желательно учитывать зависимость относительной диэлектрической проницаемости (ϵ_r) диэлектрического заполнения, в данном случае, изолятора проводников СШЭП и изоляции проводов отводов. При этом ϵ_r частотно зависима, что необходимо учитывать при квазистатическом моделировании для получения более «физичных» результатов [28]. Изменение значения ϵ_r приводит к необходимости пересчета погонных параметров линий передачи, в особенности, ёмкостной матрицы. Это приводит к существенному увеличению затрат времени, поскольку эти параметры должны вычисляться на каждой частоте спектра

воздействующего сигнала. Для ускорения таких вычислений использована математическая модель, учитывающая частичные изменения в матрице системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) при изменении ε_r , на решение которой и приходится основные затраты времени [29]. Для этого матрица СЛАУ представляется в блочном виде

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix},$$

где \mathbf{A} – блок размера $N_A \times N_A$, \mathbf{B} – $N_A \times N_D$, \mathbf{C} – $N_D \times N_A$ и \mathbf{D} – $N_D \times N_D$, N_A и N_D – количество подынтервалов, на которое сегментируются границы «проводник-диэлектрик» и «диэлектрик-диэлектрик» соответственно, а их общее количество $N = N_A + N_D$. При изменении значения ε_r , изменятся только часть элементов матрицы, а именно элементы блока \mathbf{D} . Данная особенность позволяет получить желаемое ускорение. При этом, чем больше отношение N_A/N , тем большее ускорение может быть получено. В таблице 1 приведены результаты ускорения при использовании данной модели по сравнению с исходной и полным перевычислением ёмкостной матрицы для проводных отводов из рис. 2. Для наглядности приведены результаты для $m=128$ и 512 частотных точек при учащении сегментации, характеризующемся отношением N_A/N . Видно, что ускорение может быть существенным и для двухпроводного отвода достигать почти 19 раз. Для пятипроводного отвода оно меньше (около 6 раз), поскольку значение N_A/N в 1,4 раза меньше чем для двухпроводного.

Таблица 1

Ускорение многократного вычисления емкостной матрицы проводных отводов при учащении сегментации и увеличении числа частотных точек

Структура из рис. 2а			Структура из рис. 2б		
N_A/N	$m=128$	$m=512$	N_A/N	$m=128$	$m=512$
768/1025	5,67	5,68	769/1409	6,08	6,14
1536/2049	12,18	15,35	1536/2817	6,22	6,77
3072/4097	14,48	18,81	3075/5633	6,31	6,96

На рис. 4а приведены результаты квазистатического моделирования (модуль RESPONSE) – временные и частотные отклики в каждом узле вдоль центрального проводника (на рис. 3 отмечено красными стрелками), при воздействии на схему стандартного помехового сигнала (U_0) в виде трапеции и амплитудой 10 В (длительности фронта, вершины и спада по 1 нс), где U_b – форма напряжения в начале проводника, U_e – в конце, U_{4_5} и U_{5_6} в середине отрезков линий передачи Trl_7 и Trl_8 соответственно. Формы напряжений, полученные на каждом конце СШЭП в узлах 2, 7–11, приведены на рис. 4б, из которого видно, что в узле 7 наблюдается напряжение, амплитуда которого превышает амплитуду на входе (в узле 2). На рис. 4в приведены формы напряжения вдоль проводных отводов (отрезки линии передачи узлами 2, 3 и 7), где U_2 , U_3 и U_7 – формы напряжения в узлах 2, 3 и 7 соответственно, U_{\max} – форма с максимумом напряжения. В сегменте 18 (из 20-ти) отрезка Trl_{10} выявлен максимум напряжения, составляющий 0,72 В, что превышает амплитуду напряжения на входе на 16%.

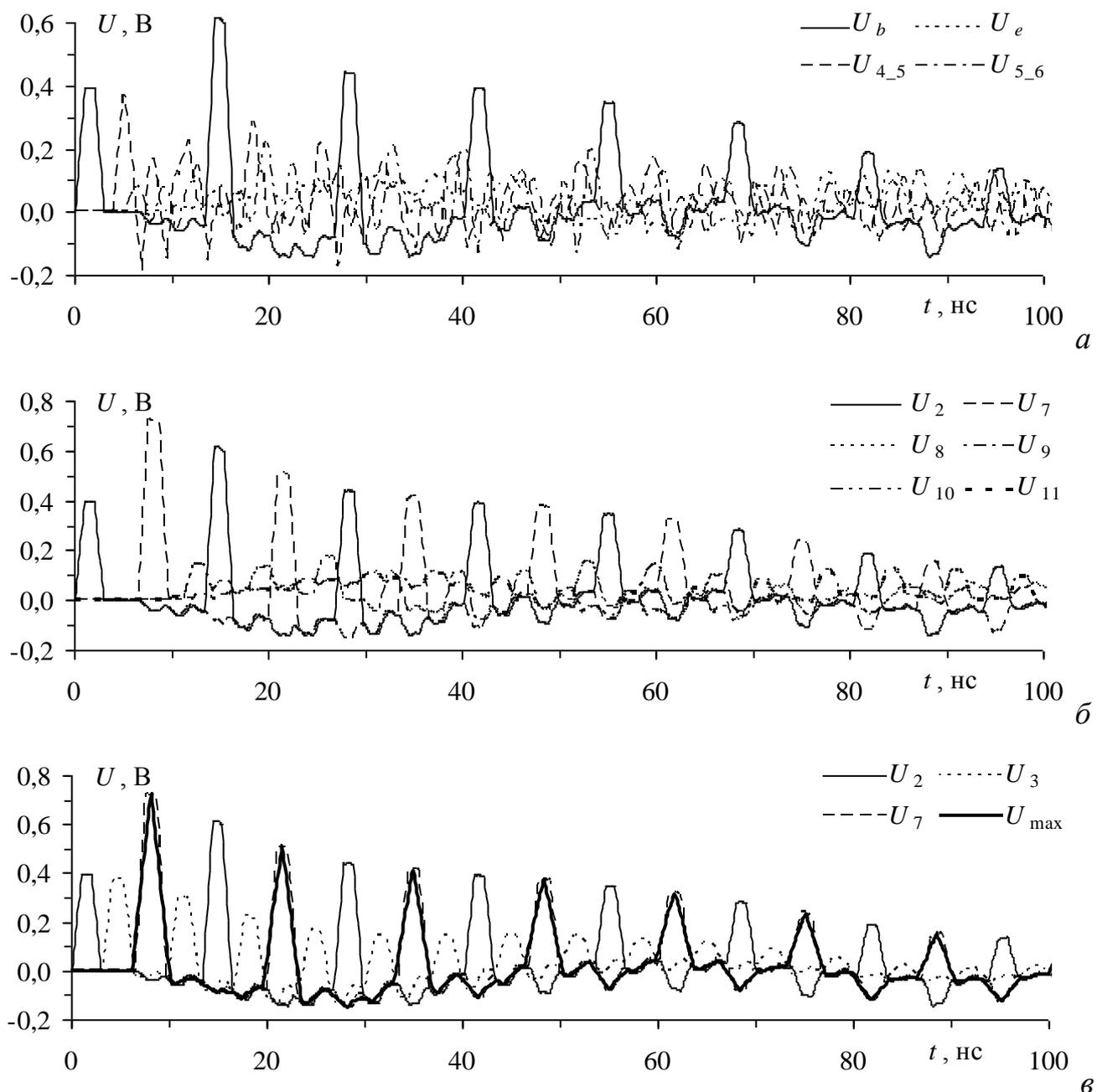


Рис. 4 – Временные (а) отклики вдоль центрального проводника СШЭП (а), в узлах 2, 7–11 (б) и между узлами 2, 3, 7 (в)

База данных помеховых сигналов

Для моделирования отклика сети электропитания на воздействие преднамеренных электромагнитных воздействия разработана база данных кондуктивных помеховых сигналов на основе [30]. База реализована в виде

внешнего источника, а сигналы генераторов в ней хранятся в текстовом виде (рис. 5).

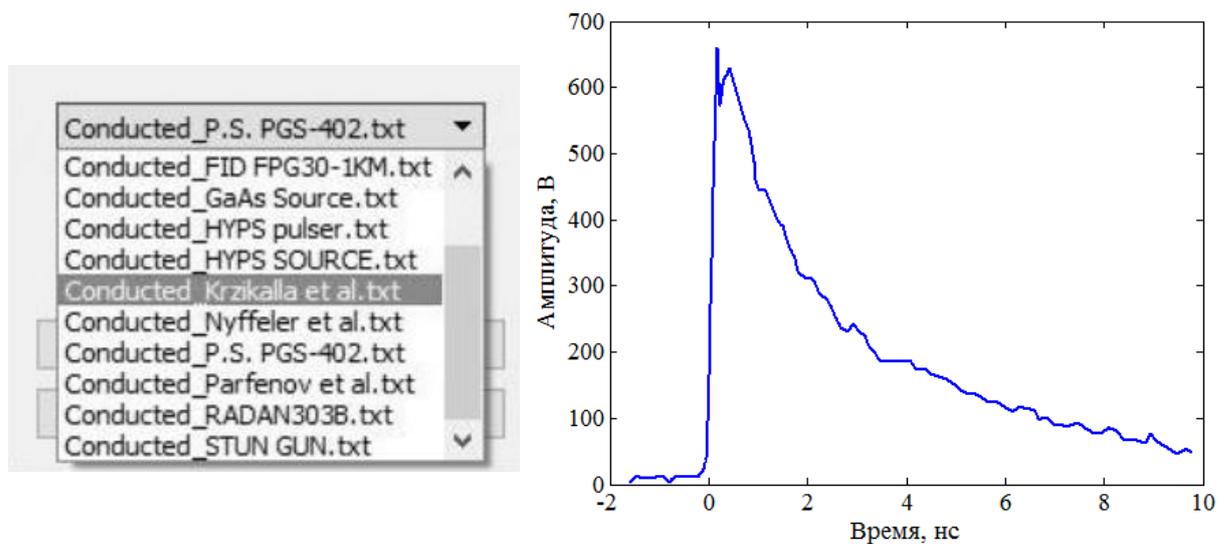


Рис. 5. Пример загрузки данных кондуктивного помехового сигнала

Для численной оценки потенциальных угроз, связанных с прохождением помеховых сигналов по цепям электропитания, реализовано вычисление N-норм [30]. N-нормы являются интегральными параметрами, используемыми для характеристики сигнала во временной области и определения предела восприимчивости оборудования. Для численного интегрирования использован метод трапеций. Расчет N-норм основан на применении математических операторов ко всей форме сигнала, поэтому они могут быть использованы не только при проектировании сети электропитания для оценки её помехоустойчивости, но и для оценки её надежности. По их значениям можно оценивать вероятность сбоя схемы, электрического пробоя, повреждения оборудования или выгорания компонент. Для удобства реализована возможность отображения значения норм в зависимости от номера сегмента схемы, позволяющая численно оценивать конструкторские решения при моделировании.

Модуль оценки эффективности экранирования корпусов

Для оценки ЭЭ корпусов элементов сети электропитания (соединителей, блоков полезной нагрузки), а также корпуса помехозащитного фильтра, монтируемого на СШЭП, разработаны математические модели, алгоритмы и реализующий их вычислительный модуль. Вычисление ЭЭ производится в диапазонах частот и положения точки наблюдения. Корпус может иметь как одну апертуру, так и массив апертур. На рис. 6 в виде коллажа на примере корпуса помехозащитного фильтра проиллюстрирован процесс вычисления зависимостей его ЭЭ.

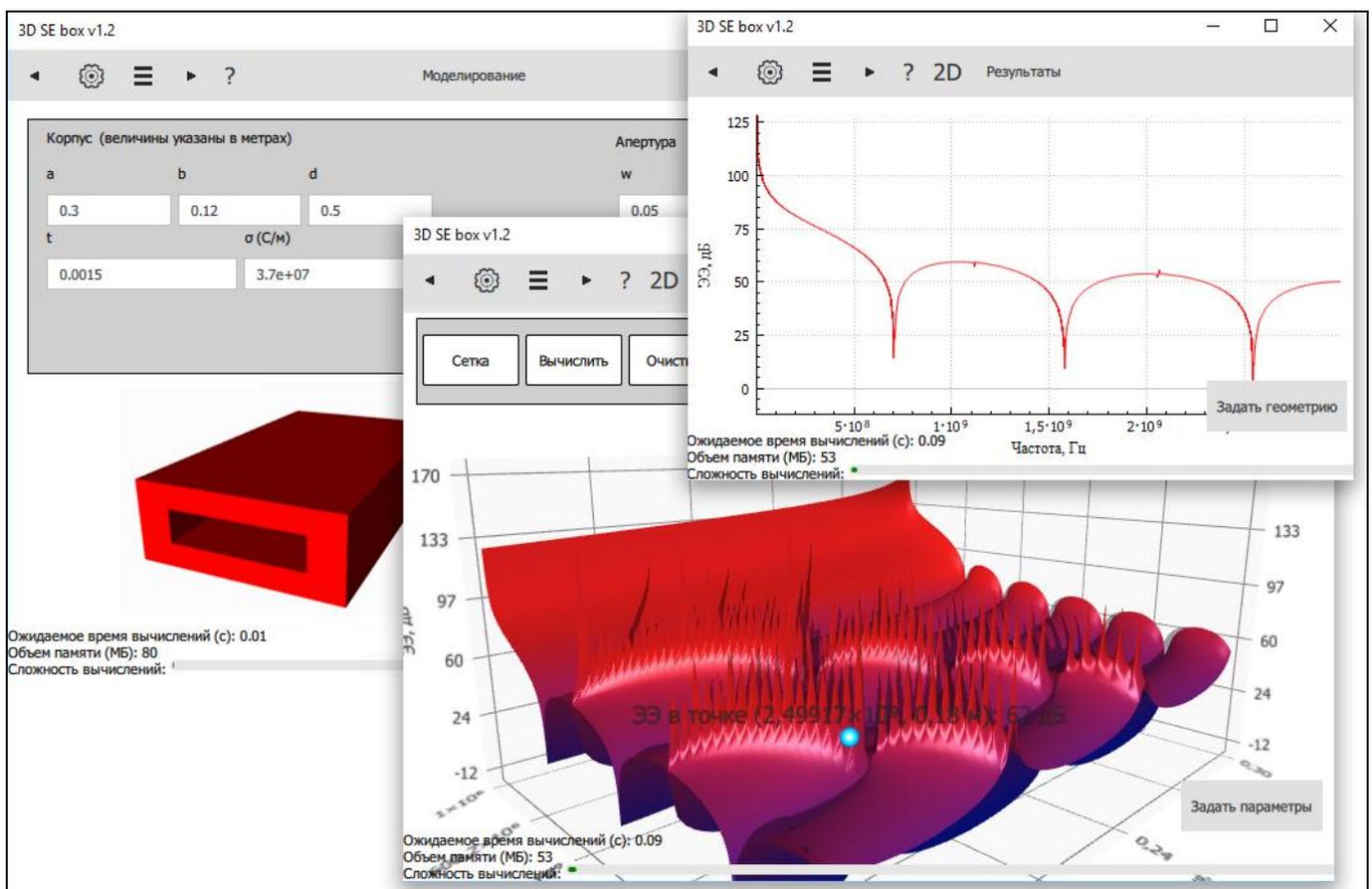


Рис. 6. Пример оценки ЭЭ корпуса с апертурой

Отличительной особенностью модуля является трехмерная визуализация результатов моделирования ЭЭ с возможностью последующего двухмерного

отображения ЭЭ в интересующей точке наблюдения. В модуле реализованы возможность выбора метода численного интегрирования и априорная оценка вычислительных затрат, позволяющая до основных вычислений определить их сложность и требования к вычислительными ресурсам.

Заключение

Выполнена разработка прототипа программного продукта для синтеза сети высоковольтного электропитания космического аппарата. С использованием разработанного инструментария получены предварительные результаты, демонстрирующие его работоспособность и подтверждающие новизну разработки.

В качестве математической основы разработки прототипа программного обеспечения использованы ТЕМ-аппроксимация, метод моментов и модифицированный метод узловых потенциалов для вычисления первичных параметров отрезков линий передачи и оклика в конце структуры [31]. Такой подход позволяет существенно экономить время моделирования, что позволяет рассмотреть большее количество возможных топологий сети электропитания и ускорить процесс её проектирования, по сравнению с электродинамическим моделированием. Для проверки на соответствие оптимальности конечного изделия используются нормирующие параметры, позволяющие оценить не только его помехозащищенность, но и надежность, а также выявить наиболее критичные узлы сети и тем самым позволить их тщательно спроектировать для устранения отказов изделия при эксплуатации.

Для облегчения работы пользователя при проектировании с учетом имеющихся экспертных оценок, аналитической и справочной информации, а также задаваемых критериев качества (масса, стоимость, помехозащищенность), в дальнейшем планируется реализации подсистемы принятия решения. Так, под её управлением вместо эвристического поиска оптимальных параметров сети электропитания проектировщик получит уникальный инструмент, позволяющий, не вдаваясь в особенности моделирования (по принципу «black box»), получать на выходе готовое решение с оптимальными параметрами.

Автор благодарен за помощь в работе Комнатнову М.Е., Газизов Р.Р.,

Квасникову А.А., Иванову А.А. и Газизову Т.Р.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по проекту RFMEFI57417X0172.

Библиографический список

1. Хантресс У.Т., Маров М.Я. Советские роботы в Солнечной системе. Технологии и открытия. - М.: Физматлит, 2013. - 612 с.
2. Шангина Е.А., Патраев В.Е., Яковлев А.В. Конструктивные методы создания надежных космических аппаратов информационного обеспечения // Авиакосмическое приборостроение. 2014. № 6. С. 8 - 15.

3. Жаднов В.В., Артюхова М.А. Прогнозирование показателей надежности бортовой аппаратуры космических аппаратов при воздействии ионизирующих излучений низкой интенсивности // Надежность. 2015. № 1. С. 13 - 24.
4. Иванов В.А., Кириллов В.Ю., Морозов Е.П. Модельные и стендовые исследования электризации космических аппаратов / Под редакцией В.Ю. Кириллова. – М.: Изд-во МАИ, 2012. – 168 с.
5. Кириллов В.Ю., Томилин М.М. Воздействие преднамеренных электромагнитных помех на бортовые кабели космических аппаратов // Труды МАИ. 2013. № 66. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=40836>
6. Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Нгуен В.Х. Моделирование воздействия мощных электромагнитных помех на электротехнический комплекс самолета // Труды МАИ. 2013. № 71. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=46550>
7. Allocco J.M. Laminated bus bars for power system interconnects // Applied power electronics conference and exposition (APEC), 1997, vol. 2. pp. 585 - 589.
8. Wang J., Yang B., Zhao J., Deng Y., He X., Zhixin X. Development of a compact 750KVA three-phase NPC three-level universal inverter module with specifically designed busbar // Twenty-fifth annual IEEE Applied power electronics conference and exposition (APEC), 2010, pp. 1266 - 1271.
9. Stibgen M. Applying laminated busbars to enhance DC power distribution systems // 26th annual International telecommunications energy conference (INTELEC), 2004, pp. 537 - 541. DOI: [10.1109/INTLEC.2004.1401521](https://doi.org/10.1109/INTLEC.2004.1401521)

10. Momoh A.J., Xu K. Maximizing serviceability of a ring-bus power system in an spacecraft by implementing multiple objectives // 2005/2006 IEEE/PES Transmission and distribution conference and exhibition, 2006, pp. 909 - 914.
DOI: [10.1109/TDC.2006.1668619](https://doi.org/10.1109/TDC.2006.1668619)
11. Mankikar M. Analysis of various power supply business models // Sixteenth annual IEEE Applied power electronics conference and exposition (APEC), 2002, pp. 54 - 57.
DOI: [10.1109/APEC.2001.911626](https://doi.org/10.1109/APEC.2001.911626)
12. Lingjie K., Shanshui Y., Li W. Analysis on power supply and distribution system for spacecraft based on reliability // 15th European conference on power electronics and applications (EPE), 2013, pp. 1 - 9. DOI: [10.1109/EPE.2013.6631740](https://doi.org/10.1109/EPE.2013.6631740)
13. Hayashi H., Kuroda T., Kato K., Fukuda K., Baba S., Fukuda Y. ESD protection design optimization using a mixed-mode simulation and its impact on ESD protection design of power bus line resistance // International conference on simulation of semiconductor processes and devices, 2005, pp. 99 - 102.
DOI: [10.1109/SISPAD.2005.201482](https://doi.org/10.1109/SISPAD.2005.201482)
14. Luo F., Baisden A.C., Boroyevich D., Ngo K.D.T., Wang F., Mattavelli P., Coppola L., Gazel N., Kang Y. An improved design for transmission line busbar EMI filter // Energy conversion congress and exposition (ECCE), 2010, pp. 1232 - 1238.
DOI: [10.1109/ECCE.2010.5617826](https://doi.org/10.1109/ECCE.2010.5617826)

15. Шаймарданов Т.Р., Загитов Р.Р. Помехоподавляющее устройство для противодействия электромагнитным импульсам // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2014. Т. 1. № 10. С. 177 - 178.
16. Zhang X., Zhang H., Yu R.-W., Tan G.-J. Planar bus bar optimum design in high-power converters based on FEM analysis // The 2nd International symposium on power electronics for distributed generation systems, 2010, pp. 167 - 170.
17. Shashikiran H.K. Magnetic modelling to capture geometry based impedance matrix for Busbar // IEEE International transportation electrification conference (ITEC), 2015, pp. 1 - 3.
18. Eickhoff J. Simulating Spacecraft Systems, Berlin, Springer-Verlag, 2009, 353 p.
19. Zhang W., Zhang M.T., Lee F.C., Roudet J., Clavel E. Conducted EMI analysis of a boost PFC circuit // Applied power electronics conference and exposition (APEC), 1997, vol. 1, pp. 223 - 229.
20. Popa I., Dolan A.I. Numerical modeling of DC busbar contacts // 13th International conference on optimization of electrical and electronic equipment (OPTIM), 2012, pp. 188 - 193.
21. Smirnova L., Juntunen R., Murashko K., Musikka T., Pyrhönen J. Thermal analysis of the laminated busbar system of a multilevel converter // IEEE Transaction on power electronics, 2016, vol. 31, no. 2, pp. 1479 - 1488.
22. Liang H., Wang R., Bao L., Wang H., You J. Research on the distribution thermal FEM model for an enclosed isolated phase bus-bar in short-circuit condition // IEEE Holm conference on electrical contacts, 2017, pp. 55 - 58.

23. Hyder A.K., Wiley R.L., Halpert G., Flood D.J., Sabripour S. Spacecraft power technologies, London, World Scientific Publishing Company, 2010, 492 p.
24. Patel M.R. Spacecraft Power Systems, Boca Raton, CRC Press, 2005, 691 p.
25. TALGAT Система компьютерного моделирования электромагнитной совместимости. URL: www.talgat.org/talgat-software/
26. Gazizov T., Melkozerov A., Orlov P., Salov V., Ashirbakiev R., Akhunov R., Kuksenko S., Kalimulin I. New results on EMC simulation for space projects of TUSUR University // IEEE International conference on numerical electromagnetic modeling and optimization for RF, microwave, and terahertz applications (NEMO), 2014, pp. 1 - 4.
27. Gazizov T., Melkozerov A., Zabolotsky A., Kuksenko S., Orlov P., Salov V., Akhunov R., Kalimulin I., Surovtsev R., Komnatnov M., Gazizov A. Ensurance and simulation of electromagnetic compatibility: recent results in TUSUR University // International conference on applied physics, simulation and computers, 2015, pp. 1 - 12.
28. Djordjevich A.R., Biljic R.M., Likar-Smiljanic V.D., Sarkar T.K. Wideband frequency-domain characterization of FR-4 and time-domain causality // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, 2001, vol. 43, no 4, pp. 662 - 666.
29. Куксенко С.П., Газизов Т.Р. Усовершенствование алгоритма вычисления методом моментов ёмкостных матриц структуры проводников и диэлектриков в диапазоне значений диэлектрической проницаемости // Электромагнитные волны и электронные системы. 2012. № 10. С. 13 - 21.
30. Mora N., Vega F., Lugrin G., Rachidi F., Rubinstein M. Study and classification of potential IEMI sources // System design and assessment notes, note 41, 2014, pp. 1 - 48.

31. Газизов Р.Р., Заболоцкий А.М., Белоусов А.О., Газизов Т.Т. Локализация максимумов напряжения в шине печатной платы системы автономной навигации космического аппарата // Труды МАИ. 2016. № 89. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=73345>