

УДК 621.3.09

DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.4s.366.369

### Моделирование элементов критичной радиоэлектронной аппаратуры: новые подходы, модели и алгоритмы, их реализация и применение

#### Simulation of Radioelectronic Equipment Elements: New Approaches, Models, and Algorithms, Their Implementation and Application

Газизов Т. Р.<sup>1,2</sup>, д. т. н., Заболоцкий А. М.<sup>1</sup>, д. т. н., Куксенко С. П.<sup>1</sup>, к. т. н.,  
Комнатнов М. Е.<sup>1,2</sup>, к. т. н., Суворцев Р. С.<sup>1,2</sup>, к. т. н.

<sup>1</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

talgat@tu.tusur.ru, az@tu.tusur.ru

<sup>2</sup> НТУ «Сириус»

354340, г. Сочи, пр. Олимпийский, 1

Gazizov T. R., Sc.D, Zabolotsky A. M., Sc.D, Kuksenko S. P., Ph.D,  
Komnatnov M. E., Ph.D, Surovtcev R. S. Ph.D

<sup>1</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

40 Lenin Ave., Tomsk, 634050

talgat@tu.tusur.ru, az@tu.tusur.ru

<sup>2</sup> "Sirius" NTU

1 Olimpiyskiy Ave., Sochi, 354340

Описаны новые модели, алгоритмы и подходы для вычисления матриц  $L, C, R, G$ , откликов и уровня излучаемых эмиссий произвольных многопроводных структур, оценки эффективности экранирования корпусов и решения последовательности СЛАУ. Приведены примеры анализа и оптимизации новых элементов РЭА.

**Ключевые слова:** квазистатический анализ; линии передачи; система линейных алгебраических уравнений; электромагнитная совместимость.

New models, algorithms, and approaches are proposed for calculating  $L, C, R$ , and  $G$  matrices, responses, and radiated emissions of arbitrary multiconductor structures, as well as for estimating enclosure shielding effectiveness and solving a sequence of linear algebraic systems. Examples of analysis and optimization procedures for new elements of radioelectronic equipment are given.

**Keywords:** quasistatic analysis; transmission lines; linear algebraic systems; electromagnetic compatibility.

Рост сложности, плотности монтажа и верхней частоты спектра полезных и помеховых сигналов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) обострил проблему ее проектирования с учетом электромагнитной совместимости (ЭМС), сделав необходимым тщательное моделирование. Поэтому рынок программного обеспечения (ПО), особенно зарубежного, бурно развивается. Между тем для независимого проектирования критичной РЭА необходимы свои ПО, модели и алгоритмы. Однако, чтобы выдержать конкуренцию, их надо непрерывно совершенствовать. Цель

работы — представить новые подходы, модели и алгоритмы для моделирования элементов критичной РЭА с примерами их реализации и использования.

При моделировании РЭА важно корректно использовать три вида анализа, называемых схемотехническим, квазистатическим и электродинамическим и указанных в общем случае по нарастанию точности и вычислительных затрат. Поэтому основной акцент сделан на квазистатическом анализе как оптимальном.

Прежде всего решена ключевая задача вычисления матриц погонных параметров ( $L, C, R, G$ ) многопроводных линий передачи (МПЛП). Все они получаются на основе вычисления емкостной матрицы с помощью метода моментов по алгоритмическим моделям, отличающимся быстрым и точным вычислением элементов матрицы системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) по выражениям в замкнутом виде. Число и границы проводников и диэлектриков произвольны. Аналогичные модели созданы и для вычисления емкостной матрицы многопроводных 3D-структур, что позволяет приближенно моделировать неоднородности.

Затем реализовано вычисление отклика по аналитическим моделям для частных структур (из одно-, двух- и многокаскадных одиночных, связанных и многопроводных линий) и алгоритмическим моделям для произвольных схем МПЛП. При этом выявляются и локализуются экстремумы напряжения и тока вдоль отдельных проводников МПЛП, а также вычисляется уровень излучаемых эмиссий от МПЛП. Создана база данных воздействий: полезных (гармоническое, трапециевидное, задаваемое пользователем) и помеховых (электростатический разряд, затухающая синусоида, сверхкороткие импульсы генераторов преднамеренных воздействий). Для оценки опасности результатов воздействия используются пять специальных норм из стандарта IEC 61000-4-33.

Отслеживается тенденция использования разных солверов (для проверки достоверности результатов моделирования). Так, реализовано вычисление емкостной матрицы другим методом — конечных элементов. Для более точной оценки излучаемых эмиссий или эффективности экранирования (ЭЭ) произвольной трехмерной структуры используется электродинамический анализ методом моментов на основе тонкопроводной аппроксимации. Для быстрой оценки ЭЭ корпусов со щелями разработан ряд новых аналитических моделей. Для получения наилучших характеристик со всеми видами анализа используется многокритериальная структурно-параметрическая оптимизация генетическими алгоритмами и эволюционными стратегиями.

Для уменьшения вычислительных затрат большое внимание уделено решению СЛАУ. В частности, для ускорения (на порядки) анализа чувствительности, частотных характеристик и оптимизации разработаны новые модели, алгоритмы и подходы для решения последовательности СЛАУ блочными, итерационными и гибридными методами.

Все результаты многократно протестированы, реализованы в ПО TALGAT и использованы для решения актуальных задач. Так, обеспечено моделирование целостности сигнала и питания, а также ЭМС, унифицированных электронных модулей и печатных плат системы автономной навигации космического аппарата (КА). Создан аппаратно-программный комплекс для синтеза оптимальной сети высоковольтного электропитания КА. Разработаны и запатентованы новые способы и устройства (более 20) для защиты элементов критичной РЭА на основе

меандровых линий и модальных фильтров, в том числе для резервирования цепей РЭА с обеспечением и надежности, и ЭМС.

*Работа поддержана проектами РФФИ (20-37-70020, 19-37-51017),  
РНФ (19-19-00424, 19-79-10162, 20-19-00446) и Минобрнауки РФ  
(FEWM-2020-0041, FEWM-2020-0039).*

An increase in the complexity, package density, and upper spectrum frequency of useful and interfering signals of radioelectronic equipment (REE) has aggravated the problem of REE design taking into account electromagnetic compatibility (EMC), which makes careful simulation particularly necessary. Therefore, a market of relevant software, especially foreign, is actively developing. However, for designing specific critical REE, domestic software, mathematical models, and computational algorithms are essential. In the meantime, to withstand the competitive environment they must be continuously improved. The aim of this paper is to present new approaches, models, and algorithms for simulating critical REE elements with examples of their implementation and application. When simulating, it is important to use three types of analysis: circuit, quasistatic, and electromagnetic. They are listed here, in general, in the order of increase in their accuracy and computational costs. Therefore, we have paid main attention to quasistatic one as optimal.

First of all, we have solved the crucial task of computing the per-unit-length parameter matrices (**L**, **C**, **R**, **G**) of multiconductor transmission lines (MCTLs). They all are obtained using capacitive matrix computation based on the method of moments with algorithmic models distinguished by quick and accurate computing of the entries of linear algebraic systems (LAS) by using expressions in a closed form. Numbers and boundaries of conductors and dielectrics are arbitrary. Similar models have been developed also for computing the capacitive matrix of multiconductor 3D-structures in order to approximately simulate various discontinuities.

Then, we have implemented computation of a response by analytic models for particular circuits (consisting of one, two, and multiple cascades of single, coupled, and multiconductor transmission lines) and algorithmic models for arbitrary circuits of MCTLs. Herewith, we reveal and localize voltage and current extremes along each conductor of the MCTL and also compute a level of radiated emissions from the MCTL. A database of useful (harmonic, trapezoidal, user-defined) and harmful (electrostatic discharge, damped sinusoid, ultra-wideband pulses of various generated of intentional electromagnetic interferences) excitations has been designed. To predict the danger of the excitations effect we use five special norms of standard IEC 61000-4-33.

We tend to use various solvers (for validating the simulation results). So, computation of a capacitive matrix by another (finite element) method is implemented. For more accurate computation of radiated emissions or shielding effectiveness (SE) of an arbitrary 3D-structure, we use the electromagnetic analysis by the method of moments with thin-wire approximation. To quickly estimate we develop the SE of an enclosure with slots, a number of new analytical models. To obtain the best characteristics with all analysis types, we use multicriteria structure-parametric optimization by genetic algorithms and evolution strategies. To reduce the computational costs, we pay close attention to solving LASs.

Particularly, to accelerate (by orders of magnitude) the analysis of sensitivity and frequency characteristics and optimization, we have developed new approaches, models, and algorithms for solving the sequence of LASs by the block, iterative and hybrid methods.

The described results have been repeatedly tested, implemented in the TALGAT software, and used for solving the actual problems. Thus, we have assured the simulation of signal and power integrity, as well as EMC, of a unified electronic module and circuit boards of a spacecraft autonomous navigation system. We have developed a hardware and software complex for creating the optimal network of high voltage electrical power system. Moreover, we have designed and patented new methods and devices (more than 20) for protecting the elements of critical REE based on meander lines and modal filters, including those for providing reservation of REE circuits, and at the same time assuring reliability and EMC.

*The study was supported by projects of RFBR (20-37-70020, 19-37-51017),  
RSF (19-19-00424, 19-79-10162, 20-19-00446) and Ministry of Education and Science  
of the Russian Federation (FEWM-2020-0041, FEWM-2020-0039).*