

Оригинальное исследование

УДК 537.242

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_407

EDN: BGRVLZ

Компьютерное моделирование воздействия электростатического разряда в частотной области

Р.Я. Низкий

Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия;

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Актуальность работы обусловлена необходимостью создания средств компьютерного моделирования, позволяющих оценивать результат воздействия электромагнитных помех на блоки аппаратуры на стадии проектирования.

Цель работы. Установить возможность применения вычислительных методов частотной области для моделирования переходных процессов, возникающих при воздействии электростатического разряда на блоки аппаратуры.

Материалы и методы. В работе предлагается для моделирования стандартизованных воздействий электростатических разрядов на блоки аппаратуры использовать метод поверхностных интегральных уравнений в частотной области. Для этого к стандартизованному току разряда применяется быстрое преобразование Фурье и методами частотной области моделируется воздействие сосредоточенного источника гармонического тока для ряда частот. Для каждой частоты определяется коэффициент преобразования воздействия в помеху. Временные зависимости наведенных электростатическим разрядом напряжений и токов получаются в результате обратного быстрого преобразования Фурье, примененного к произведению спектра тока разряда и соответствующего коэффициента преобразования.

Результаты. Результаты, полученные с помощью методов частотной области и методов временной области, совпадают с достаточной для практических расчетов точностью. При этом воздействие каждой частотной составляющей анализируется независимо, что допускает высокую степень параллелизации вычислений, в то время как расчет методами временной области требует завершения расчетов для предшествующих моментов времени. Требования к размеру элементов расчетной сетки определяются длиной волны на максимальной учитываемой частоте.

Заключение. В работе показана принципиальная возможность использования методов частотной области для моделирования импульсных электромагнитных воздействий, таких как воздействие электростатического разряда. Частотные зависимости коэффициентов преобразования и спектральной плотности помех предоставляют дополнительную информацию о связи уровней помех с геометрией блоков аппаратуры и о возможных путях их снижения.

Ключевые слова: электростатический разряд; компьютерное моделирование; поверхностные интегральные уравнения; численные методы частотной области; электромагнитная совместимость; спектральная плотность; быстрое преобразование Фурье.

Как цитировать

Низкий Р.Я. Компьютерное моделирование воздействия электростатического разряда в частотной области // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 3. С. 407–412. DOI: 10.52899/24141437_2025_03_407 EDN: BGRVLZ

Original Study Article

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_407

EDN: BGRVLZ

Computer Simulation of Effects of Electrostatic Discharge in Frequency Domain

Roman Ya. Nizkiy

Krylov State Research Centre, Saint Petersburg, Russia;
Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: There's a need to develop computer modeling tools that allow assessing the effect of electromagnetic interference on equipment units at the design stage.

AIM: To determine the possibility of using frequency domain computational methods to simulate transient processes, when an electrostatic discharge affects equipment units.

METHODS: The paper proposes to use surface integral equations in the frequency domain to model standardized effects of electrostatic discharges on equipment units. For this, the fast Fourier transform is applied to the standardized discharge current and the effect of a lumped harmonic current source for a frequency sequence is modeled using frequency domain methods. The effect-to-interference conversion factor is determined for each frequency. The time dependences of the voltages and currents induced by electrostatic discharge are determined by the inverse fast Fourier transform applied to the product of the discharge current spectrum and the corresponding conversion factor.

RESULTS: The results obtained by the proposed frequency domain methods match the results of time domain methods with a reasonable degree of accuracy for practical calculations. In this case, the effect of each frequency component is analyzed independently, allowing for a high degree of parallelization of calculations; whereas calculations using time domain methods require completed calculations for previous time points. Requirements to the size of mesh elements are determined by the wavelength at the maximum frequency used.

CONCLUSION: The paper demonstrates the fundamental possibility of using frequency domain methods to model pulsed electromagnetic effects, including the effect of electrostatic discharge. Frequency dependences of the conversion factors and the spectral density of interference provide additional information on the relationship between interference levels and the geometry of equipment units and possible ways to reduce them.

Keywords: electrostatic discharge; computer simulation; surface integral equations; computational frequency domain methods; electromagnetic compatibility; spectral density; fast Fourier transform.

To cite this article

Nizkiy RYa. Computer Simulation of Effects of Electrostatic Discharge in Frequency Domain. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(3):407–412. DOI: 10.52899/24141437_2025_03_407 EDN: BGRVLZ

ВВЕДЕНИЕ

Электростатический разряд (ЭСР) является часто встречающимся видом непреднамеренных электромагнитных воздействий, которые могут привести к временным сбоям в работе или выходу из строя аппаратуры. Обычно ЭСР происходит при приближении человека с накопленным электрическим зарядом к блоку аппаратуры на расстояние, достаточное для возникновения разряда между проводящими частями блока и телом человека или металлическим предметом в его руках. Импульсный ток, возникающий при разряде и растекающийся по проводникам блока аппаратуры, создает электромагнитное поле, которое может негативно влиять на микроэлектронные компоненты. Параметры импульсного тока зависят от условий эксплуатации аппаратуры, например, от относительной влажности воздуха и от материалов, с которыми соприкасается человек. Для унификации методов испытаний на устойчивость к ЭСР и испытательного оборудования, в действующих стандартах [1, 2] зафиксированы формы разрядных токов.

На распределение токов ЭСР по проводникам блоков аппаратуры и электромагнитных полей внутри блоков влияет геометрия элементов блоков и электромагнитные свойства материалов, из которых они изготовлены. Современные средства автоматического проектирования и методы вычислительной электродинамики дают возможность предсказывать результат воздействия ЭСР на аппаратуру с помощью компьютерного моделирования на этапе проектирования до изготовления и испытания аппаратуры. Традиционно для компьютерного моделирования воздействия ЭСР с учетом геометрии аппаратуры используются методы временной области, в которых электромагнитные поля рассчитываются последовательно для ряда моментов времени. К таким методам относится метод конечного интегрирования (FIT) [3, 4], метод конечных разностей во временной области (FDTD) [5, 6] и метод конечных элементов, реализованный, например, в среде моделирования [7].

Кроме того, воздействие тока ЭСР можно рассчитать методами частотной области. В этом случае необходимо аппроксимировать стандартную форму тока суммой конечного числа синусоидальных токов различных частот и провести анализ воздействия для каждой из частот, что позволит уменьшить число элементов, на которые разбивается геометрия модели и предоставит дополнительную информацию о связи уровней помех с геометрией блоков аппаратуры. Подобный подход использовался в [8] для моделирования влияния коронного разряда на антенны самолетов.

ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ

Пусть импульсный ток ЭСР задается функцией $i(t)$ от времени t . Обозначим через i_n значения тока $i(t_n)$

в моменты времени $t_n = n\tau$, $n = 0, \dots, N - 1$, где τ — шаг дискретизации по времени, N — число отсчетов. Применяя к последовательности i_n дискретное преобразование Фурье, получаем последовательность комплексных величин

$$I_k = \sum_{n=0}^{N-1} i_n e^{-\frac{2\pi j}{N} kn}, \quad (1)$$

где j — мнимая единица. Для $k = 0, \dots, N/2$ величины I_k пропорциональны комплексным амплитудам спектральных составляющих $i(t)$, соответствующих частотам

$$f_k = \frac{k}{N\tau}. \text{ Для } k = N/2 + 1, \dots, N - 1 \text{ выполняется}$$

соотношение

$$I_k = (I_{N-k})^*, \quad (2)$$

где знак $*$ обозначает комплексное сопряжение.

Далее для каждой частоты f_k , $k = 0, \dots, N/2$ численными методами частотной области определяем результат воздействия на исследуемый объект гармонического источника тока с амплитудой 1 А. Если исследуемый объект состоит преимущественно из тонких проводящих поверхностей, достаточно использовать поверхностное интегральное уравнение электрического поля (ИУЭП) [9]. При необходимости учета магнитных свойств материалов решается система из ИУЭП и интегрального уравнения магнитного поля [10]. Для включения в модель диэлектрических объемных элементов, поверхностные интегральные уравнения обобщаются до объемно-поверхностных интегральных уравнений [11, 12].

В каждом из упомянутых интегральных уравнений неизвестными функциями являются распределения токов (токов проводимости для проводников, токов смещения для диэлектриков, магнитных токов для магнитных материалов). Геометрия модели разбивается на треугольные и тетраэдральные элементы (только те части, на которых индуцируется ток). Токи аппроксимируются линейной комбинацией базисных функций, каждая из которых определена на двух или большем числе треугольников и тетраэдров. Для сведения интегральных уравнений к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) применяется схема Галеркина. В результате решения СЛАУ определяются распределения токов по всему объекту и могут быть вычислены наведенные напряжения.

Для каждой интересующей величины помехи (тока или напряжения) полученное значение K_k имеет смысл коэффициента преобразования спектральной составляющей частоты f_k тока ЭСР в соответствующую спектральную составляющую помехи. Величины X_k , пропорциональные комплексным амплитудам спектральных составляющих помехи, будут иметь вид

$$X_k = K_k I_k. \quad (3)$$

Определяя X_k для $k = N/2 + 1, \dots, N - 1$ по формуле $X_k = (X_{N-k})^*$ и применяя к X_k обратное дискретное преобразование Фурье

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{2\pi j}{N} kn} \quad (4)$$

получаем значения помехи $x(t)$ в моменты времени t .

ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР

Для сравнения результатов, полученных с помощью известных методов временной области и предложенного метода, рассмотрим конфигурацию, являющуюся упрощением примера [7], иллюстрирующего возможности пакета математического моделирования для моделирования воздействия ЭСР.

Ток ЭСР задается между проводящей горизонтальной пластиной связи размером 100×60 мм и перпендикулярной ей металлической полоской размером 60×1 мм,

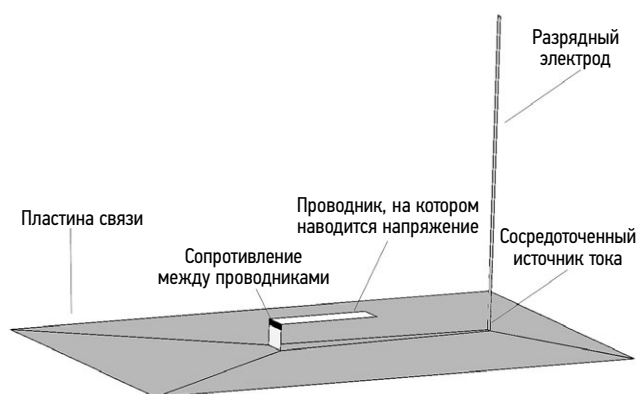


Рис. 1. Геометрия модели.

Fig. 1. Model geometry.

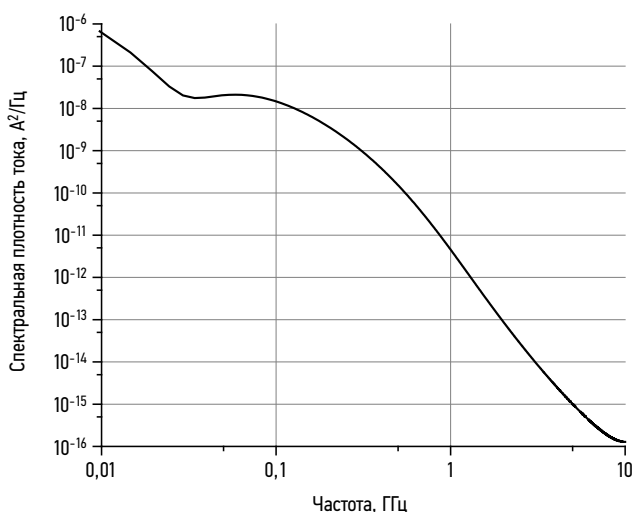


Рис. 2. Спектральная плотность тока электростатического разряда.

Fig. 2. Spectral density of electrostatic discharge current.

моделирующей разрядный электрод испытательного генератора или металлический предмет в руке человека (рис. 1). Точка соприкосновения разрядного электрода и пластины связи находится на расстоянии 15 мм от короткой стороны пластины и на равном расстоянии от двух длинных ее сторон. В центре пластины на расстоянии 5 мм от нее расположен проводник размером 20×5 мм. Проводник и пластина соединены вертикальным проводником. Между вертикальным и горизонтальным проводниками задано сопротивление 50 Ом. В качестве величины помехи рассматривается напряжение на этом сопротивлении (которое соответствует потенциалу, наведенному на горизонтальном проводнике относительно пластины связи). Все проводники предполагаются идеально проводящими.

В соответствии с [1] и [2] ток ЭСР при испытательном напряжении 4 кВ задается формулой:

$$i(t) = 48,04 \frac{\left(\frac{t}{1,1}\right)^{1,8}}{1 + \left(\frac{t}{1,1}\right)^{1,8}} e^{\left(-\frac{t}{2}\right)} + 21,55 \frac{\left(\frac{t}{12}\right)^{1,8}}{1 + \left(\frac{t}{12}\right)^{1,8}} e^{\left(-\frac{t}{37}\right)}, \quad (5)$$

где t — время, выраженное в наносекундах. На рис. 2 показана спектральная плотность тока (5), полученная с помощью быстрого преобразования Фурье с шагом по времени $\tau = 0,05$ нс и числом отсчетов $N = 4096$.

На рис. 3 показана зависимость коэффициента преобразования К гармонического тока между разрядным электродом и пластиной связи в напряжение на сопротивлении от частоты, рассчитанная в программе «STAR3D High Frequency», разработанной во ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Решение получено численным решением ИУЭП для сетки, состоящей из 1690 треугольников. Зависимость имеет резонансный характер, максимум модуля коэффициента преобразования достигается на частотах около 2,2 ГГц, 4,4 ГГц,

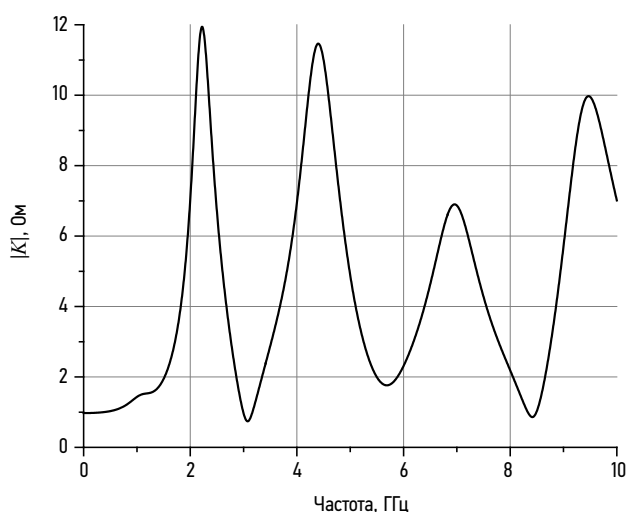


Рис. 3. Зависимость коэффициента преобразования от частоты.

Fig. 3. Relationship between the conversion factor and frequency.

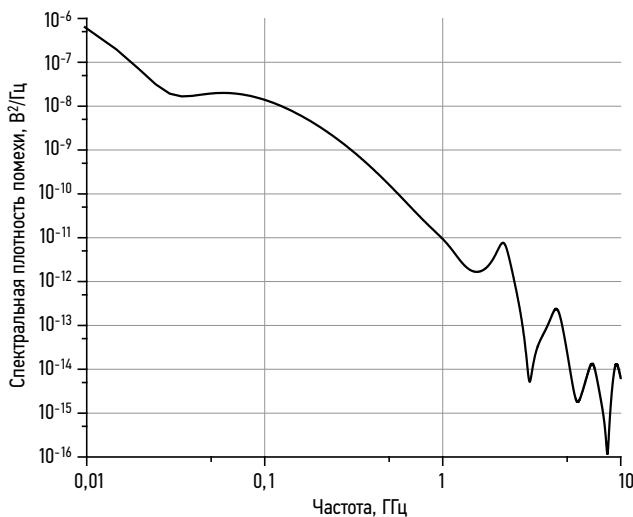


Рис. 4. Спектральная плотность помехи от электростатического разряда.
Fig. 4. Spectral density of electrostatic discharge interference.

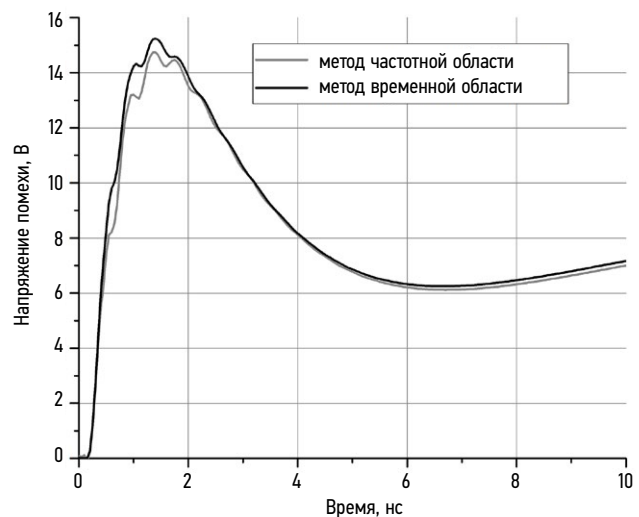


Рис. 5. Временная зависимость напряжения помехи.
Fig. 5. Time dependence of interference voltage.

7,0 ГГц, 9,5 ГГц. Применение формулы (3) позволяет определить спектральный состав помехи (рис. 4). На рис. 5 сравнивается временная зависимость напряжения помехи, полученная по формуле (4) (серая кривая), с результатами, полученными методом конечных элементов во временной области в пакете математического моделирования (черная кривая). Кривые хорошо совпадают, различие максимальных значений напряжения составляет 0,8 В (5%).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показана принципиальная возможность использования методов частотной области для моделирования импульсных электромагнитных воздействий, таких как воздействие ЭСР. При этом воздействие каждой частотной составляющей анализируется независимо, что допускает высокую степень параллелизации вычислений, в то время как расчет методами временной области требует завершения расчетов для предшествующих моментов времени. Требования к размеру элементов расчетной сетки определяются длиной волны на максимальной учитываемой частоте. Результаты, полученные с помощью методов частотной области и методов временной области, совпадают с достаточной для практических расчетов точностью.

Анализ спектральных составляющих воздействия и помехи, зависимости коэффициента преобразования воздействия в помеху от частоты дает дополнительную информацию о связи уровней помех с геометрией блоков аппаратуры и о возможных путях их снижения. При дальнейшем совершенствовании методов моделирования воздействия электростатического разряда необходимо учесть зависимость формы разрядного тока от параметров блоков, на которые воздействует разряд.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Автор статьи одобрил ее рукопись (версию для публикации).

Источники финансирования. Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали один рецензент, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: The author approved the version of the manuscript to be published.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved one reviewer, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 30804.4.2-2013 (IEC 61000-4-2:2008). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2014.
2. IEC 61000-4-2:2008 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-2: Testing and measurement techniques — Electrostatic discharge immunity test. Geneva: IEC, 2008.
3. Hosseinbeig A., Izadi O.H., Solanki S., et al. Methodology for analyzing ESD-induced soft failure using full-wave simulation and measurement // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2018. Vol. 61, N. 1. P. 11–19. doi: 10.1109/TEM.2017.2787721
4. Yang L., Yang C., Tu Y., et al. Field-circuit co-simulation method for electrostatic discharge investigation in electronic products // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 33512–33521. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3061125 EDN: LWPSTC
5. Teixeira F.L., Sarris C., Zhang Y., et al. Finite-difference time-domain methods // *Nature Reviews Methods Primers*. 2023. Vol. 3, N. 1. doi: 10.1038/s43586-023-00257-4 EDN: JVNGOE
6. Angeli M., Cardelli F. Numerical modeling of electromagnetic fields generated by electrostatic discharges // *IEEE Transactions on Magnetics*. 1997. Vol. 33, N. 2. P. 2199–2202. doi: 10.1109/20.582769
7. Electrostatic Discharge (ESD) Test of a PCB. 2023. [internet] Дата обращения: 11.05.2025. Режим доступа: <https://www.comsol.com/model/electrostatic-discharge-esd-test-of-a-pcb-109291>.
8. Fu H.-Z., Xie Y.-J., Zhang J. Analysis of corona discharge interference on antennas on composite airplanes // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2008. Vol. 50, N. 4. P. 822–827. doi: 10.1109/TEM.2008.2004598
9. Rao S., Wilton D., Glisson A. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1982. Vol. 30, N. 3. P. 409–418. doi: 10.1109/TAP.1982.1142818
10. Гримальский О.В., Лаповок А.Я. Устранение низкочастотной неустойчивости в вычислительных моделях электромагнитного поля оболочек и проводников // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2006. №. 4. С. 26–39. EDN: HULFBZ
11. Lapovok A., Nizkiy R., Shikhov I., Grimal'skiy O. Selection of basis functions for volume-surface integral equation using spanning tree. In: 2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). IEEE, 2014. P. 2138–2139. doi: 10.1109/APS.2014.6905396 EDN: UFBNXH
12. Liu J., Li Z., Su J., Song J. On the volume-surface integral equation for scattering from arbitrary shaped composite PEC and inhomogeneous bi-isotropic objects // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 85594–85603. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2923650

REFERENCES

1. GOST 30804.4.2-2013 (IEC 61000-4-2:2008). Electromagnetic compatibility of technical equipment. Immunity to electrostatic discharges. Requirements and test methods. Moscow: Standartinform; 2014. (In Russ.)
2. IEC 61000-4-2:2008 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4–2: Testing and measurement techniques — Electrostatic discharge immunity test. Geneva: IEC; 2008.
3. Hosseinbeig A, Izadi OH, Solanki S, et al. Methodology for analyzing ESD-induced soft failure using full-wave simulation and measurement. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2018;61(1):11–19. doi: 10.1109/TEM.2017.2787721
4. Yang L, Yang C, Tu Y, et al. Field-circuit co-simulation method for electrostatic discharge investigation in electronic products. *IEEE Access*. 2021;9:33512–33521. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3061125 EDN: LWPSTC
5. Teixeira FL, Sarris C, Zhang Y, et al. Finite-difference time-domain methods. *Nature Reviews Methods Primers*. 2023;3(1). doi: 10.1038/s43586-023-00257-4 EDN: JVNGOE
6. Angeli M, Cardelli F. Numerical modeling of electromagnetic fields generated by electrostatic discharges. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1997;33(2):2199–2202. doi: 10.1109/20.582769
7. Electrostatic Discharge (ESD) Test of a PCB. 2023. [internet] Accessed: 11.05.2025. Available from: <https://www.comsol.com/model/electrostatic-discharge-esd-test-of-a-pcb-109291>
8. Fu H-Z, Xie Y-J, Zhang J. Analysis of corona discharge interference on antennas on composite airplanes. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2008;50(4):822–827. doi: 10.1109/TEM.2008.2004598
9. Rao S, Wilton D, Glisson A. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1982;30(3):409–418. doi: 10.1109/TAP.1982.1142818
10. Grimal'skiy OV, Lapovok AY. Elimination of low-frequency instability in computational models of the electromagnetic field of shells and conductors. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika*. 2006;4:26–39. (In Russ.) EDN: HULFBZ
11. Lapovok A, Nizkiy R, Shikhov I, Grimal'skiy O. Selection of basis functions for volume-surface integral equation using spanning tree. In: 2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). IEEE; 2014:2138–2139. doi: 10.1109/APS.2014.6905396 EDN: UFBNXH
12. Liu J, Li Z, Su J, Song J. On the volume-surface integral equation for scattering from arbitrary shaped composite PEC and inhomogeneous bi-isotropic objects. *IEEE Access*. 2019;7:85594–85603. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2923650

ОБ АВТОРЕ

Низкий Роман Яковлевич,

канд. техн. наук, старший научный сотрудник,
Крыловский государственный научный центр;
заведующий базовой кафедрой физических полей
объектов морской техники и океана, Санкт-Петербургский
государственный морской технический университет;
адрес: Россия, 196158, Санкт-Петербург, Московское ш., д. 44;
eLibrary SPIN: 6115-8881;
e-mail: nizkyroman@gmail.com

AUTHOR INFO

Roman Ya. Nizkiy,

Cand. Sci. (Engineering), Senior Scientific Employee,
Krylov State Research Centre;
Head of the Basic Department of Physical Fields of Marine
Engineering and Ocean Facilities, Saint Petersburg State Marine
Technical University;
address: 44 Moskovskoe hwy, Saint Petersburg, Russia, 196158;
eLibrary SPIN: 6115-8881;
e-mail: nizkyroman@gmail.com