

Научная статья
УДК 537.86
DOI: [10.34759/trd-2022-123-27](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-27)

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Андрей Николаевич Дементьев¹, Дмитрий Сергеевич Ключев²,
Артём Николаевич Новиков³, Андрей Сергеевич Межнов⁴✉,
Юлия Алексеевна Питерскова⁵, Екатерина Вячеславовна Захарова⁶,
Лев Андреевич Дементьев⁷

^{1,2,3,4,5,6,7}Российский технологический университет – МИРЭА,
Москва, Россия

¹Dementev@mirea.ru

²klyuevd@yandex.ru

³band31@mail.ru

⁴Mezhnov.a.s@edu.mirea.ru ✉

Аннотация. Задача обеспечения электромагнитной совместимости бортовой аппаратуры летательного аппарата имеет важное значение, так как от ее реализации зависит качество функционирования летательного аппарата. Существует множество подходов для решения данной задачи, однако все они носят общий характер и не позволяют решить ее комплексно. В статье для комплексного решения данной задачи проведена её декомпозиция на частные задачи. Отдельно рассмотрено взаимодействие проводов бортовой кабельной сети между собой, учтено влияние

бортовой аппаратуры на бортовую кабельную сеть и определена напряженность электрического поля, создаваемая бортовой аппаратурой и бортовой кабельной сетью внутри летательного аппарата и за его пределами.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, экран, напряженность электрического поля, напряжение, бортовая аппаратура, металлизация

Для цитирования: Дементьев А.Н., Ключев Д.С., Новиков А.Н., Межнов А.С., Питерскова Ю.А., Захарова Е.В., Дементьев Л.А. Модель процесса оценки электромагнитной совместимости бортовой аппаратуры летательного аппарата // Труды МАИ. 2022. № 123. DOI: [10.34759/trd-2022-123-27](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-27)

MODEL OF THE PROCESS OF ASSESSING THE ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF THE ONBOARD EQUIPMENT OF THE AIRCRAFT

Andrey N. Dementiev¹, Dmitry S. Klyuev², Artem N. Novikov³, Andrey S. Mezhnov⁴✉,
Yulia A. Peterskova⁵, Ekaterina V. Zakharova⁶, Lev A. Dementiev⁷

^{1.2.3.4.5.6.7}MIREA - Russian Technological University,

Moscow, Russia

¹Dementev@mirea.ru

²klyuevd@yandex.ru

³band31@mail.ru

⁴Mezhnov.a.s@edu.mirea.ru✉

Abstract. As of now, the problem solution on space-rocket technology (SRT) application is impossible without radio-electronic means (REM) employing. This fact leads to the radio-frequency space oversaturation with electromagnetic radiation in the whole

frequency range. The main causes, requiring effectiveness enhancing of the frequency spectrum employing and providing the REM joint operation under conditions of restricted space-time and frequency resources are:

- Expansion of the scope of the REM application for the SRT;
- Increase in their power and number;
- Sensitivity growth of radio receiving equipment;
- Impact of the great number of jamming sources on the REM

Problems of assessing electromagnetic environment (EME), and determining various electromagnetic compatibility (EMC) characteristics occur while the RST REM operation. Thus, the search for new ways of ensuring the REM joint functioning with the specified quality under conditions of limited frequency, time and territorial resources is up-to-date.

The EMC tasks consist in the following:

- establishing regularities for the optimal application of the radio frequency fields being created for information transmitting and/or receiving or extracting;
- establishing regularities of undesirable interaction of simultaneously functioning REM;
- identifying the ways and developing criteria and methods for the radio frequency space maximum application efficiency and capacity, including operational-technical characteristics of the REM, affecting the REM EMC;
- synthesizing the REM with the specified characteristics of the radio frequency spectrum (RFS) application, i.e. the characteristics, which include accounting for both out-of-band and stray radiation, and side reception channels.

With the scores of the onboard equipment with various characteristics and widely ramified onboard cable network (OCN) on the SRO, solution of the above said tasks relative to their interaction is of utter importance while the SRO development and manufacturing.

This will allow:

- analyzing the EME onboard the RST objects;
- evaluating the EME level with account for the frequency and spatial separation of the onboard equipment and OCN;
- determining the ways to EMC ensuring of the OE and OCN under specific operating conditions;
- simulating the processes of the electronic equipment functioning under complex EME.

This set of techniques and algorithms novelty consists in solving partial problems with the subsequent comparison of the obtained total values of the electric field strength at the specified points of the RST object, and the voltage induced on the OCN cables with the specified requirements, according to the developed techniques.

Keywords: electromagnetic compatibility, screen, electric field strength, voltage, on-board equipment, metallization

For citation: Dementyev A.N., Klyuev D.S., Novikov A.N., Mezhnov A.S., Piterskova Y.A., Zakharova E.V., Dementyev L.A. Model of the process of assessing the electromagnetic compatibility of the onboard equipment of the aircraft. *Trudy MAI*, 2022. no. 123. DOI: [10.34759/trd-2022-123-27](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-27)

Задача обеспечения электромагнитной обстановки, в том числе электромагнитной совместимости (ЭМС) бортовой аппаратуры (БА) имеет важное значение, так как от ее корректной реализации зависит качество выполнения задач летательным аппаратом по его прямому предназначению. Для решения этой задачи необходимо провести ее декомпозицию на частные задачи. Для этого общую математическую модель процесса оценки ЭМС БА необходимо декомпозировать на ряд частных моделей, таких как:

- модель оценки влияния проводов бортовой кабельной сети (БКС) друг на друга;
- модель оценки влияния БА на БКС;
- модель учета влияния напряженности поля, создаваемой БКС в точках пространства;
- модель оценки влияния излучения электрического поля БА на напряженность в заданных точках летательного аппарата.

Далее производится сравнение полученных суммарных значений напряженности электрического поля в заданных точках летательного аппарата и напряжения, наведенного на провода БКС, с заданными требованиями, и делается вывод об обеспечении ЭМС БА.

Так как каждый провод БКС имеет сложную пространственную ориентацию, становится невозможным рассчитать излучаемое им электромагнитное поле. Для разрешения возникшего противоречия была разработана математическая модель, в которой каждый провод разделяется на фрагменты, координаты начала и конца которых задаются в исходных данных и совпадают с координатами точек изгиба

провода. Все расчеты, согласно модели, производятся именно для фрагментов провода, а далее определенным образом суммируются.

При расчетах в математической модели учитывается ослабление электромагнитного поля экранами проводов, металлизацией и элементами конструкции. При этом для учета влияния металлизации и элементов конструкции был разработан нестандартный подход.

Впервые полигональную 3D - модель, представленную набором элементарных треугольников, было предложено представить и далее рассчитать, как набор элементарных сфер с координатами центра каждой сферы и ее радиусом, что значительно позволило сократить вычислительную сложность решения задачи обеспечения ЭМС БА летательного аппарата.

Математическая модель учета влияния элементов конструкции на распространение электромагнитного поля

Основой модели является создание множества пространственных фигур (далее – фигуры), каждая из которых обладает действующим радиусом R . Метод заключается в обработке плоских треугольников, образующих 3D - модель изделия, с заданными координатами вершин, с целью определения для каждого треугольника координат центра и радиуса вписанной в него окружности (соответствующей фигуры). На рисунке 1 представлен один из треугольников ABC , из которых образуется 3D - модель летательного аппарата.

В соответствии с выбранным представлением 3D - модели, а также с учётом того факта, что расчёты проводятся для конечного набора точек, распространение

напряжённостей интерпретируется геометрическими лучами, с началом в точках генерации напряжённостей и направлением на расчётные точки.

Точками генерации, в контексте учёта влияния корпуса на распространение электромагнитных волн в данной модели являются геометрические центры ББА и середины фрагментов проводов БКС. Для понимания работы методики достаточно рассмотреть один ББА с геометрическим центром в точке U и координатами (U_x, U_y, U_z) .

Точками расчёта являются точки пространства. Для понимания сути модели достаточно рассмотреть одну точку пространства C с координатами (C_x, C_y, C_z) .

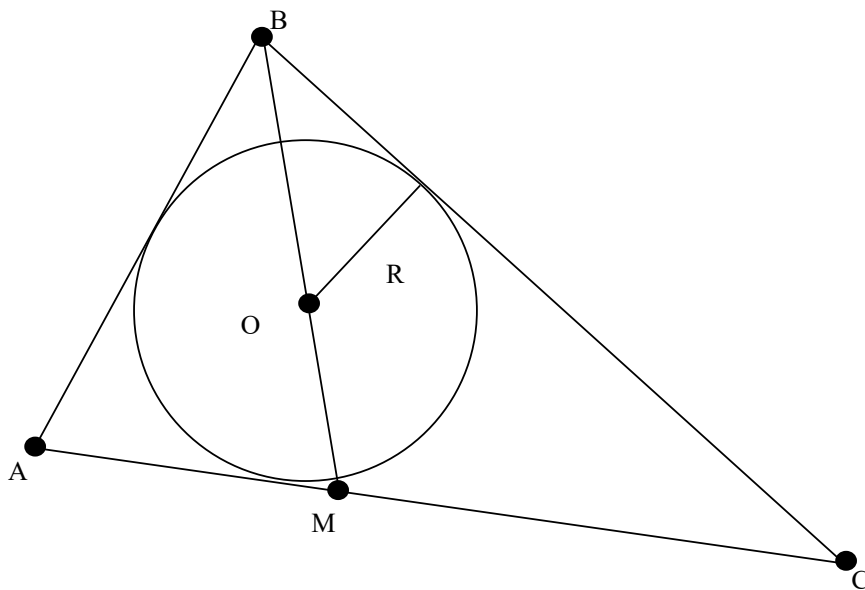


Рисунок 1 – Один из произвольных треугольников, из которых образуется 3D - модель изделия

Каждый луч, идущий из точки генерации в расчётную точку, проходит либо через пустое пространство, либо через элемент конструкции, которым условно является окружность, представленная на рисунке 2.

Пустое пространство не создаёт какого-либо экранирования проходящему лучу. Экранирование возникает лишь при прохождении луча сквозь какую-либо фигуру. Для расчёта суммарного экранирования луча возникает задача определения сочетания длин его прохождения через пустое пространство и длин его прохождения через окружности (фигуры) (рисунок 2).

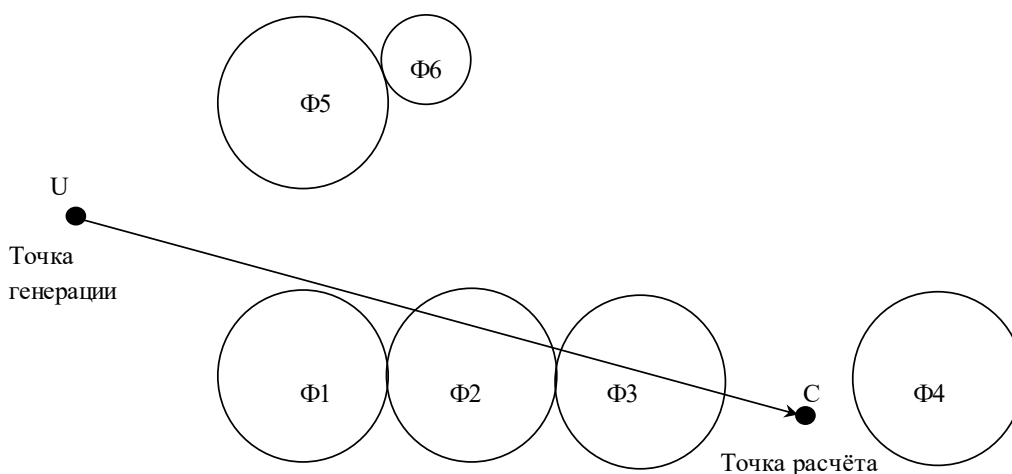


Рисунок 2 – Схема прохождения луча напряжённости через пустое пространство и фигуры

Из рисунка 2 видно, что задача сводится к нахождению точек пересечения фигур лучом, и определению расстояния между ними. Для понимания физики процесса достаточно рассмотреть один фрагмент, одну точку пространства и находящуюся между ними одну фигуру.

Коэффициент ослабления рассчитывается по формуле [2 - 8]:

$$SEgd = 322 + 10 \lg \left(\frac{\frac{\sigma}{\sigma_{Cu}}}{r^2 f_{ББА}^3 \frac{\mu a}{\mu a_{Cu}}} \right) +$$

$$131,4 T \sqrt{f_{ББА} \frac{\mu a}{\mu a_{Cu}} \frac{\sigma}{\sigma_{Cu}}}, [\text{дБ}],$$
(1)

где $SEgd$, (дБ) – коэффициент ослабления электрической составляющей поля;

σ , (см/м) – абсолютная проводимость фигуры 3D - модели;

σ_{Cu} , (см/м) – абсолютная проводимость меди;

μa , (Гн/м) – абсолютная магнитная проницаемость фигуры 3D - модели;

μa_{Cu} , (Гн/м) – абсолютная магнитная проницаемость меди;

T , (м) – толщина экрана;

r , (м) – расстояние от точки излучения до экрана;

$f_{ББА}$, (Гц) – частота излучения электрического поля от ББА.

Перевод полученных значений из децибел в разы осуществляется по формулам:

$$SE_{ijkn} = 10^{-SEd_{ijkn}/20}, (\text{б/р}).$$
(2)

Математическая модель учета влияния экранов проводов

на взаимодействие БКС и ББА

Влияние экранирования проводов выражается коэффициентом экранирования Se , смысл которого заключается в отношении напряжённости электрического (или магнитного) поля при наличии экрана к напряжённости электрического (магнитного) поля при отсутствии экрана. Также следует отметить, что экран может собой представлять, как сплошной цилиндр, так и металлическую оплетку с разной плотностью заполнения.

Для вычисления коэффициента экранирования экрана в проводе необходимо воспользоваться формулой [6]:

$$Se = \frac{1}{\operatorname{ch}(K t)} \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{Zd}{Zm} + \frac{Zm}{Zd} \right) \operatorname{th}(K t)} b, \quad (b/p) \quad (3)$$

где $K, (1/m)$ – коэффициент распространения волны в экране провода;

$t, (m)$ – толщина экрана в проводе;

$Zd, (Om)$ – волновое сопротивление изоляции экрана в проводе;

$Zm, (Om)$ – волновое сопротивление экрана в проводе;

$b, (b/p)$ – коэффициент заполнения экрана в проводе ($b = 0, \dots, 1$).

Математическая модель влияния проводов БКС друг на друга

Для нахождения напряжения, которое генерирует один фрагмент на другом необходимо воспользоваться формулой [26]:

$$U_{c_{ab}} = U_a \frac{Zb}{Zb + \left| \frac{1}{2\pi f Ce} \right|} \operatorname{sgn}(Ce), \quad (B) \quad (4)$$

где $U_a, (B)$ – напряжение на фрагменте-источнике;

$Zb, (Om)$ – суммарное сопротивление электрических соединителей (ЭС), ЭС-источника и ЭС-приёмника, соединённых проводом b ;

$Ce, (\Phi)$ – величина ёмкости между проводами;

$f, (Гц)$ – частота тока в фрагменте-источнике.

Далее необходимо учесть коэффициенты ослабления, генерируемого через ёмкостную связь напряжения, элементами конструкции, экранами проводов и металлизацией. При этом необходимо учитывать, что и провод - источник, и провод

- приемник имеют свои экраны. Поэтому для каждого фрагмента провода результирующее напряжение рассчитывается по формуле:

$$U_{c_{ab}} = U_{c_{ab}} SE SEe_i SEe_{i+1}, (B). \quad (5)$$

Таким образом, вычисляется напряжение между всеми элементарными отрезками двух проводов. После этого все напряжения складываются арифметически.

Модель учета влияния напряженности поля, создаваемой БКС в точках пространства

Для расчётов напряжённостей электрических полей, создаваемых проводами БКС, необходимо каждый провод разделить на фрагменты, границы которых задаются в исходных данных, как массив координат точек изгиба. В свою очередь каждый фрагмент необходимо рассматривать как набор элементарных электрических излучателей (ЭЭИ), каждый из которых представляет собой прямолинейный фрагмент проводника, длиной l , с током I_i (далее – фрагмент), создающий электрическое поле в произвольной точке C_p . Расчёт необходимо производить в сферической системе координат (рисунок 3).

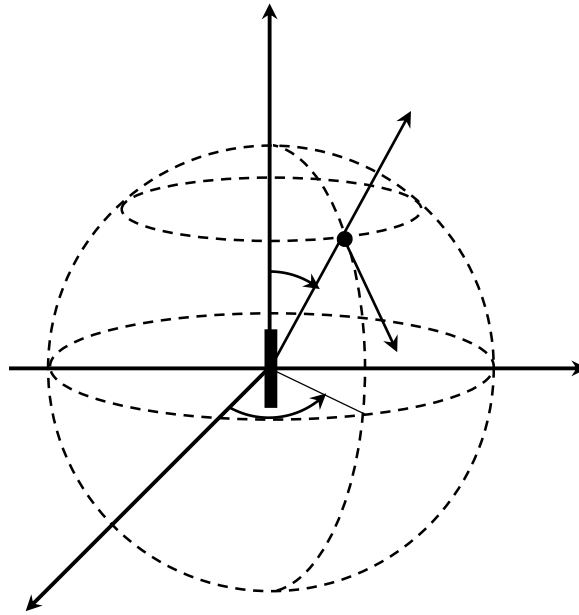


Рисунок 3 – Расположение ЭЭИ в декартовых и сферических координатах

Как видно из рисунка 3, электрическое поле в точке пространства, создаваемое ЭЭИ имеет две векторные составляющие – радиальную E_r и зенитную E_θ . Для расчёта значений этих составляющих используются следующие формулы [1, 9 - 12]:

$$E_r = \frac{k I \cdot l}{2\pi\omega\epsilon_0 r^2} \left(\frac{1}{kr} \sin(\omega t - kr) + \cos(\omega t - kr) \right) \cos(\theta), \quad (B/m); \quad (6)$$

$$E_\theta = \frac{k^2 I \cdot l}{4\pi\omega\epsilon_0 r} \left(\left(\frac{1}{(kr)^2} - 1 \right) \sin(\omega t - kr) + \frac{1}{kr} \cos(\omega t - kr) \right) \sin(\theta), \quad (B/m), \quad (7)$$

где k , $(1/m)$ – волновое число;

I , (A) – сила тока в элементарном источнике излучения;

l , (m) – длина элементарного источника излучения;

ω , (rad/c) – круговая частота тока в элементарном источнике излучения;

$r, (м)$ – расстояние от элементарного источника излучения до точки наблюдения;

$\theta, (рад)$ – величина зенитного угла;

$\varepsilon_0, (Ф/м)$ – электрическая постоянная;

$t, (с)$ – время.

Общая напряженность поля в точке пространства находится по теореме Пифагора. Далее производится умножение полученного значения на коэффициенты ослабления (2) и (3).

Математическая модель учета влияния ББА на БКС

Для расчёта генерации напряжения электрическим полем ББА в каком-либо проводе БКС, необходимо разделить этот провод на фрагменты, началом и концом которых будут координаты точек изгиба провода, заданные в исходных данных. Точкой генерации в данном случае будет являться геометрический центр ББА, а точкой приема – середина фрагмента провода. Для понимания изложения материала необходимо ввести обозначения.

Началом фрагмента i -го провода БКС будет точка X_0 с трехмерными координатами, концом фрагмента i -го провода БКС будет точка X_1 с трехмерными координатами. В качестве точек расчета напряженности электрического поля, генерируемого n -ым ББА выбрана точка C_j , которая является геометрическим центром j -го фрагмента X_0X_1 .

В точке C_j определяется напряжённость электрического поля Er (7), генерируемого n -ым ББА. Затем определяется создаваемое напряжение $U\phi_j$ на фрагменте по формуле:

$$U\phi_j = \frac{X0X1}{2} Er_j \sin \alpha_j \operatorname{sgn}(\cos \alpha_j), (B), \quad (8)$$

где α_j – угол между направлением из геометрического центра n -го ББА G_n на точку C_j (сердину j -го фрагмента) и пространственным расположением фрагмента, с учётом его начала и конца.

Математическая модель учета влияния напряженности поля, создаваемой ББА в точках пространства

Для расчёта генерации напряжённости электрического поля n -ым ББА в произвольной точке C_p необходимо пересчитать эталонную напряжённость электрического поля $E\varepsilon_n$, создаваемую на эталонном расстоянии, в напряжённость Er_{np} на расстоянии, равном расстоянию между геометрическим центром n -го ББА и произвольной точкой C_p .

Искомое значение напряженности электрического поля Er_p в произвольной точке пространства рассчитывается по следующей формуле:

$$Er = E\varepsilon \frac{\frac{1}{\omega r^3} - \frac{\omega}{r c^2} + \frac{1}{r^2 c}}{\frac{1}{\omega} - \frac{\omega}{c^2} + \frac{1}{c}}, (B/m). \quad (9)$$

где $r, (m)$ – расстояние от источника излучения до точки наблюдения;

$\omega, (rad/c)$ – круговая частота тока в источнике излучения;

c , (м/с) – скорость распространения электромагнитной волны в свободном пространстве.

Далее полученное значение напряженности перемножается на коэффициенты ослабления.

Для оценки соблюдения ЭМС все значения напряженности электрического поля в точке пространства по частотно складываются и делается вывод о соблюдении ЭМС. Таким же образом складываются все значения напряжения в каждом проводе.

Таким образом, разработанные математические модели позволяют оценить электромагнитную обстановку внутри летательного аппарата и сделать вывод о соблюдении ЭМС. Данные модели ещё на этапе разработки позволят учесть все особенности размещения БА внутри летательного аппарата с целью обеспечения ЭМС.

Разработанные математические модели позволяют произвести расчет напряжения и напряженности электрического и магнитного полей, создаваемых побочным излучением БА и БКС внутри объекта, и оценить их влияние на эффективность выполнения задачи летательным аппаратом. Данные модели в перспективе необходимо реализовать в программно-аппаратном комплексе для исследования электромагнитной обстановки на борту летательного аппарата при проектировании и обеспечении ЭМС бортовой аппаратуры.

Программно-аппаратный комплекс позволит повысить эффективность разработки сложных наукоемких технических систем, обеспечить минимизацию трудозатрат на их производство и значительно снизить их материальную стоимость.

Список источников

1. Бадалов А.Л., Михайлов А.С. Нормы на параметры электромагнитной совместимости РЭС. – М.: Радио и связь, 1990. – 271 с.
2. Князев А.Д., Кечиев Л.Н., Петров Б.В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учётом электромагнитной совместимости. — М.: Радио и связь, 1989. – 223 с.
3. Князев А.Д. Элементы теории и практики электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. – М.: Радио и связь, 1984. – 336 с.
4. Костромина Н.В., Павлов Е.П. Электромагнитная совместимость в конструкциях РЭА (ЭВА) - Йошкар-Ола: Марийский политехнический институт им. А.М. Горького, 1989. – 145 с.
5. Малков Н.А., Пудовкин А.П. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. – Тамбов: Изд-во Тамбовского государственного технического университета, 2007. – 88 с.
6. Дементьев А.Н. Математическое моделирование электромагнитной обстановки на борту космического аппарата // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2018. Т. 21. № 4. С. 26–36.
7. Дементьев А.Н., Аралкин М.В., Осипов О.В. Исследование электромагнитных характеристик планарных киральных метаструктур на основе составных спиральных компонентов с учетом гетерогенной модели Бруггемана // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2020. Т. 23. № 3. С. 44-55.
DOI: [10.18469/1810-3189.2020.23.3.44-55](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.3.44-55)

8. Клыков А.В., Кириллов В.Ю. Возможности компьютерного моделирования при решении задач электромагнитной совместимости бортовых кабельных сетей самолетов // Труды МАИ. 2012. № 57. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=30760>
9. Шмырев В.Ф., Фомичев К.Ф. Современные аспекты защиты бортового оборудования летательных аппаратов от электромагнитных воздействий // Системы обработки информации. 2011. № 4 (94). С. 99-105.
10. Гуревич О.С., Кессельман М.Г., Трофимов А.С., Чернышов В.И. Современные беспроводные технологии: проблемы применения на авиационном борту // Труды МАИ. 2017. № 94. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=81143>
11. Филатов В.И., Борукаева А.О., Бердииков П.Г. Система измерения расстояний, использующая в качестве модулирующей функции хаотический шум // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=10213>
12. Кириллов В.Ю., Томилин М.М. Воздействие преднамеренных электромагнитных помех на бортовые кабели космических аппаратов // Труды МАИ. 2013. № 66. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=40836>
13. Винников В.В. Основы проектирования РЭС. Электромагнитная совместимость и конструирование экранов. - Томск: ТУСУР, 2014. - 50 с.
14. Гизатуллин З.М. Анализ магнитных полей внутри здания при воздействии разряда молнии на внешнюю систему молниезащиты здания // Технологии электромагнитной совместимости. 2010. № 3. С. 30-36.
15. Иванов В.А., Ильинский Л.Я., Фузик М.И. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. – Киев: Техника, 1983. – 120 с.

16. В.И., Тихомиров А.А. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем. – Томск: ТУСУР, 2012. – 228 с.
17. Кравченко В.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. – М.: Радио и связь, 1984. – 256 с.
18. Крылов В.А., Югенков Т.В. Защита от электромагнитных излучений. – М.: Советское радио, 1972. – 216 с.
19. Уайт Д. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. – М.: Советское радио, 1977. – 348 с.
20. Приборы для измерения промышленных радиопомех. Технические требования и методы испытаний. ГОСТ 11001-80. – М.: Стандарты, 01.01.1981

References

1. Badalov A.L., Mikhailov A.S. *Normy na parametry elektromagnitnoi sovместимости RES*. (A distance measurement system using chaotic noise as a modulating function), Moscow, Radio i svyaz', 1990, 271 p.
2. Knyazev A.D., Kechiev L.N., Petrov B.V. *Konstruirovaniye radioelektronnoi i elektronno-vychislitel'noi apparatury s uchetom elektromagnitnoi sovместимости* (Design of radio-electronic and electronic computing equipment taking into account electromagnetic compatibility), Moscow, Radio i svyaz', 1989, 223 p.
3. Knyazev A.D. *Elementy teorii i praktiki elektromagnitnoi sovместимости radioelektronnykh sredstv* (Elements of the theory and practice of electromagnetic compatibility of radio-electronic means), Moscow, Radio i svyaz', 1984, 336 p.

4. Kostromina N.V., Pavlov E.P. *Elektromagnitnaya sovmestimost' v konstruktsiyakh REA (EVA)* (Electromagnetic compatibility in REA (EVA) designs), Ioshkar-Ola, Mariiskii politekhnicheskii institut im. A.M. Gor'kogo, 1989, 145 p.
5. Malkov N.A., Pudovkin A.P. *Elektromagnitnaya sovmestimost' radioelektronnykh sredstv* (Electromagnetic compatibility of radio-electronic means). Tambov, Izd-vo Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2007, 88 p.
6. Dement'ev A.N. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2018, vol. 21, no. 4, pp. 26–36.
7. Dement'ev A.N., Aralkin M.V., Osipov O.V. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2020, vol. 23, no. 3, pp. 44-55. DOI: [10.18469/1810-3189.2020.23.3.44-55](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.3.44-55)
8. Klykov A.V., Kirillov V.Yu. *Trudy MAI*, 2012, no. 57. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=30760>
9. Shmyrev V.F., Fomichev K.F. *Sistemy obrabotki informatsii*, 2011, no. 4 (94), pp. 99-105.
10. Gurevich O.S., Kessel'man M.G., Trofimov A.S., Chernyshov V.I. *Trudy MAI*, 2017, no. 94. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=81143>
11. Filatov V.I., Borukaeva A.O., Berdikov P.G. *Trudy MAI*, 2019, no. 104. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=10213>
12. Kirillov V.Yu., Tomilin M.M. *Trudy MAI*, 2013, no. 66. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=40836>

13. Vinnikov V.V. *Osnovy proektirovaniya RES. Elektromagnitnaya sovmestimost' i konstruirovaniye ekranov* (Fundamentals of RES design. Electromagnetic compatibility and screen design), Tomsk, TUSUR, 2014, 50 p.
14. Gizatullin Z.M. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestimosti*, 2010, no. 3, pp. 30-36.
15. Ivanov V.A., Il'inskii L.Ya., Fuzik M.I. *Elektromagnitnaya sovmestimost' radioelektronnykh sredstv* (Electromagnetic compatibility of radio-electronic means), Kiev, Tekhnika, 1983, 120 p.
16. Efanov V.I., Tikhomirov A.A. *Elektromagnitnaya sovmestimost' radioelektronnykh sredstv i system* (Electromagnetic compatibility of radio-electronic means and systems), Tomsk, TUSUR, 2012, 228 p.
17. Kravchenko V.I. *Radioelektronnye sredstva i moshchnye elektromagnitnye pomekhi* (Radio-electronic means and powerful electromagnetic interference), Moscow, Radio i svyaz', 1984, 256 p.
18. Krylov V.A., Yugenkov T.V. *Zashchita ot elektromagnitnykh izlucheni* (Protection against electromagnetic radiation), Moscow, Sovetskoe radio, 1972, 216 p.
19. Uait D. *Elektromagnitnaya sovmestimost' radioelektronnykh sredstv i neprednamerennye pomekhi* (Electromagnetic compatibility of electronic devices and unintentional interference), Moscow, Sovetskoe radio, 1977, 348 p.
20. *Pribory dlya izmereniya industrial'nykh radiopomekh. Tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy. GOST 11001-80* (Devices for measuring industrial radio interference. Technical requirements and test methods), Moscow, Standarty, 01.01.1981

Статья поступила в редакцию 01.03.2022; одобрена после рецензирования 16.03.2022; принята к публикации 20.04.2022.

The article was submitted on 01.03.2022; approved after reviewing on 16.03.2022; accepted for publication on 20.04.2022.