



Научная статья

УДК 658.512.2

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189168>

EDN: <https://www.elibrary.ru/WMHRYA>

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПРИ КОМПЛЕКСНЫХ ВЛИЯНИЯХ ИЗЛУЧЕНИЙ АНТЕНН РАДИОПЕРЕДАТЧИКОВ

Р.Р. Гайнутдинов ✉ 

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань, Республика Татарстан, Россия

✉ emc-kai@mail.ru

Цитирование: Гайнутдинов Р.Р. Методика прогнозирования электромагнитной совместимости технических объектов при комплексных влияниях излучений антенн радиопередатчиков // Труды МАИ. 2025. № 145.

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189168>

Аннотация. В работе предложена методика прогнозирования электромагнитной совместимости технических объектов при комплексных влияниях излучений антенн радиопередатчиков. Основной особенностью методики является возможность комплексного учета одновременного влияния излучения нескольких антенн радиопередатчиков. Методика определяет основные этапы, задачи и подходы при исследовании влияния антенн радиопередатчиков на бортовое оборудование технических объектов. Функционирование характеризуются излучением электромагнитных полей, формируемым антеннами и, следовательно, образованием электромагнитных помех в контурах кабельных линий связи, которые воздействуют на соответствующие порты бортового оборудования. Рассмотрен практический пример применения методики прогнозирования электромагнитной совместимости технических объектов при комплексных влияниях излучений антенн радиопередатчиков. В

качестве примера технического объекта рассматривается беспилотный летательный аппарат, который изготовлен из композитного материала. Получены результаты исследования комплексных электромагнитных взаимодействий при влиянии одновременно трех антенн радиоэлектронных средств. Уровни рассчитанных электромагнитных помех сопоставляются требованиям нормативно-технических документов, которые показывают возможное нарушение электромагнитной совместимости технического объекта. Таким образом в работе предложен инструмент, который позволяет на ранних этапах проектирования технического объекта оценить возможность нарушения его электромагнитной совместимости при одновременном влиянии всех антенн, объекта.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость; летательный аппарат; излучения антенн радиопередатчиков; комплексные взаимодействия; методика.

Финансирование: работа выполнена согласно Соглашения № 075-03-2023-032 от 16.01.2023 г. (шифр FZSU-2023-0004) между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и КНИТУ-КАИ по теме «Повышение эффективности и надежности элементов оборудования, создание новых nano - и полимерных композиционных материалов для энергетических и транспортных систем».

AUTOMATED CABLE ROUTING IN AIRCRAFT TAKING INTO ACCOUNT ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY BASED ON A SWARM ALGORITHM

R.R. Gaynutdinov ✉ 

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan National Research
Technical University named after A.N. Tupolev–KAI»,
Kazan, Republic of Tatarstan, Russia

✉ emc-kai@mail.ru

Citation: Gaynutdinov R.R. Automated cable routing in aircraft taking into account electromagnetic compatibility based on a swarm algorithm// Trudy MAI. 2025. No. 145. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189168>

Abstract. This paper proposes a methodology for predicting the electromagnetic compatibility of technical objects under the complex influence of radio transmitter antenna emissions. The main feature of the methodology is its ability to comprehensively account for the simultaneous influence of emissions from multiple radio transmitter antenna systems. The methodology defines the main stages, tasks, and approaches for investigating the influence of radio transmitter antennas on the onboard equipment of technical objects. The operation of such objects is characterized by the emission of electromagnetic fields generated by antennas and, consequently, the generation of electromagnetic interference in the circuits of communication cable lines, which affect the corresponding ports of the onboard equipment. A practical example of applying the methodology for predicting the electromagnetic compatibility of technical objects under the complex influence of radio transmitter antenna emissions is considered. An unmanned aerial vehicle made of composite material is considered as an example of a technical object. The results of a study of complex electromagnetic interactions under the influence of three antenna systems of electronic means simultaneously are obtained. The calculated levels of electromagnetic interference are compared with the requirements of normative and technical documents, which indicate a potential violation of the technical object's electromagnetic compatibility. Thus, the paper proposes a tool that allows for the early stages of a technical object's design to assess the possibility of its electromagnetic compatibility violation under the simultaneous influence of all of the object's antenna systems.

Keywords: electromagnetic compatibility; aircraft; radio transmitter antenna emissions; complex interactions; methodology.

Funding: this work was carried out according to Agreement No. 075-03-2023-032 dated 16.01.2023 (code FZSU-2023-0004) between the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation and KNRTU-KAI on the topic "Improving the efficiency and reliability of equipment elements, creating new nano- and polymer composite materials for energy and transport systems."

Введение

Современный этап развития науки и техники с каждым днем увеличивает количество электронных, радиоэлектронных и электротехнических систем в повседневной жизнедеятельности человечества. Большинство устройств (от телефона до автомобиля), используемых в повседневной жизни человека, содержат электронные, радиоэлектронные и электротехнические элементы и системы. Так при разработке современных подвижных и стационарных технических объектов, в первую очередь, необходимо обеспечить возможность совместного функционирования систем различного назначения [1-3].

Постоянная тенденция к развитию функциональных характеристик технических объектов, что, в первую очередь, характерно для подвижных технических объектов (летательные аппараты, автомобильный транспорт и т.д.), обусловлена интеграцией технических систем различного типа, что приводит к необходимости решения ряда междисциплинарных задач. Развитие технических объектов характеризуется не только интеллектуальностью, автоматизацией, информационностью, а, в первую очередь, ужесточением требований надежности, качества функционирования и электромагнитной совместимости (ЭМС). Нарушение ЭМС технических систем в рамках одного объекта а, следовательно, нарушение их функционирования, вызванные электромагнитными взаимодействиями и воздействиями можно охарактеризовать терминами: потеря финансов, времени и жизни [2, 4, 5].

Под ЭМС технического объекта понимается его функционирование с требуемыми техническими и функциональными характеристиками в условиях электромагнитных взаимодействий его систем и внешних электромагнитных воздействий. Так можно выделить два аспекта проблемы ЭМС, первый определяется электромагнитными взаимодействиями технических систем в рамках одного объекта, а именно внутрисистемная ЭМС технического объекта. Второй характеризуется внешними электромагнитными воздействиями на технический объект и определяется его электромагнитной стойкостью [1, 6, 7].

В данной работе рассматривается внутрисистемная ЭМС технического объекта, под которой понимается способность технического объекта

функционировать с требуемым качеством, при электромагнитных взаимодействиях электронных, радиоэлектронных и электротехнических систем. Таким образом, внутрисистемная ЭМС неразрывно связана с качественным проектированием технического объекта [2, 8]. Одной из центральных задач внутрисистемной ЭМС являются взаимодействие, характеризующееся влиянием излучений антенн радиопередатчиков на бортовое оборудование технического объекта. Так электромагнитное поле, формируемое антенной, наводит электромагнитные помехи в кабелях информационных интерфейсов, сети питания и в системе металлизации объекта воздействуя на соответствующие порты [9]. При этом наибольший интерес представляет влияние не отдельной антенной системы, а одновременное влияние комплекса антенн, установленных на техническом объекте.

Следует отметить два устойчивых направления развития технических объектов, которые существенно влияют на показатель внутрисистемной ЭМС, а в частности, увеличения влияния антенн радиопередатчиков на бортовое оборудование. Первое обусловлено нарастающей тенденцией интеграции в технические объекты радиоэлектронных, электронных и электротехнических систем для увеличения функционального насыщения. Таким образом, в замкнутых объемах фюзеляжа или кузова необходимо интегрировать бортовое оборудование различного функционального назначения, что усложняет электромагнитную обстановку и приводит к ухудшению ЭМС технического объекта. Второе характеризуется использованием в конструкции технического объекта композиционных материалов с низкой электрической проводимостью и высокой анизотропностью. Прежде всего, ухудшение электромагнитных характеристик обусловлено низкой эффективностью экранирования этих материалов и отсутствием возможности использовать корпус технического объекта для обеспечения металлизации [10].

Именно показатели ЭМС во многом определяют тактико-технические характеристики технического объекта. Так некачественное исследование, а, следовательно, обеспечение ЭМС на ранних стадиях разработки приведет к

невозможности добиться требуемых технических характеристик реального объекта, а также обеспечить соблюдение требований нормативных документов.

Вопросы исследования функционирования технических систем и объектов при внутрисистемных электромагнитных взаимодействиях, а, в частности, влиянии излучений антенн радиопередатчиков не нашли эффективного решения в работах отечественных [11, 12] и зарубежных авторов [13, 14]. Так исследуется взаимодействия отдельных технических систем без привязки к объектам эксплуатации. Источники и механизмы, внутрисистемных электромагнитных взаимодействий рассматриваются в отдельности, применительно к отдельным техническим системам. Данные вопросы получают наибольший интерес при применении в конструкции технических объектов именно композитных материалов. В свою очередь вопросы влияния излучений антенн радиопередатчиков также обусловлены насыщением технических объектов радиоэлектронным оборудованием различного назначения. Соответственно излучения антенн радиопередатчиков создают сложную электромагнитную обстановку на объекте, которая может привести к нарушению функционирования бортового оборудования. Следует отметить полное отсутствие теоретических методов исследования комплексных электромагнитных взаимодействий в рамках одного объекта, а в частности при одновременном излучении антенн радиопередатчиков. Таким образом, можно отметить устойчивую тенденцию в упрощении объекта и предмета исследования задач ЭМС технического объекта.

Целью данной работы является разработка методики на основе развития метода и методических средств для исследования ЭМС технических объектов при одновременном излучении антенн его радиопередатчиков на основе детального прогнозирования электромагнитной обстановки и электромагнитных помех.

Методика исследования ЭМС технического объекта при одновременном излучении антенн его радиопередатчиков

Предварительные исследования по анализу, прогнозированию ЭМС и стойкости технических систем [15, 16] позволяют предложить методику

исследования ЭМС технических объектов при комплексных влияниях излучений антенн радиопередатчиков, которая основана на развитии предложенного авторами метода [17]. Предлагаемая ниже методика включает основные этапы, а также методы исследования ЭМС технического объекта при излучении антенн радиопередатчиков:

Этап 1. Анализ параметров технического объекта. Определяются конструкционные и физические параметры технического объекта, например, для летательного аппарата это: тип фюзеляжа, размеры, материал, наличие отверстий. Типы линий связи и кабелей питания, их физические и конструкционные параметры.

Этап 2. Определение параметров источников электромагнитных взаимодействий. В данном пункте определяются и конкретизируются параметры радиопередатчиков и антенн. Определяется общее количество радиопередатчиков и циклограмма их работы в рамках технического объекта. Таким образом, выделяются радиопередатчики, работающие одновременно в конкретный момент времени.

Этап 3. Прогнозирование электромагнитной обстановки и электромагнитных помех в линиях связи технических систем и объекта.

3.1 Выбор уровня детальности исследования. Исследования влияния излучений антенн радиопередатчиков на бортовое оборудование технического объекта может быть проведено на трех уровнях детальности [6].

На первом уровне проводят исследование электромагнитной обстановки во внутреннем пространстве технического объекта при электромагнитных взаимодействиях. Данная информация может быть полезна для рационального размещения бортового оборудования. Так в конкретных точках фюзеляжа объекта и/или его отсеках рассчитывается напряженность электромагнитного поля, которая в последствии может быть сопоставлена с уровнями помехоустойчивости конкретных устройств.

На втором уровне проводится исследование электромагнитных помех в интерфейсных линиях связи, линиях связи сети питания и металлизации. В последствии данные значения могут быть сопоставлены с уровнями

помехоустойчивости устройств по соответствующим портам входа/выхода при электромагнитных взаимодействиях и воздействиях.

На третьем уровне проводится исследование помехоустойчивости конкретного типа бортового оборудования путем исследования электромагнитных помех в интерфейсных линиях связи и печатных платах при электромагнитных взаимодействиях и воздействиях.

3.2 Механизмы электромагнитных взаимодействий источника и рецептора помех в рамках технического объекта при влиянии излучений антенн радиопередатчиков. Механизмы преобразования энергии от источника помехи (излучения антенной системы) в напряженность поля и электромагнитную помеху в линии связи удобно представлять в виде ориентированного графа.

Для построения графа, описывающего внутрисистемные электромагнитные взаимодействия, выделяются подобласти (экранированный объем), с возможными путями проникновения (отверстия, материал экрана и др.) электромагнитных помех. Узлы графа определяют область, препятствующую прохождению электромагнитных помех (области с разной электромагнитной обстановкой). Для типичной задачи можно выделить три области с разной электромагнитной обстановкой: *A* – область формирования электромагнитного поля источником помехи; *B* – область, характеризующая точку расположения устройства внутри технического объекта; *C* – область внутри экранированного корпуса устройства. Ребра графа характеризуют электромагнитные взаимодействия, передаточные функции между областями с разной электромагнитной обстановкой и передаточные функции, характеризующие преобразование электромагнитного поля в электромагнитную помеху. Передаточная функция в данном случае определяется как отношение электромагнитной обстановки (и/или электромагнитной помехи на рецепторе) к электромагнитной помехе, формируемой источником.

На рисунке 1 приведен граф для прогнозирования электромагнитных помех в линиях связи для технических систем с учетом мест их эксплуатации на объекте при влиянии излучения антенн радиопередатчиков.

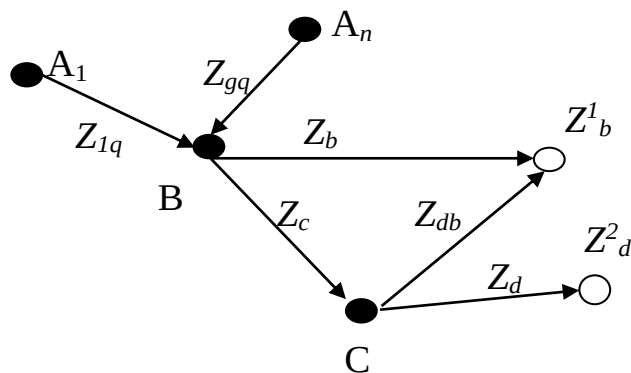


Рисунок 1 - Граф, описывающий связь источника и рецептора помехи

Обозначения на рисунке 1: Z_{gq} – передаточная функция между областью A (электромагнитная обстановка создаваемая источником помехи) и областью B (электромагнитная обстановка внутри экранированного объема в месте размещения бортового оборудования, например, фюзеляжа летательного аппарата); g – номер источника помехи; q – номер пути проникновения помехи в экранированную область; Z_b – передаточная функция между областью B и линией связи на первом уровне (например, линия связи интерфейса); Z_{1b} – итоговая передаточная функция от источника помехи к рецептору (для интерфейсной линии связи); b – номер линии внутри экранированного объема области B ; Z_c – передаточная функция между подобластью B и подобластью C (электромагнитная обстановка внутри экранированного объема, например, корпус бортового оборудования); c – номер пути проникновения энергии помехи в экранированный объем второго уровня; Z_d – передаточная функция между подобластью C и линией связи второго уровня, например межсоединения печатной платы; Z_{2d} – результирующая передаточная функция от источника к входу компонента для линии связи, расположенной внутри корпуса бортового оборудования; d – номер линии связи внутри корпуса бортового оборудования; Z_{db} – передаточная функция между подобластью C и входами компонента.

Для первого уровня детальности исследования необходимо определить электромагнитную обстановку (напряженность электрического поля) в области B , которая определяется передаточной функцией Z_{gq} .

Для интерфейсной линии связи (второй уровень детальности) результирующая передаточная функция Z_{1b} может быть определена на основе графа, представленного выше и следующего выражения:

$$Z_b^1 = (Z_{1q} \cdot Z_b + Z_{1q} \cdot Z_c \cdot Z_{db}) + (Z_{nq} \cdot Z_b + Z_{nq} \cdot Z_c \cdot Z_{db}) \quad (1)$$

Для межсоединения печатной платы (третий уровень детальности) результирующая передаточная функция Z_{2d} может быть определена из графа, представленного на рисунке 1 и следующего выражения:

$$Z_d^2 = Z_{1q} \cdot Z_c \cdot Z_d + Z_{nq} \cdot Z_c \cdot Z_d \quad (2)$$

3.3. Определение передаточных функций. Для определения каждой отдельной передаточной функции для конкретной линии связи, при влиянии излучения каждой отдельной антенной системы наиболее эффективным является применение программных реализаций численных методов. Для данных целей могут применяться программы моделирования электромагнитных полей (Microwave Studio, FEKO и т.д.). В данных программах в основном используются сеточные методы: метод конечных элементов, метод конечных разностей во временной и частотной области, TLM-метод, метод конечных интегралов [18, 19]. Проведенные исследования [6, 17] и сопоставление результатов прогнозирования ЭМС технического объекта с применением программ электромагнитного моделирования в аналогичных задачах с экспериментальными данными показывают расхождения не более 15 %, при полном и корректном описании объекта исследования.

3.4 Конкретизация параметров электромагнитной обстановки на объекте и электромагнитных помех в зависимости от детальности исследования.

Результирующая напряженность электрического поля в конкретных точках внутрифюзеляжного пространства рассчитывается из следующего выражения:

$$(E, \Delta t) = \sum_n [Z_{gq}] [\bar{E}] \quad (3)$$

где $[\bar{E}]$ – напряженность электрического поля формируемая антенной радиопередатчика в области А; Z_{gq} – передаточная функция; g – номер источника помехи; q – номер пути проникновения помехи в экранированную область; n – число антенн радиопередатчиков; t – время.

Результирующие параметры электромагнитных помех в линиях связи на разных уровнях конструкции технического системы и объекта определяются из выражения:

$$(U_{ij}, \Delta t) = \sum_n \left[\sum_a \left[\prod_k \left(\sum_s Z_{ij} \right) \right] \right] [\bar{E}] \quad (4)$$

где $[\bar{E}]$ – напряженность электрического поля формируемая антенной радиопередатчика в области А; Z_{ij} – передаточная функция; i – номер области или линии связи в данной области; j – номер пути проникновения помехи или линии связи на одном уровне; a – количество линий связи на разных уровнях, ведущих к одному компоненту; k – число областей препятствующих прохождению помехи; s – число путей проникновения помехи в разные подобласти; n – число антенн радиопередатчиков; t – время.

Этап 4. Оценка ЭМС технического объекта при влиянии излучений антенн радиопередатчиков проводится на основе анализа помехоустойчивости технических систем к радиочастотному электромагнитному воздействию. Напряженность электромагнитного поля в области В может быть сопоставлена с нормативными уровнями устойчивости технических систем к радиочастотному электромагнитному воздействию. Так уровни электромагнитных помех, рассчитанные в линиях связи технических систем, которые, в первую очередь, характеризуются длительностью и амплитудой, сопоставляются с уровнями помехоустойчивости устройств по соответствующим портам входа/выхода. Так же параметры электромагнитных помех в линиях связи технических систем сопоставляются с уровнями помехоустойчивости элементов.

Пример прогнозирования электромагнитной совместимости беспилотного летательного аппарата

Рассмотрим пример прогнозирования ЭМС беспилотного летательного аппарата (БПЛА) при влиянии излучений антенн радиопередатчиков.

Этап 1. В работе проводятся исследования БПЛА фюзеляж и оперение, которого изготовлены из композитного материала. Исследования проводятся по первому и второму уровню детальности. Рассматривается БПЛА со следующими

параметрами: длина – 3100 мм, размах крыльев 3180 мм; ширина и высота фюзеляжа – 380 мм, толщина материала 5 мм, тип материала слоистый композит (углепластик). Параметры материала фюзеляжа описываются формулой Дебая (параметры на частоте 1000 МГц: электрическая проводимость – 1,5 См/м; диэлектрическая проницаемость – 7,5). Исследования электромагнитных помех проводятся в интерфейсе RS-232 в линии связи длиной 1863 мм (на физическом уровне представлен кабелем FTP 4-cat5E).

Этап 2. Имеется два радиоэлектронных средства радиомодем и ответчик управления воздушным движением. Антенна радиомодема представлена четвертьволновым вибратором и расположена в хвостовой части фюзеляжа (диапазон рабочих частот 2400-2483,5 МГц; выходная мощность передатчика, не более +23 дБм). Антенна ответчика управления воздушным движением расположена в носовой и хвостовой части БпЛА, параметры антенн соответствуют паспортным характеристикам. Ответчик управления воздушным движением работает в режиме "УВД".

Этап 3. Прогнозирование электромагнитных помех и электромагнитной обстановки в интерфейсной линии связи БпЛА при одновременном излучении антенн радиопередатчиков.

3.1 В данном примере проводятся исследования по двум уровням детальности на основе прогнозирования электромагнитной обстановки внутри фюзеляжа БпЛА и электромагнитных помех в линиях связи.

3.2 Для рассматриваемого примера граф описывающий механизм электромагнитного влияния излучения антенн радиопередатчиков на БпЛА представлен на рисунке 2.

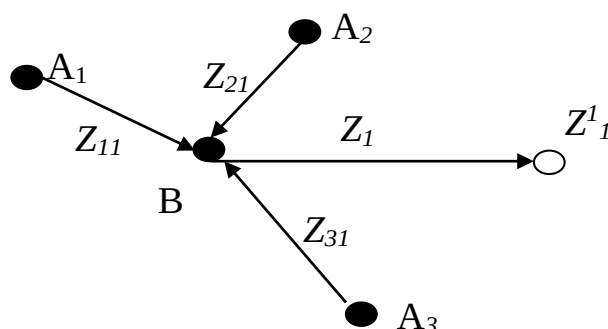


Рисунок 2 - граф, описывающий влияния излучений антенн радиопередатчиков на БпЛА

Результирующая передаточная функция для расчета электромагнитных помех описывается следующим выражением:

$$Z_1^1 = (Z_{11} \cdot Z_1) + (Z_{21} \cdot Z_1) + (Z_{31} \cdot Z_1) \quad (5)$$

3.3 Для прогнозирования электромагнитной обстановки во внутрифюзеляжном пространстве БПЛА и электромагнитных помех в интерфейсных линиях связи при каждом одиночном влиянии одной антенной системы разработаны математические модели с применением программных реализаций численных методов. Модели точно учитывают размещение бортового оборудования во внутрифюзеляжном пространстве БПЛА. Данный факт позволяет достичь точности в расчетах напряженности электромагнитного поля во внутрифюзеляжном пространстве БПЛА, а также возможных резонансных эффектов в результате многократных переотражений электромагнитных волн, образованных излучением антенн радиопередатчиков. При проведении моделирования излучений антенн радиопередатчиков бортовое оборудование представляется замкнутыми параллелепипедами или цилиндрами, повторяющими точные геометрические размеры соответствующих блоков бортового оборудования. Дополнительно учитывается трассировка интерфейсных линий связи во внутрифюзеляжном пространстве БПЛА (рисунок 3).

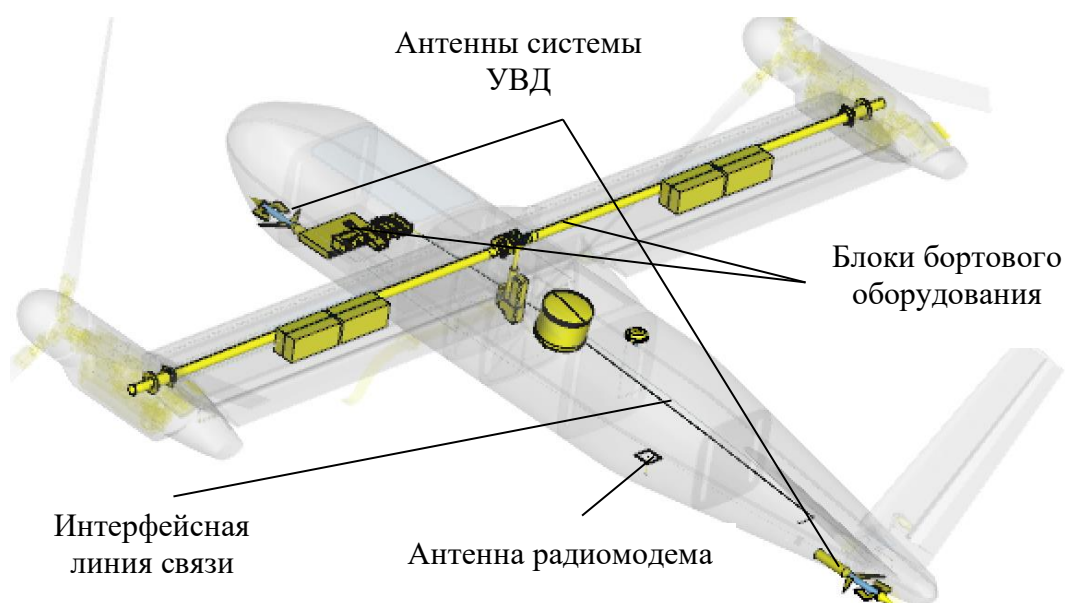


Рисунок 3 - графическое представление имитационной модели БПЛА

Электромагнитные помехи в линиях связи интерфейсов рассчитаны при эквивалентной нагрузке 120 Ом. Точка расчёта напряженности электрического поля расположена в центральной части БПЛА на расстоянии 1225 мм от его носа.

3.4 Результаты расчета напряженности электрического поля в центральной точке БПЛА и электромагнитной помехи в линии связи интерфейса RS-232 при влиянии антенны радиомодема представлены на рисунок 4, а при влиянии антенны УВД, расположенной в носовой и хвостовой части на рисунках 5 и 6 соответственно.

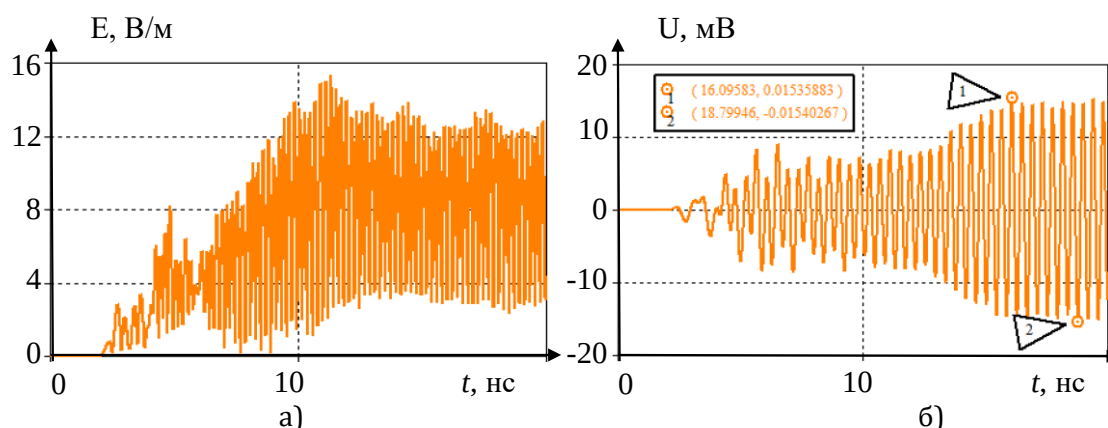


Рисунок 4 - напряженность электрического поля (а) и электромагнитная помеха в интерфейсной линии связи (б) при влиянии антенны радиомодема

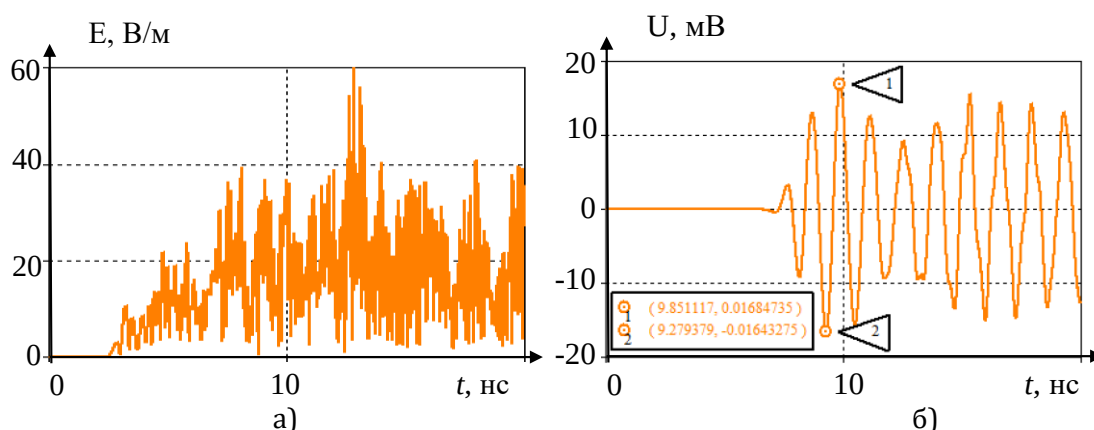


Рисунок 5 - напряженность электрического поля (а) и электромагнитная помеха в интерфейсной линии связи (б) при влиянии антенны УВД в носовой части БПЛА

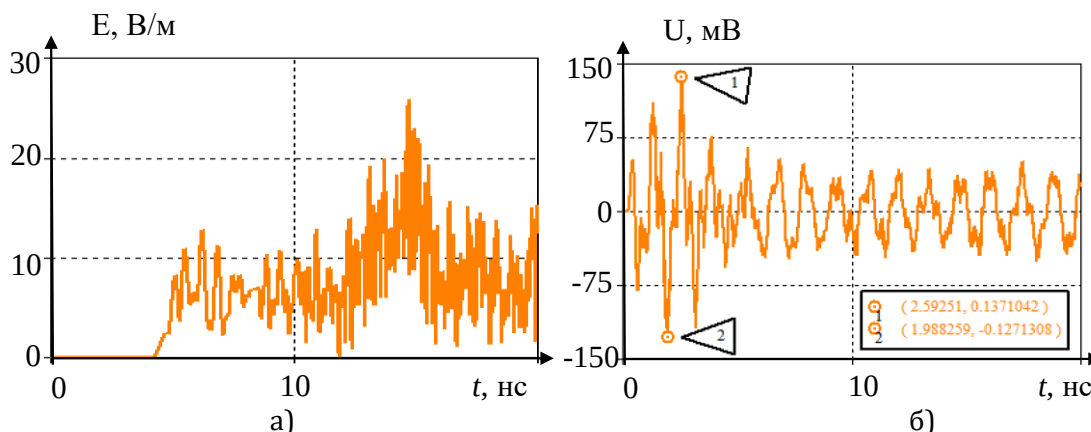


Рисунок 6 - напряженность электрического поля (а) и электромагнитная помеха в интерфейсной линии связи (б) при влиянии антенны УВД в хвостовой части БПЛА

Как видно из результатов исследования уровень электромагнитной помехи по значению суммы максимального и минимального значения по модулю составляет: при влиянии антенны радиомодема 30,7 мВ; при влиянии антенны УВД расположенной в носовой части БПЛА 33,2 мВ; при влиянии антенны УВД расположенной в хвостовой части БПЛА 264 мВ. Максимальные уровни напряженности электрического поля при влиянии излучений антенн радиопередатчиков достигают 15 В/м (антенна радиомодема), 60 В/м (антенна УВД в носовой части) и 26 В/м (антенна УВД в хвостовой части БПЛА). Из результатов исследования видно, что отсутствует линейная зависимость между уровнем напряженности электрического поля и уровнем электромагнитной помехи при влиянии излучения каждой отдельной антенны радиопередатчика. Данный факт, в первую очередь обусловлен резонансными эффектами, а также протяженностью линии связи по всему БПЛА.

Результаты исследования напряженности электрического поля и электромагнитной помехи в интерфейсной линии связи в результате одновременного комплексного воздействия излучения всех антенн, представлены на рисунке 7.

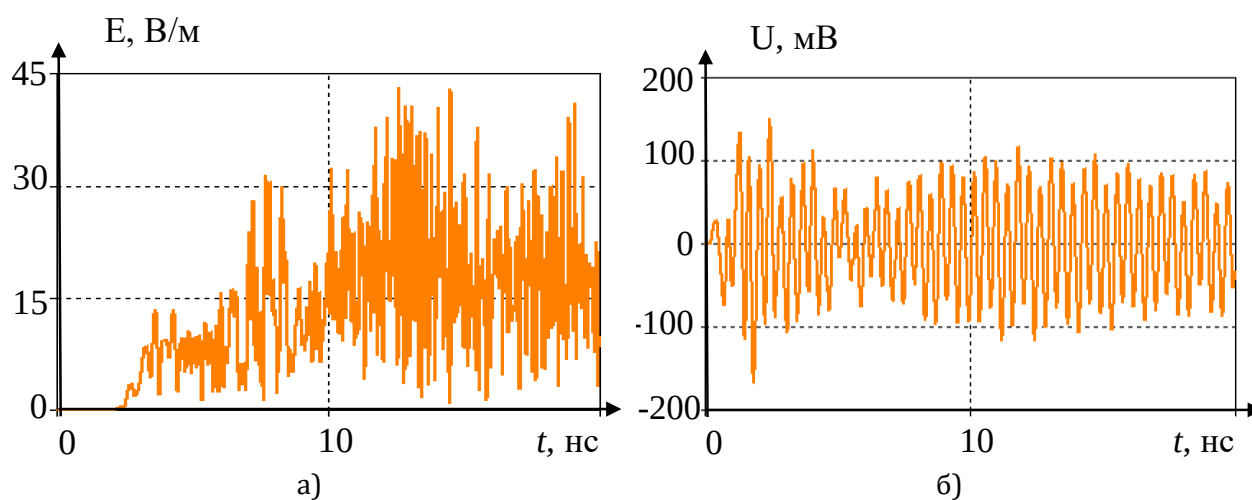


Рисунок 7 - напряженность электрического поля (а) и электромагнитная помеха в интерфейсной линии связи (б) при комплексном влиянии излучения антенны

Из результатов исследования видно, что при комплексном электромагнитном взаимодействии уровень электромагнитной помехи увеличивается (317 мВ), при этом уровень помехи в первую очередь определяется излучением антенн УВД, частота колебаний соответствует частоте колебаний электромагнитной помехи при излучении антенны радиомодема. При

оценке напряженности электрического поля видно, комплексное значение меньше нежели при влиянии излучения антенны УВД, расположенной в носовой части БПЛА, что вероятно обусловлено разными фазами электромагнитных взаимодействий.

Этап 4. На данном этапе уровни напряженности электрического поля и электромагнитных помех могут быть сопоставлены с требованиями нормативно технических документов, например, стандартов DO-160G/14G, MIL-461E которые распространяются на все бортовое оборудование летательных аппаратов, и в зависимости от условий функционирования бортового оборудования конструкции фюзеляжа предоставляет разные требования к напряженности электрического поля и уровням электромагнитных помех [20]. Допустимые уровни электромагнитных помех в интерфейсных линиях связи не должны превышать уровня 81 дБмкВ (11,22 мВ) в диапазоне частот до 1 ГГц. При сопоставлении расчетных уровней и уровней, соответствующих требованиям нормативных документов, возникающие электромагнитные помехи в линии связи явно превышают допустимые и приведут к нарушению качества функционирования бортовой аппаратуры. При сопоставлении расчетных уровней напряженности электрического поля также наблюдается их превышение требованиям нормативных документов, предъявляемых для бортового оборудования.

Заключение

На основании исследований в данной работе разработана методика прогнозирования электромагнитной совместимости технических объектов при комплексных влияниях излучений антенн радиопередатчиков. Основной особенностью методики является возможность комплексного учета одновременного влияния излучения нескольких антенн радиопередатчиков. Методика определяет основные этапы, задачи и подходы при решении проблемы прогнозирования и обеспечения электромагнитной совместимости при комплексном влиянии излучений антенн радиопередатчиков, размещаемых на техническом объекте. Обоснованы механизмы влияний излучений антенн радиопередатчиков, на технические системы объекта,

учитывающие специфику их эксплуатации и определены основные подходы прогнозирования электромагнитной обстановки и электромагнитных помех. Рассмотрен практический пример применения методики прогнозирования электромагнитной совместимости технических объектов при комплексных влияниях излучений антенн радиопередатчиков. В качестве технического объекта рассматривается БпЛА. Получены результаты исследования комплексных электромагнитных взаимодействий при влиянии одновременно трех антенн радиоэлектронных средств. Так получены комплексные значения напряженности электрического поля и электромагнитной помехи в интерфейсной линии связи. Уровни электромагнитных помех сопоставлены с требованиями нормативно-технических документов, которые показывают возможность нарушения электромагнитной совместимости технического объекта. Разработаны имитационные модели БпЛА для прогнозирования электромагнитной обстановки и электромагнитных помех при каждом отдельном влиянии излучения антенны радиопередатчика, которые учитывают конструкционные и электрофизические параметры объекта исследования

Результаты исследований показывают, что при комплексном электромагнитном взаимодействии, обусловленным излучением антенн радиопередатчиков, уровень электромагнитной помехи увеличивается (317 мВ), при этом уровень помехи в первую очередь определяется излучением антенн УВД, частота колебаний соответствует частоте колебаний электромагнитной помехи при излучении антенны радиомодема. При оценке напряженности электрического поля видно, комплексное значение меньше нежели при влиянии излучения антенны УВД, расположенной в носовой части БпЛА, что вероятно обусловлено разными фазами электромагнитных взаимодействий. Так анализ комплексной электромагнитной помехи в линии связи в рассмотренном примере показывает, что уровень в основном определяется с максимальными характеристиками конкретного радиопередатчика. Спектральный состав помехи изменился, при этом форма помехи в целом соответствует максимальному источнику, частота колебаний минимальному источнику. При оценке напряженности электрического поля видно, уменьшение результирующего значения по сравнению с максимальным, что вероятнее всего обусловлено разными фазами электромагнитных взаимодействий. Для более глубокого понимания данного эффекта должны быть

дополнительные исследования. Также необходимо проведение экспериментальных исследований для подтверждения предложенных теоретических подходов.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Список источников

[1] Электромагнитная совместимость технических средств подвижных объектов: учебное пособие / Балюк Н.В. и др.; под ред. В.П. Булекова. – М.: Изд-во МАИ, 2004. 648 с.

[2] Gainutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Methodology to ensure the intrasystem electromagnetic compatibility of UAV avionics // Russian Aeronautics (Iz VUZ), 2016, Volume 59, Issue 4, P. 613–618.

[3] Кириллов В.Ю., Марченко М.В., Томилин М.М. Электромагнитная совместимость бортовой кабельной сети летательных аппаратов. М.: Изд-во МАИ, 2014. 172 с.

[4] Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / Под ред. В. И. Кравченко. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с.

[5] Исследование частотных характеристик моделей сопротивлений связи бортовых кабелей летательных аппаратов / В. Ю. Кириллов, А. В. Клыков, Н. А. Жегов [и др.] // Труды МАИ. – 2014. – № 75. – С. 13. – EDN SHCHNH.

[6] Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф. Электромагнитная совместимость перспективных авиационных комплексов // Технологии электромагнитной совместимости. 2018. № 2 (65). С. 62–78.

[7] Информационная безопасность и электромагнитная совместимость технических средств : монография / В.И. Петровский, В.В. Петровский ; Мин-во образования и науки РФ; Фед. агентство по образованию; КГТУ им. А.Н. Туполева. - Казань : Изд-во КГТУ им. А.Н. Туполева, 2005. - 388 с. - ISBN 5-7579-0792-4

[8] Кириллов, В. Ю. Проектирование бортовой кабельной сети перспективного летательного аппарата / В. Ю. Кириллов, А. А. Слипаченко // Труды МАИ. – 2012. – № 59. – С. 16. – EDN PJLSCT.

[9] Henry W. Ott Electromagnetic Compatibility Engineering : - New Jersey : Published by John Wiley & Sons, Inc., 2009. - 862 p.

[10] R.R. Gaynutdinov and S.F. Chermoshentsev, Study Radiation from Radio Transmitters Antennas Influence on the UAV Onboard Equipment, 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949988.

[11] Кириллов, В. Ю. Исследование восприимчивости бортовых кабелей космического аппарата к электромагнитным помехам в СВЧ диапазоне / В. Ю. Кириллов, Н. А. Жегов // Труды МАИ. – 2012. – № 59. – С. 17. – EDN PJLSDD.

[12] Алхадж Хасан, А. Ф. Моделирование антенн методом моментов: аппроксимация поверхности проводниками / А. Ф. Алхадж Хасан, М. Т. Нгуен, Т. Р. Газизов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2023. – Т. 26, № 2. – С. 51-71. – DOI 10.21293/1818-0442-2023-26-2-51-71. – EDN EISYTU.

[13] Zhao Z., Leone M. Analysis of the Radiated Susceptibility of a Transmission Line under Near and Far-field Conditions// Proceedings of the 2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE 2016, Wroclaw, Poland, September 5-9, 2016, P. 889 – 893.

[14] Nalbantoglu C. et al. Electromagnetic compatibility (EMC) for integration and use of near field communication (NFC) in aircraft // Proceedings of the 2016 ESA Workshop on Aerospace EMC (Aerospace EMC), Valencia, Spain, 23-25 May, 2016, P. 1 – 6.

[15] Гайнутдинов, Р. Р. Прогнозирование внутрисистемной электромагнитной совместимости беспилотных летательных аппаратов / Р. Р. Гайнутдинов, С. Ф. Чермошенцев // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2014. – № 4. – С. 124-130. – EDN TPSYCL.

[16] Gainutdinov, R. R. Experimental Studies of Electromagnetic Interference in Aircraft Communication Lines on Exposure to Radiation from Radio Transmitter Antennas / R. R. Gainutdinov, S. F. Chermoshentsev // Russian Aeronautics. – 2024. – Vol. 67, No. 4. – P. 951-958. – DOI 10.3103/S106879982404024X. – EDN UTVJAY.

[17] Гайнутдинов, Р. Р. Методология исследования электромагнитной стойкости технических систем при внешних электромагнитных воздействиях от нескольких источников / Р. Р. Гайнутдинов, С. Ф. Чермошенцев // Известия высших учебных заведений. Aviационная техника. – 2023. – № 1. – С. 135-141. – EDN MRQLGU.

[18] Su C., Ke H., Hubing T. Overview of Electromagnetic Modeling Software // Proc. of the 25th International Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, March 8–12, 2009, Monterey, California, USA. P. 736–741.

[19] Агапов С.В., Чермошенцев С.Ф. Методы и средства анализа и прогнозирования электромагнитных излучений от электронных средств // Информационные технологии. 2003. № 11. С. 2-16.

[20] Кечиев, Л. Н. Зарубежные военные стандарты в области ЭМС / Л. Н. Кечиев, Н. В. Балюк. - М. : Грифон, 2014. - 447 с.

References

[1] Balyuk N.V., et al.; ed. by V.P. Bulekov. *Electromagnetic Compatibility of Technical Means of Mobile Objects: Textbook*. Moscow: MAI Publishing House, 2004. 648 p. (In Russ.)

[2] Gainutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Methodology to ensure the intrasystem electromagnetic compatibility of UAV avionics. *Russian Aeronautics (Iz VUZ)*. 2016;59(4):613-618.

[3] Kirillov V.Yu., Marchenko M.V., Tomilin M.M. *Electromagnetic Compatibility of Aircraft Onboard Cable Networks*. Moscow: MAI Publishing House, 2014. 172 p. (In Russ.)

[4] Kravchenko V.I., Bolotov E.A., Letunova N.I.; ed. by V.I. Kravchenko. *Electronic Means and Powerful Electromagnetic Interference*. Moscow: Radio i Svyaz, 1987. 256 p. (In Russ.)

[5] Kirillov V.Yu., Klykov A.V., Zhegov N.A., et al. Study of frequency characteristics of coupling impedance models for aircraft onboard cables. *Trudy MAI* [Proceedings of MAI]. 2014;(75):13. (In Russ.) EDN SHCHNH.

[6] Gaynutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Electromagnetic compatibility of prospective aviation systems. *Technologii Elektromagnitnoi Sovmestimosti* [Electromagnetic Compatibility Technologies]. 2018;(2):62-78. (In Russ.)

[7] Petrovsky V.I., Petrovsky V.V. *Information Security and Electromagnetic Compatibility of Technical Means: Monograph*. Kazan: Publishing House of the A.N. Tupolev KSTU, 2005. 388 p. ISBN 5-7579-0792-4 (In Russ.)

[8] Kirillov V.Yu., Slipachenko A.A. Design of the onboard cable network for a prospective aircraft. *Trudy MAI* [Proceedings of MAI]. 2012;(59):16. (In Russ.) EDN PJLSCT.

[9] Ott H.W. *Electromagnetic Compatibility Engineering*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009. 862 p.

[10] Gaynutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Study Radiation from Radio Transmitters Antennas Influence on the UAV Onboard Equipment. *2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*. 2019:1-4. doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949988.

[11] Kirillov V.Yu., Zhegov N.A. Investigation of susceptibility of spacecraft onboard cables to electromagnetic interference in the microwave range. *Trudy MAI* [Proceedings of MAI]. 2012;(59):17. (In Russ.) EDN PJLSDD.

[12] Alkhadzh Hassan A.F., Nguyen M.T., Gazizov T.R. Antenna modeling by the method of moments: wire approximation of the surface. *Doklady Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta Sistem Upravleniya i Radioelektroniki* [Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics]. 2023;26(2):51-71. doi: 10.21293/1818-0442-2023-26-2-51-71. (In Russ.) EDN EISYTU.

[13] Zhao Z., Leone M. Analysis of the Radiated Susceptibility of a Transmission Line under Near and Far-field Conditions. *Proceedings of the 2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE 2016, Wroclaw, Poland, September 5-9, 2016*. 2016:889-893.

[14] Nalbantoglu C., et al. Electromagnetic compatibility (EMC) for integration and use of near field communication (NFC) in aircraft. *Proceedings of the 2016 ESA Workshop on Aerospace EMC (Aerospace EMC), Valencia, Spain, 23-25 May, 2016*. 2016:1-6.

[15] Gaynutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Prediction of intrasystem electromagnetic compatibility of unmanned aerial vehicles. *Vestnik Kazanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. A.N. Tupoleva* [Bulletin of the A.N. Tupolev Kazan State Technical University]. 2014;(4):124-130. (In Russ.) EDN TPSYCL.

[16] Gainutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Experimental Studies of Electromagnetic Interference in Aircraft Communication Lines on Exposure to Radiation from Radio Transmitter Antennas. *Russian Aeronautics*. 2024;67(4):951-958. doi: 10.3103/S106879982404024X.

[17] Gaynutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Methodology for studying electromagnetic immunity of technical systems under external electromagnetic influences from multiple sources. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Aviatsionnaya Tekhnika* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Aviation Technology]. 2023;(1):135-141. (In Russ.) EDN MRQLGU.

[18] Su C., Ke H., Hubing T. Overview of Electromagnetic Modeling Software. *Proc. of the 25th International Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, March 8–12, 2009, Monterey, California, USA*. 2009:736-741.

[19] Agapov S.V., Chermoshentsev S.F. Methods and tools for analysis and prediction of electromagnetic emissions from electronic means. *Informatsionnye Tekhnologii* [Information Technologies]. 2003;(11):2-16. (In Russ.)

[20] Kechiev L.N., Balyuk N.V. *Foreign Military Standards in the Field of EMC*. Moscow: Grifon, 2014. 447 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Рустам Рафкатович Гайнутдинов, кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования, КНИТУ – КАИ, г. Казань, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1973-2941>; e-mail: emc-kai@mail.ru

Information about the authors

Rustam R. Gainutdinov, Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Computer-Aided Design Systems Department, KNRTU-KAI, Kazan, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1973-2941>; e-mail: emc-kai@mail.ru

Получено 12 февраля 2026 ● Принято к публикации 20 июня 2026 ● Опубликовано 31 августа 2026
Received 12 February 2026 ● Accepted 20 June 2026 ● Published 31 August 2026
