

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.3.09

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-6-49-71

## РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ КАБЕЛЬНОЙ СЕТИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

Мингазов А.Л., Федоров Е.Ю.

Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия  
*mingazow.artur@yandex.ru*

**Резюме:** ЦЕЛЬ. Рассмотреть проблемы проникновения и распространения электромагнитных помех в отдельных бортовых устройствах электротехнического комплекса летательного аппарата. Провести проверку исследуемого объекта бортового комплекса электрооборудования летательного аппарата на соответствие требованиям нормативных документов в части электромагнитной совместимости. Разработать рекомендации для устранения кондуктивных и индуктивных помех исследуемого объекта бортового комплекса электрооборудования летательного аппарата. МЕТОДЫ. Для решения исследовательских задач использовался комплекс методов, включающий графовое моделирование топологии распространения электромагнитных полей и методы математического моделирования. РЕЗУЛЬТАТЫ. Исследованы вопросы проникновения и распространения электромагнитных наводок в конструктивных элементах и цепях электротехнических систем воздушного судна. Выполнена верификация соответствия бортового электрооборудования нормативным требованиям по электромагнитной совместимости. Разработана топологическая модель распределения помех внутри корпуса летательного аппарата. Проведен анализ наведенных помех от внешних источников электромагнитного излучения. Сформулированы практические рекомендации по минимизации кондуктивных и индуктивных наводок в бортовом электрооборудовании. ВЫВОДЫ. При проведении исследования на соответствие требованиям нормативных документов в части электромагнитной совместимости исследуемого объекта бортового комплекса электрооборудования летательного аппарата было выявлено, что необходимо дорабатывать способы экранирования чувствительных элементов. Было представлено несколько способов устранения кондуктивных и индуктивных помех исследуемого объекта бортового комплекса электрооборудования летательного аппарата и выбран оптимальный.

**Ключевые слова:** электротехнический комплекс; электромагнитная совместимость; летательный аппарат; зона экранирования; кондуктивные помехи; индуктивные помехи; топологическая модель.

**Для цитирования:** Мингазов А.Л., Федоров Е.Ю. Разработка и верификация методики проектирования бортовой кабельной сети летательного аппарата с учетом требований электромагнитной совместимости // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 6. С. 49-71. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-49-71.

## DESIGNING THE ELECTRICAL COMPLEX OF AN AIRCRAFT, TAKING INTO ACCOUNT ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

Mingazov A.L., Fedorov E.Y.

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – КАИ, Kazan,  
Russia

*mingazow.artur@yandex.ru*

**Abstract:** THE PURPOSE. To consider the problems of the ingress and propagation of electromagnetic interference in individual on-board devices of the electrical complex of the aircraft. To check the object under study of the on-board electrical equipment complex of the aircraft for compliance with the requirements of regulatory documents regarding electromagnetic compatibility. To develop recommendations for the elimination of conductive and inductive interference of the studied object of the on-board complex of electrical equipment of the aircraft. METHODS. To solve the research problems, a set of methods was used, including graph modeling of the topology of electromagnetic interference propagation in the aircraft body, finite element analysis of electromagnetic fields and mathematical modeling methods. RESULTS. The issues of penetration and propagation of electromagnetic interference in structural elements and circuits of electrical systems of an aircraft are investigated. Verification of compliance of on-board electrical equipment with regulatory requirements for electromagnetic compatibility has been performed. A topological model of interference distribution inside the aircraft body has been developed. The analysis of induced interference from external sources of electromagnetic radiation is carried out. Practical recommendations for minimizing conductive and inductive leads in on-board electrical equipment are formulated. CONCLUSION. When conducting a study on compliance with the requirements of regulatory documents in terms of electromagnetic compatibility. It was revealed that it is necessary to refine the methods of shielding sensitive elements of the studied object of the onboard complex of electrical equipment of the aircraft. Several ways to eliminate conductive and inductive interference of the object under study of the on-board complex of electrical equipment of the aircraft were presented and the optimal one was chosen.

**Keywords:** electrical engineering complex; electromagnetic compatibility; aircraft; shielding zone; conductive interference; inductive interference; topological model.

**For citation:** Mingazov A.L., Fedorov E.Y. Designing the electrical complex of an aircraft, taking into account electromagnetic compatibility. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (6): 49-71. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-6-49-71.

### **Введение (Introduction)**

Процесс проектирования системы электроснабжения летательных аппаратов предполагает многоитерационную работу, учитывающую изменение, как входных параметров, так и ограничений на элементы систем электроснабжения и сам процесс проектирования.

Инженерные методики проектирования электротехнического комплекса летательного аппарата с учетом влияния отдельных бортовых устройств на электромагнитную обстановку системы электроснабжения позволяют сократить сроки проектирования, увеличить надежность работы системы распределения электрической энергии на борту летательного аппарата за счет учета электромагнитных помех при проектировании жгутовых соединений благодаря алгоритмам учета электромагнитной совместимости как средства учета параметра оптимизации.

Цель исследования заключается в обеспечении электромагнитной совместимости устройств бортовых комплексов летательных аппаратов благодаря применению разработанных рекомендаций по проектированию и защите электрических жгутов от электромагнитных помех.

Предполагаемая научная значимость исследования заключается в разработке комплексной методики проектирования электротехнического комплекса летательного аппарата, основанной на системном использовании формализованных топологических моделей и графовых алгоритмов для обеспечения электромагнитной совместимости оборудования на этапе проектирования, что позволяет принципиально снизить уровень взаимных помех и исключить необходимость дорогостоящих доработок на поздних стадиях создания бортовых систем.

Практическая значимость исследования заключается в повышении качества проектирования электротехнического комплекса летательного аппарата и улучшении электромагнитной обстановки внутри летательного аппарата в целом и влияния электромагнитных помех на чувствительные блоки радиоэлектронного оборудования, в частности.

В данной работе предлагается методика проектирования электротехнического комплекса летательного аппарата с учетом влияния отдельных бортовых устройств на электромагнитную обстановку системы электроснабжения.

Основой этапа проектирования является разработка принципиальных электрических схем системы распределения электрической энергии. Самое сложное в выполнении процесса проектирования внутреннего расположения элементов является определение их пространственного положения, их соединений и подготовка нормативной документации.

Задачи проектирования жгутов бортовой кабельной сети летательного аппарата [1] занимают важное место в процессе проектирования системы распределения электрической энергии и представляют класс задач топологического проектирования.

Существующие инструкции по установке и монтажу связаны лишь с требованиями к функционалу и часто не учитывают взаимовоздействие электромагнитных помех, создаваемых бортовыми электронными устройствами. Методы и алгоритмы автоматизированного проектирования трасс жгутов кабелей не учитывают условия электромагнитной совместимости между кабелями и проводниками в жгутах [2]. Поэтому, решение проблем электромагнитной совместимости является редким не только для инженеров, но и для специалистов, ответственных за разработку оборудования фирм-изготовителей [3].

Решением данной задачи является разработка универсальных методик проектирования бортовой кабельной сети летательного аппарата, учитывающие электромагнитную совместимость и подтверждение данных методик на имитационных моделях в системах компьютерного моделирования [4].

При проектировании монтажа межблочного соединения им соответствуют последовательность выполнения задач размещения и компоновки электронных узлов, разводки электрических цепей, формирование и трассировка жгутов [5, 6]. При решении задач размещения, определения конфигурации электрической сети летательного аппарата необходимо учитывать потери напряжения в проводах, разные режимы работы сети и электромагнитную совместимость узлов [7, 8]. Это приводит к тому, что проектирование всех систем электрооборудования ведется взаимосвязано, то есть процесс проектирования носит сложный итерационный характер. Таким образом, синтез системы распределения электрической энергии и ее параметрическая оптимизация являются завершающим этапом при проектировании [9].

Компоновка конструктивных узлов и их размещение на борту летательного аппарата является ответственным этапом. Должны быть определены места размещения конструктивных узлов, ограничения на их объемы и массу. Результаты решения определяют дальнейший характер разводки электрических цепей, формирование и трассировки жгутов [10, 12].

Задача компоновки и размещения конструктивных узлов наиболее часто встречается в смежных областях: при проектировании радиоэлектроники, устройств автоматики. Существует множество решений в других областях, которые по постановке сходны с решаемой задачей. К ним относятся работы при проектировании радиоэлектронной аппаратуры [11]. В данных работах широко применяются последовательные и итерационные алгоритмы с использованием теории неориентированных графов и различных методов математического программирования. В качестве критериев оптимизации используются различные оценки длины соединений.

Разводка электрических цепей состоит в определении способа соединений эквипотенциальных выводов электрической схемы и проводится с учетом трасс и расположения элементов каждой цепи, требований надежности. Из известных автору работ можно выделить работы [13, 14], в которых представлены многочисленные результаты решения задачи разводки электрических цепей с применением генетических алгоритмов, как на летательных аппаратах, автомобилях, так и в радиоэлектронной аппаратуре и электронно-вычислительной аппаратуре.

Задача формирования жгутов состоит в объединении наборов проводов с учетом ограничений по электромагнитной совместимости, рода тока, технологичности, геометрических особенностей, мест прокладки и т.д. Количество работ по формированию жгутов ограничено, что объясняется трудностью постановки задачи из-за значительного числа проектных решений [15-17].

По мере развития летательных аппаратов комплекс электротехнического и электронного оборудования стал значительно сложнее, что привело к увеличению длин электрических жгутов, а также сложности их компоновки и трассировки. С развитием электронного бортового оборудования стало понятно, что различного рода факторы могут

наводить помехи на чувствительные части системы электроснабжения. Одним из таких факторов являются наведение электромагнитных помех в электрических цепях. Наиболее распространённым путем наведения электромагнитных полей высокой плотности на современном летательном аппарате являются электрические жгуты [18, 19].

Электромагнитная совместимость кабельных линий летательного аппарата – это ряд условий, при котором уровень взаимных помех между проводниками в электрическом жгуте из-за индуктивных и емкостных связей не превышает предельно допустимого уровня кондуктивных помех, который определяется нормативными значениями стандартов [20, 21].

При проектировании жгутовых соединений бортовой кабельной сети используются различный программы моделирования, которые позволяют ускорить и конкретизировать процесс компоновки, размещение и трассировки жгутов на борту летательного аппарата, однако они не учитывают условия электромагнитной совместимости проводников в электрических жгутах и между жгутами в бортовой сети.

В существующих работах [22, 23] задача формирования жгутов решается при применении ортогональных графов и алгоритмов построения минимальных деревьев. При проектировании жгутов важно учитывать их помехозащищенность, чтобы предотвратить возникновение электромагнитных помех, снижающих надежность системы распределения электроэнергии [24, 25]. В работах [26-28] исследуется помехозащищенность электрических жгутов электротехнических комплексов летательных аппаратов при воздействии мощных электромагнитных помех, а в исследовании [30] рассмотрен процесс проектирования таких жгутов с учетом перекрестных помех.

В работе Жукова П. А. анализируется задача обеспечения электромагнитной защиты электротехнических систем летательных аппаратов, направленная на повышение их устойчивости к внешним воздействиям [29]. Задача трассировки жгутов заключается в построении оптимальной траектории жгута в монтажном пространстве автомобиля. Известны работы [31-33], в которых исследуется трассировка сложных соединений и жгутов на летательных аппаратах. Во всех рассмотренных работах трассировка жгутов осуществляется в двухмерном пространстве с использованием графовых моделей.

В существующих инструкциях по установке и монтажу основное внимание традиционно уделяется функциональным требованиям, при этом зачастую игнорируется взаимовлияние электромагнитных помех, создаваемых бортовой электронной аппаратурой. Кроме того, применяемые методы и алгоритмы автоматизированного проектирования трасс кабельных жгутов не учитывают требования электромагнитной совместимости между отдельными кабелями и проводниками в составе жгута. Вследствие этого вопросы обеспечения электромагнитной совместимости представляют сложность не только для монтажников систем, но и для разработчиков оборудования на предприятиях-изготовителях.

Исследования В.И. Кравченко и Л.Н. Кечиева заложили методологические основы анализа электромагнитной обстановки на борту летательных аппаратов, в то время как В.Ю. Кириллов и М.А. Ромашенко детально исследовали механизмы распространения помех в кабельных сетях и предложили практические методы экранирования. Работы Н.В. Балюка и В.П. Булекова расширили понимание взаимодействия мощных источников помех с чувствительным радиоэлектронным оборудованием, а Р.Г. Коновалов и М.Е. Воробьев разработали алгоритмы прогнозирования электромагнитной совместимости на этапе проектирования. Однако проведенный анализ показывает, что существующие исследования носят фрагментарный характер и не предлагают комплексной методики проектирования, охватывающей всю цепочку от математического моделирования до практической реализации, что обусловило необходимость разработки единого методологического подхода, представленного в данном исследовании [34-36].

В процессе эксплуатации летательного аппарата отдельные бортовые устройства способны генерировать перекрестные электромагнитные помехи, воздействуя как на другие системы, так и на кабельную сеть воздушного судна. Данное явление представляет собой паразитное взаимодействие, обусловленное взаимным влиянием электрических и магнитных полей между источниками сигналов и приемными устройствами [37, 38].

Особое внимание при проектировании следует уделять кабельным жгутам бортовой сети, которые должны обеспечивать минимальный уровень взаимных наводок между проводниками. В.Ю. Кириллов внес огромный вклад в изучение обеспечения ЭМС бортовой кабельной сети летательного аппарата. Его работы [39-41], детально исследуют механизмы перекрестных наводок в жгутах, влияние неидеальности экранов и разъемов, а также методы параметрического расчета и оптимизации трасс прокладки кабелей. В отличие от более общих подходов Кечиева, Кириллов, предположительно, разрабатывал

инженерные методики, алгоритмы и нормативные рекомендации, позволяющие напрямую на этапе компоновки снижать уровень взаимных влияний между силовыми, цифровыми и аналоговыми линиями в условиях жестких массогабаритных ограничений и сложной электромагнитной обстановки на борту. Таким образом, если Кечиев предоставил общий «язык» и «инструментарий» ЭМС, то Кириллов создал на его основе готовые «инструкции» для решения ключевой проблемы авиастроения.

В связи с вышеизложенным, исследования, направленные на изучение перекрестных помех жгутов, влияния мощных излучающих устройств на чувствительные к электромагнитным помехам рецепторы, а также разработка математических и имитационных моделей и алгоритмов прокладки трасс кабелей, компоновки чувствительных элементов системы электроснабжения подвижных объектов с учетом электромагнитной совместимости, являются актуальными научно-техническими задачами, имеющими важное значение при проектировании бортовых систем подвижных объектов [42].

#### *Материалы и методы (Materials and methods)*

Обеспечение бесперебойной работы комплекса бортового оборудования летательного аппарата является наиболее важной задачей при проектировании его конструкции и размещении конкретных узлов на борту. Необходимо учитывать наводимые электромагнитные помехи на наиболее чувствительные элементы системы бортового оборудования летательного аппарата [44-46]. Однако, при работе системы бортового оборудования в целом, также необходимо учитывать наводимые помехи отдельными устройствами, имеющие высокий уровень помехоэмиссии [43, 48].

Основной целью обеспечения электромагнитной совместимости на всех этапах жизненного цикла летательного аппарата – от проектирования и производства до эксплуатации – является минимизация негативного воздействия электромагнитных помех на чувствительные элементы бортового оборудования. Решение данной проблемы достигается за счет комплексного применения технически обоснованных и экономически целесообразных мер защиты, включающих: оптимальное конструирование кабельных трасс, экранирование критичных узлов, использование фильтрующих элементов и других современных методов подавления помех, что в совокупности позволяет обеспечить требуемую надежность работы всех систем воздушного судна при соблюдении разумных финансовых затрат [47].

При проектировании отдельных устройств бортового комплекса летательного аппарата необходимо учитывать особенности их проектирования [49-51]. Проектирования отдельных бортовых устройств выполняется по разработанному автором алгоритму, описанному на рисунке 1. В данном алгоритме учитываются помехи, наводимые на чувствительные элементы электрических плат в частности, но не учитываются помехи, наводимые изделием во внешнюю среду.

Для анализа помехоэмиссии отдельных устройств системы электрооборудования необходимо описать процесс проектирования электронных устройств с учетом их возможного влияния на электротехнических комплекс летательного аппарата.

Распространение электромагнитной энергии в бортовых системах летательных аппаратов осуществляется посредством двух основных механизмов: кондуктивного канала (через проводники) и канала электромагнитной эмиссии (через поля). Кондуктивный канал включает в себя все кабельные соединения между элементами бортового оборудования, по которым помехи могут передаваться непосредственно. Канал электромагнитной эмиссии предполагает распространение помех в виде электромагнитного поля через окружающее пространство, что приводит к двум видам вторичных воздействий: во-первых, к возникновению наведенных кондуктивных помех в кабельных линиях, и во-вторых, к прямому проникновению через экранирующие элементы корпусов оборудования, эффективность которых на практике всегда ограничена. Данное разделение принципиально важно для разработки комплексных мер защиты, поскольку требует дифференцированного подхода к подавлению каждого типа помех.

В случае с оборудованием на борту летательного аппарата первичным экраном является сам корпус изделия. Однако в корпусе всегда присутствуют отверстия для вывода кабелей питания изделия и кабелей передачи данных сторонним комплексам бортового электрооборудования. Помимо этого, корпус может быть собран из нескольких составных частей, соединяемых друг с другом различными технологическими способами, например, винтами.

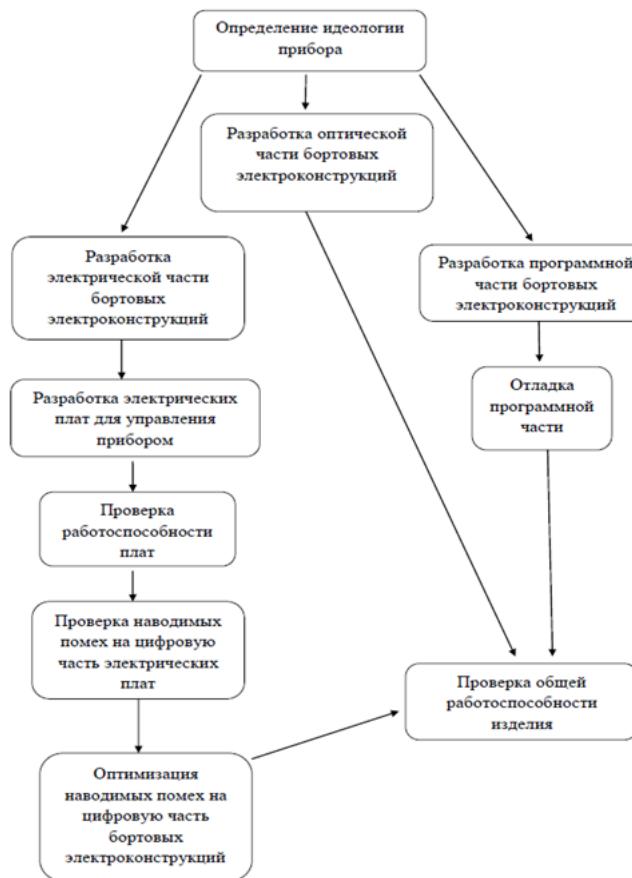


Рис. 1. Проектирование отдельных изделий на борту летательного аппарата *Fig. 1. Design of individual products on board the aircraft*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

В теории электромагнитной совместимости идеальный экран представляет собой абсолютно замкнутую проводящую оболочку с бесконечно высокой проводимостью материала, обеспечивающую полное затухание внешних электромагнитных полей во внутреннем пространстве. Однако в практических условиях эксплуатации авиационной техники достижение подобных характеристик невозможно вследствие конструктивных ограничений: наличия технологических отверстий, стыков, конечной проводимости материалов, а также необходимости обеспечения доступа к оборудованию для обслуживания. Эти факторы существенно снижают эффективность экранирования, что требует разработки компенсирующих технических решений и комплексного подхода к обеспечению электромагнитной защиты бортового оборудования. На рисунке 2 изображены возможные способы проникновения помех.

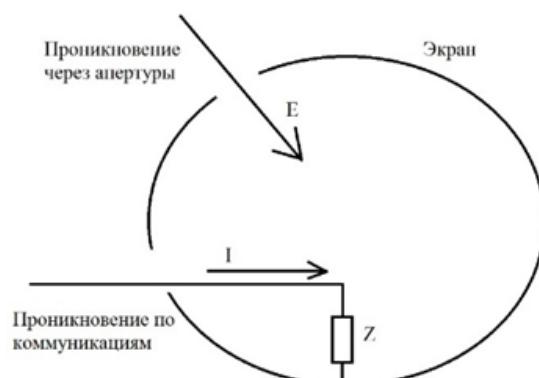


Рис. 2. Неоднородный экран с апертурой и отверстием для коммуникаций *Fig. 2. An inhomogeneous screen with an aperture and a hole for communications*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

В рассматриваемом в данной работе случае, корпус изделия состоит из двух цельных металлических частей, имеющих отверстия под кабель питания и кабели обмена данными с остальными элементами бортового комплекса электрооборудования, относящегося к данной системе. Созданный в результате соединения двух составных частей корпуса опытного образца зазор является апертурой, через которую наводятся индуктивные электромагнитные помехи на окружающее электрооборудование. Для решения проблемы наводимых электромагнитных помех изделием необходимо провести проверку соответствия изделия требованиям ГОСТ РВ 6601-002-2008 к уровням создаваемых электромагнитных помех.

При разработке схемно-конструкторских решений изделия электронных узлов летательного аппарата должна быть реализована многоуровневая защита от электромагнитных излучений:

- экранирование внутренних кабелей;
- заземление и эквипотенциальные соединения;
- уменьшение общих участков протекания токов элементов по шинам питания;
- использование многослойных плат;
- минимизация внутриблочных соединений;
- применение экранированных разъемов.

Основными помехочувствительными узлами изделия являются вычислительные печатные платы. При разработке данных плат для повышения помехоустойчивости применялись следующие правила проектирования:

- гальваническая развязка высокочастотных сигналов;
- снижение индуктивности в шинах питания для уменьшения высокочастотного импеданса в цепи протекания разрядного тока;
- неиспользуемые выводы микросхем обязательно заземлить;
- шины питания и общие размещаются как можно ближе друг к другу, не образуя замкнутых контуров;
- сужение полосы частот полезных сигналов и ограничение спектра входных сигналов входными фильтрами;
- включение буферных конденсаторов и индуктивных фильтров в цепи питания.

Одним из методов защиты радиоэлектронных систем от воздействия сильного электромагнитного излучения является применение металлических экранов. Они отражают электромагнитные волны и гасят электрочастотную энергию. Через систему заземления ток, наведенный электромагнитными помехами, стекает в землю, не причинив вреда электронной аппаратуре. Корпус рассматриваемого изделия обладает экранирующими свойствами.

Корпус используется в качестве экрана, удерживающего электромагнитное поле, создаваемое внутри изделия, и для исключения проникновения внешних электромагнитных полей в чувствительную к электромагнитным помехам зону носителя изделия, где имеются цепи, восприимчивые к излучаемым электромагнитным помехам.

Далее приведена расчетная оценка эффективности экранирования от электромагнитного поля корпуса.

Эффективность экранирования на высоких частотах можно определить по приближённой формуле (1):

$$\mathcal{E} = e^{\frac{d}{\delta}} (0.5 + D(m \ r \ \mu \ \delta)) \quad (1)$$

где  $e$  – основание натурального логарифма,

$m = 2$  для плоского экрана,

$r = \frac{L}{2}$  – наименьшее расстояние проникновения помехи в экране,

$L$  – высота в мм,

$d$  – толщина экрана в мм,

$\delta$  – эквивалентная глубина проникновения электрического поля, в мм,

$D$  – относительный диаметр корпуса изделия,

$\mu$  – относительная магнитная проницаемость материала экрана.

Экраном от электрического поля служит корпус изделия с относительным диаметром  $D = 415$  мм и высотой  $L = 255$  мм.

Эквивалентную максимальную глубину проникновения электромагнитного поля можно найти по формуле (2):

$$\delta = \left( \frac{1}{\sigma \pi \mu f_{min}} \right)^{0.5} \quad (2)$$

где  $\sigma$  – удельная проводимость экрана, в См/м,

$\mu$  – магнитная проницаемость экрана, в Гн/м.

Минимальная частота напряжения электрического поля  $f_{min} = 2 \text{ МГц}$ .

У рассматриваемого изделия корпус выполнен из нескольких составных элементов. Основным элементом корпуса является монолитный элемент конструкции, произведенный из алюминиевого сплава АМг6 – экран 1. К данному элементу присоединяется крышка из титанового сплава ВТ3-1 – экран 2.

Максимальную глубину проникновения электромагнитного поля через корпус изделия необходимо считать для каждого составного элемента.

Толщина экрана 1 –  $l = 18 \text{ мм}$ , удельная проводимость материала  $\sigma = 37,7 \cdot 10^6 \text{ См/м}$ , магнитная проницаемость  $\mu = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$ .

Толщина экрана 2 –  $l = 10,3 \text{ мм}$ , удельная проводимость материала  $\sigma = 1,36 \cdot 10^6 \text{ См/м}$ , магнитная проницаемость  $\mu = 1,26 \cdot 10^{-4} \text{ Гн/м}$ .

Эквивалентная максимальная глубина проникновения электромагнитного поля через экран 1 изделия составит:

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{1}{37,7 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^6}} = 5,79 \cdot 10^{-5} \text{ мм}$$

Эквивалентная максимальная глубина проникновения электромагнитного поля через экран 2 изделия составит:

$$\delta_2 = \sqrt{\frac{1}{1,36 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot 1,26 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^6}} = 3,04 \cdot 10^{-5} \text{ мм}$$

Эффективность экранирования корпуса изделия необходимо считать для каждого составного элемента.

Эффективность экранирования экрана 1 может составить:

$$\mathcal{E}_1 = e^{\frac{18}{5,79 \cdot 10^{-5}}} \left( 0,5 + 415 \left( 2 \frac{255}{2} \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 5,79 \cdot 10^{-5} \right) \right) = \infty \quad (0,5 + 7,69 \cdot 10^{-6}) \approx \infty$$

Эффективность экранирования экрана 2 может составить:

$$\mathcal{E}_2 = e^{\frac{10,3}{3,04 \cdot 10^{-5}}} \left( 0,5 + 415 \left( 2 \frac{255}{2} \cdot 1,26 \cdot 10^{-4} \cdot 3,04 \cdot 10^{-5} \right) \right) = \infty \quad (0,5 + 9,76 \cdot 10^{-7}) \approx \infty$$

Таким образом, напряжение электромагнитного поля, проникающего в корпус изделия, можно считать равным нулю.

Следующий шагом в данной работе необходимо проверить соответствия рассматриваемого оптоэлектронного изделия, входящего в состав бортового радиоэлектронного оборудования, требованиям ГОСТ Р В 6601-002-2008 к уровням создаваемых электромагнитных помех.

Основное целью данной работы является проверка соответствия опыта образца оптоэлектронного изделия требованиям ГОСТ Р В 6601-002-2008 к уровням создаваемых электромагнитных помех.

Необходимо проверить соответствие изделия требованиям ГОСТ Р В 6601-002-2008 в пунктах:

5.1 Требования к напряжению помех в цепях питания в диапазоне частот от 10 кГц до 100 МГц.

5.2 Требования к току помех в жгутах линий связи, диапазон частот от 0.15 до 30 МГц.

5.3 Требования к излучению электромагнитного поля в диапазоне частот от 0.01 МГц до 18 ГГц.

Испытания проводились в аттестованном безэховом экранированном помещении.

Испытания проводились по методикам ГОСТ Р В 6601-002-2008:

- измерение напряжения помех в проводах питания в диапазоне частот от 10 кГц до 30 МГц по методике ЭП1 (с учетом п.5.1.1 ГОСТ Р В 6601-002-2008);
- измерение тока помех в жгутах линий связи в диапазоне частот от 0,15 до 30 МГц по методике ЭП2;
- измерение напряженности электромагнитного поля радиоизлучения от изделия в диапазоне частот от 2 МГц до 18 ГГц по методике ЭИ1.

Материально-техническое обеспечение испытаний приводится в таблице 1.

Таблица 1  
Table 1

Список оборудования для проведения проверок

*List of inspection equipment*

Наименование прибора	Тип
Пульт автономного включения	АД2.390.234
Источник питания	У8031А
Излучатель	АД2.890.047
Анализатор ЭМС Agilent	E7405A
Эквивалент сети Lindgren	3725/2М
Биконическая антенна ETS-Lindgren	3110С
Логопериодическая антенна ETS-Lindgren	3148В
Рупорная антенна ETS-Lindgren	3115
Штыревая антенна ETS-Lindgren	3303

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При проведении измерений для оценки уровня излучаемых радиопомех может возникнуть необходимость в сканировании по высоте, как это показано на схеме, приведенной на рисунке 3. Цель сканирования следующая: отрегулировать высоту антенны так, чтобы прямые и отраженные сигналы были максимальными. Высота антенны настраивается для достижения максимального измерения.



Рис. 3. Диаграмма, показывающая прямую и отраженную волны

Fig. 3. Diagram showing direct and reflected waves

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

**Результаты (Results)**

Оценка напряжения помех в цепях питания в диапазоне частот от 10 кГц до 100 МГц.

Оценку напряжения помех в цепях питания производили в безэховой камере с использованием перечня оборудования, отраженного в таблице 1.

Испытуемое изделие установили в камере в соответствии с рисунком 4.

Тестируемое устройство установили на заземляющей поверхности, в соответствии с рисунком 4.

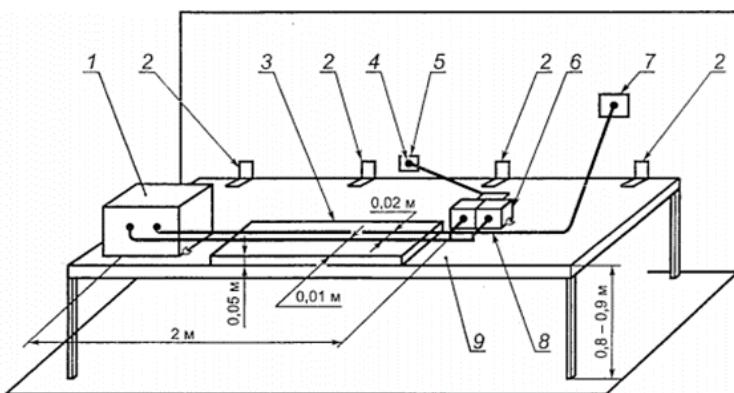


Рис. 4. Схема основной испытательной станции: 1 – ИБО, 2 – перемычки металлизации, 3 – токонепроводящая пластина, 4 – источник питания, 5 – сетевой фильтр входного питания, 6 – ЭС, 7 – устройство вывода линий связи из ЭК, 8 – соединительный кабель, 9 – заземляющая пластина

Fig. 4. Diagram of the main test station: 1 – on-board equipment under test, 2 – metallization jumpers, 3 – non-conductive plate, 4 – power supply, 5 – input power supply network filter, 6 – ES, 7 – device for outputting communication lines from the EC, 8 – connecting cable, 9 – grounding plate

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Испытуемое бортовое оборудование (ИБО) должно быть установлено на заземляющей поверхности, которая моделирует фактическое размещение изделия на борту летательного аппарата.

Измерение напряжения помех в проводах питания в диапазоне частот от 10 кГц до 30 МГц по методике ЭП1 (с учетом п. 5.1.1) в соответствии с ГОСТ Р В 6601-002-2008.

Пиковые значения напряжения помех в децибелах относительно 1мкВ, создаваемые в цепи питания, не должны превышать допустимые значения, определяемые ограничительной линией, показанной на рисунке 5.



Рис. 5. Допустимые пиковые значения напряжения помех в цепи питания 27В. Для БО двойного назначения в диапазоне частот от 2 до 30 МГц допустимое напряжение задают на уровне 46 дБмкВ

Fig. 5. Permissible peak values of the interference voltage in the 27V supply circuit. For dual-use on-board equipment in the frequency range from 2 to 30 MHz, the permissible voltage is set at 46 dB $\mu$ V

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Результаты проведенных измерений демонстрируют, что в исследуемых цепях питания в частотном диапазоне 245 кГц – 15 МГц зафиксированы кондуктивные помехи с превышением допустимых пиковых значений напряжения на 25,1 мкВ, что визуализировано на рисунке 6. Полученные данные свидетельствуют о необходимости дополнительных мер по подавлению электромагнитных наводок в указанном частотном диапазоне.

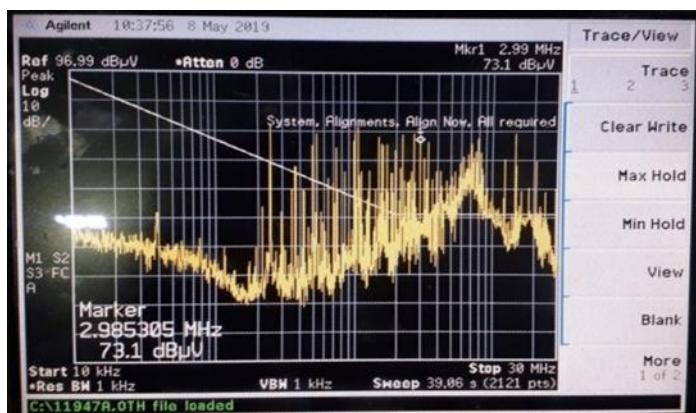


Рис. 6. Напряжение помех в цепях питания испытываемого изделия  
Fig. 6. Interference voltage in the power supply circuits of the tested product

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

По результатам измерений, образец изделия не соответствует требованиям подраздела 5.1 ГОСТ РВ 6601-002-2008 к напряжению помех в цепях питания.

*Оценка тока помех в жгутах линий связи в диапазоне частот от 0,15 до 30 МГц*

Оценку тока помех в жгутах линий связи производили в безэховой камере с использованием перечня оборудования, отраженного в таблице 1.

Измерение тока помех в жгутах линий связи в диапазоне частот от 0,15 до 30 МГц по методике ЭП2 в соответствии с ГОСТ РВ 6601-002-2008.

Пиковые значения тока помех в жгутах линий связи в децибелах относительно 1 мкА, создаваемые в жгутах линий связи, не должны превышать допустимые значения, определяемые ограничительной линией, показанной на рисунке 7 или вычисленных по формуле 3.



Рис. 7. Допустимые пиковые значения тока помех в жгутах линий связи  
Fig. 7. Permissible peak values of the interference current in the harnesses of communication lines

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В диапазоне частот от 0,15 до 2,00 МГц:

$$I = 73 - 29.33 \lg \left( \frac{f}{0.15} \right), \quad (3)$$

где  $f$  – частота, МГц.

В диапазоне частот от 2 до 30 МГц  $I = 40 \text{ дБмкА}$ .

Требование по п.5.2 в соответствии с ГОСТ РВ 6601-002-2008 (п.5.2.1) предъявляет заказчик.

Измеренное значение тока помех в жгутах линий связи в диапазоне частот от 2 до 30 МГц  $I = 37,22 \text{ дБмкА}$

Измеренные значения токов помех в жгутах линий связи не превышают допустимые пиковые значения токов помех.

Опытный образец изделия соответствует требованиям подраздела 5.2 ГОСТ РВ 6601-002-2008 к току помех в жгутах линий связи.

*Оценка напряженности электромагнитного поля радиоизлучения от изделия в диапазоне частот от 2 МГц до 18 ГГц*

Экспериментальная оценка напряженности электромагнитного поля радиоизлучения исследуемого изделия была выполнена в условиях безэховой камеры с применением измерительного комплекса, состав которого представлен в соответствующей таблице.

Измерения проводились в широком частотном диапазоне от 2 МГц до 18 ГГц с соблюдением требований методики ЭИ1, регламентированной нормативным документом ГОСТ РВ 6601-002-2008. Полученные результаты позволяют количественно оценить параметры электромагнитного излучения изделия в заданных условиях.

Изделие и антенны располагались в безэховой камере в соответствии с рисунком 8.

Пиковые значения напряженности электромагнитного поля радиоизлучения от изделия в децибелах относительно 1 мкВ/м не должны превышать значений, указанных на рисунке 9. В полосе частот от 0.01 до 30 МГц нормы должны выполняться для вертикально поляризованного электрического поля излучения. На частотах выше 30 МГц нормы должны выполняться как для горизонтально, так и для вертикально поляризованных электрических полей излучения.

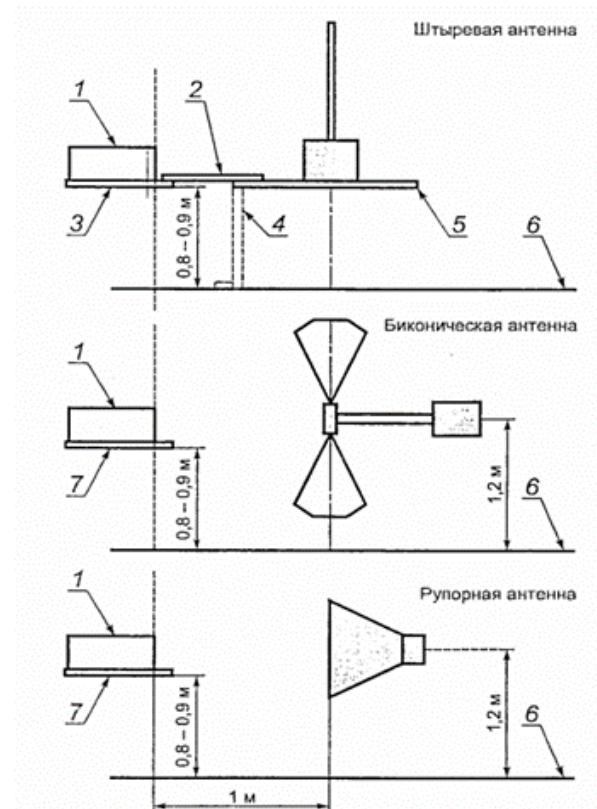


Рис. 8. Схема расположения антенн: 1 – границы испытательной установки; 2 – связующая металлическая пластина; 3 – заземляющая пластина или непроводящий стол; 4 – связующая металлическая пластина для непроводящих столов; 5 – противовес; 6 – пол; 7 – заземляющая пластина

*Fig. 8. Antenna layout: 1 – test setup boundaries; 2 – connecting metal plate; 3 – ground plate or non-conductive table; 4 – connecting metal plate for non-conductive tables; 5 – counterweight; 6 – floor; 7 – ground plate*

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

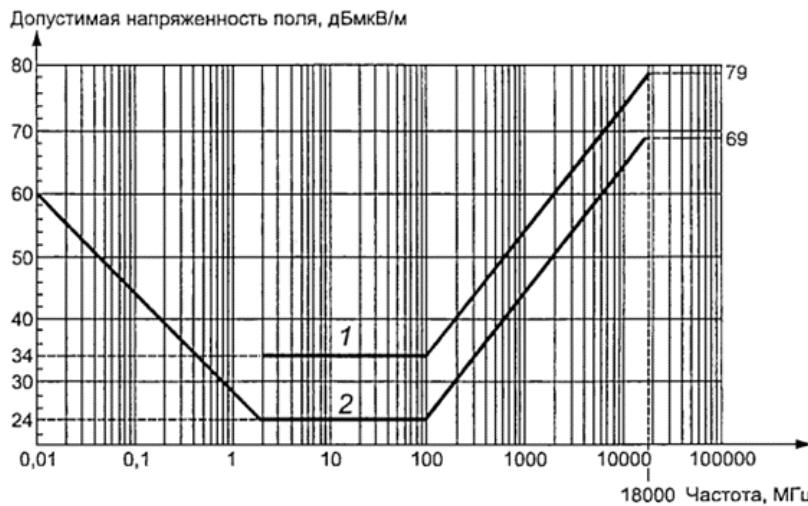


Рис. 9. Допустимые пиковые значения напряженности электромагнитного поля радиоизлучения: 1 – допустимые пиковые значения напряженности электрического поля излучения для БО, устанавливаемых внутри самолета; 2 – допустимые пиковые значения напряженности электрического поля излучения для БО, устанавливаемых на самолетах с внешней стороны фюзеляжа или на самолетах, корпус которых полностью или частично изготовлен из композитных материалов, а также для БО, устанавливаемых на вертолетах

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 9. Permissible peak values of the electromagnetic field strength of radio emission: 1 – permissible peak values of the electric field strength of radiation for on-board equipment installed inside an aircraft; 2 – permissible peak values of the electric field strength of radiation for on-board equipment installed on aircraft on the outside of the fuselage or on aircraft whose body is fully or partially made of composite materials, as well as for on-board equipment installed on helicopters

Измеренные значения напряжённостей электромагнитного поля (индуктивные помехи) имеют превышения допустимых пиковых значений на различных частотах:

- на частоте 2,71 МГц – на 23,5 дБ·мкВ/м (рис. 10);
- на частоте 14,95 МГц – на 46,67 дБ·мкВ/м (рис. 11);
- на частоте 73,7 МГц – на 8 дБ·мкВ/м (рис. 12).

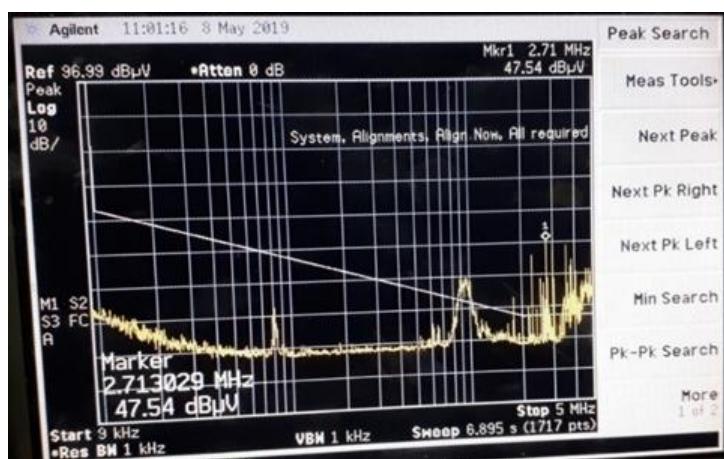


Рис. 10. Напряженность электромагнитного поля радиоизлучения от изделия на частоте 2,71 МГц

Fig. 10. The intensity of the electromagnetic field of radio emission from the product at a frequency of 2.71 MHz

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

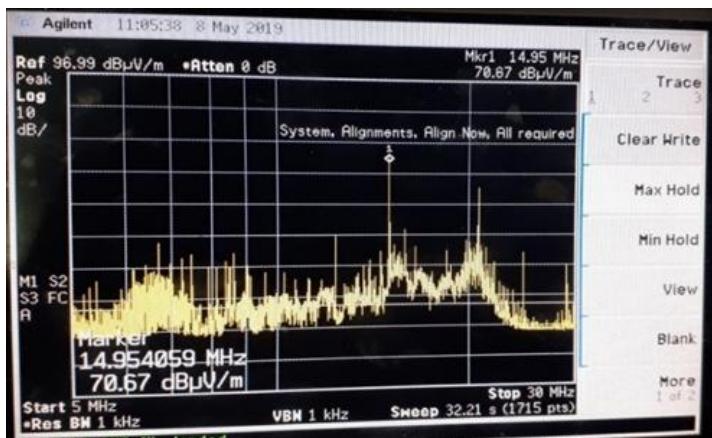


Рис. 11. Напряженность электромагнитного поля радиоизлучения от изделия на частоте 14,95 МГц

Fig. 11. The intensity of the electromagnetic field of radio emission from the product at a frequency of 14.95 MHz

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

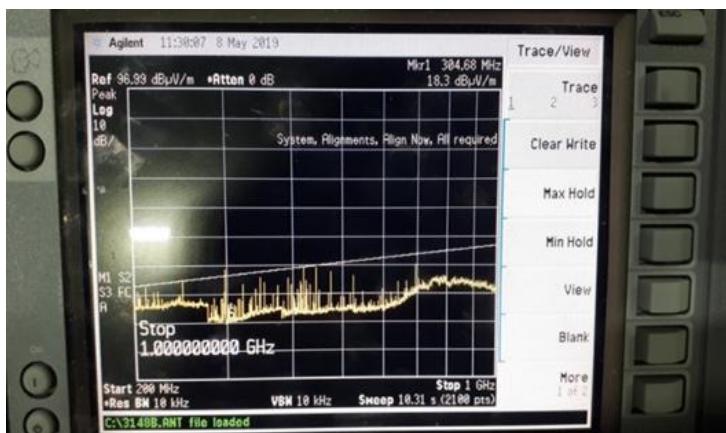


Рис. 12. Напряженность электромагнитного поля радиоизлучения от изделия на частоте 73,7 МГц

Fig. 12. Intensity of the electromagnetic field of radio emission from the product at a frequency of 73.7 MHz

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Измеренные значения напряжённостей электромагнитного поля не превышают допустимого уровня напряжённости в диапазоне частот от 200 МГц до 18 ГГц, что изображено на рисунке 13.

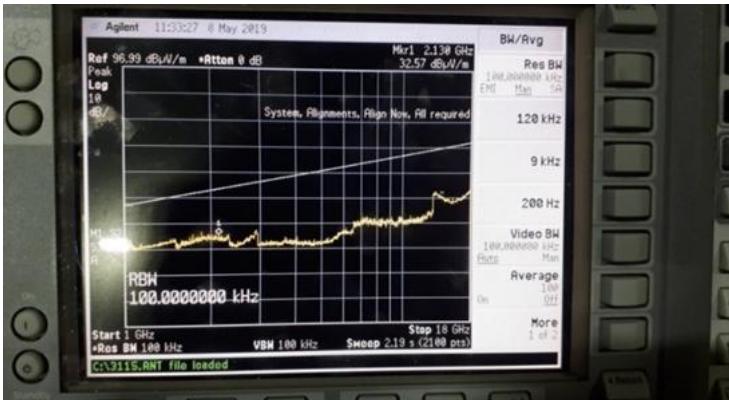


Рис. 13. Напряженность электромагнитного поля радиоизлучения от изделия на частоте 18 ГГц

Fig. 13. Intensity of the electromagnetic field of radio emission from the product at a frequency of 18 GHz

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Излучаемые помехи изделия имеют превышения допустимого уровня напряжённости на 1-46,67 дБ·мкВ/м на отдельных частотах.

Изделие не соответствует требованиям подраздела 5.3 ГОСТ Р В 6601-002-2008 к излучению электромагнитного поля.

В ходе проверки соответствия опытного образца оптоэлектронного изделия требованиям ГОСТ Р В 6601-002-2008 к уровням создаваемых электромагнитных помех было выявлено несоответствие следующим пунктам требований:

1. Пункт 5.1 Требования к напряжению помех в цепях питания в диапазоне частот от 10КГц до 100МГц.

2. Пункт 5.3 Требования к излучению электромагнитного поля в диапазоне частот от 0,01МГц до 18ГГц.

Измеренные значения напряжений помех в проводах питания (кондуктивные помехи) имеют превышения допустимых пиковых значений напряжений помех на 25,1 дБ·мкВ в диапазоне частот от 245 кГц до 15 МГц.

Излучаемые помехи изделия (индуктивные помехи) имеют превышения допустимого уровня напряжённости на 1–46,67 дБ·мкВ/м на отдельных частотах:

- на частоте 2,71 МГц – на 23,5 дБ·мкВ/м;
- на частоте 14,95 МГц – на 46,67 дБ·мкВ/м;
- на частоте 73,7 МГц – на 8 дБ·мкВ/м;

Сравнительный анализ результатов проверки изделия представлены в таблице 2.

Таблица 2  
Table 2

Сравнительный анализ параметров электромагнитной совместимости опытного образца

*Comparative analysis of electromagnetic compatibility parameters of the prototype*

Проверяемый параметр	Частотный диапазон	Ожидаемое значение*	Результаты измерений	Норматив ГОСТ Р В 6601-002-2008	Соответствие
Напряжение помех в цепях питания (п. 5.1)	245 кГц - 15 МГц	$\leq 40$ дБмкВ	Превышение на 25,1 дБмкВ	$\leq 46$ дБмкВ	Не соответствует
Ток помех в жгутах линий связи (п. 5.2)	2-30 МГц	$\leq 45$ дБмкА	В пределах нормы	$\leq 48$ дБмкА	Соответствует
Напряженность ЭМП (п. 5.3):					
– на частоте 2,71 МГц	2,71 МГц	$\leq 30$ дБмкВ/м	Превышение на 23,5 дБмкВ/м	$\leq 28$ дБмкВ/м	Не соответствует
– на частоте 14,95 МГц	14,95 МГц	$\leq 28$ дБмкВ/м	Превышение на 46,67 дБмкВ/м	$\leq 24$ дБмкВ/м	Не соответствует
– на частоте 73,7 МГц	73,7 МГц	$\leq 32$ дБмкВ/м	Превышение на 8 дБмкВ/м	$\leq 34$ дБмкВ/м	Не соответствует
– в диапазоне 200 МГц - 18 ГГц	200 МГц - 18 ГГц	$\leq 40$ дБмкВ/м	В пределах нормы	$\leq 42$ дБмкВ/м	Соответствует

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Ожидаемые значения установлены на 10-15% строже нормативных требований для создания запаса по помехоустойчивости.

Проведенные испытания выявили системное несоответствие опытного образца требованиям ГОСТ Р В 6601-002-2008 по параметрам кондуктивных и излучаемых помех. Наиболее значительные превышения нормативов зафиксированы в низкочастотном диапазоне:

- Напряжение помех в цепях питания превышает допустимые значения на 54,5%.
- Напряженность электромагнитного поля на частоте 14,95 МГц превышает норматив в 2,2 раза.

Полученные результаты подтверждают необходимость применения разработанной методики проектирования с комплексом мероприятий по улучшению экранирования и фильтрации. Для решения проблемы несоответствия исследуемой бортовой электроконструкции требованиям нормативных документов в области электромагнитной совместимости можно применить различные способы устранения кондуктивных и индуктивных помех.

### Обсуждение (Discussions)

Для устранения индуктивных и кондуктивных помех необходимо пользоваться разными подходами при проектировании устройств и учитывать особенности распространения отдельного вида помех.

#### Рекомендации для устранения кондуктивных помех.

Для устранения проблемы превышения пиковых значений напряжений помех в проводах питания (кондуктивные помехи) необходимо рассмотреть возможность новой конструкции кабелей питания изделия с использованием высококачественного экранирования [36, 39, 40].

Конструктивные особенности электромагнитных экранов кабельных систем характеризуются наличием неизбежных неоднородностей, проявляющихся в виде локальных разрывов и нарушений целостности экранирующей структуры. Как показано на рисунке 14, такие дефекты преимущественно возникают в следующих критичных зонах соединений: на стыке экранирующей оплетки кабеля с металлическим кожухом кабельного разъема; в области сопряжения кожуха разъема с корпусом соединителя; в местах соединения ответных частей электрических разъемов; а также на участках крепления разъемов к корпусам бортового оборудования. Следует особо отметить, что величина переходного сопротивления в указанных зонах неоднородностей оказывает существенное влияние на общую эффективность экранирования, поскольку создает пути для проникновения электромагнитных помех. Данный фактор необходимо учитывать при проектировании высоконадежных кабельных систем авиационной техники, предусматривая специальные конструктивные решения для минимизации переходных сопротивлений в критичных точках соединений.

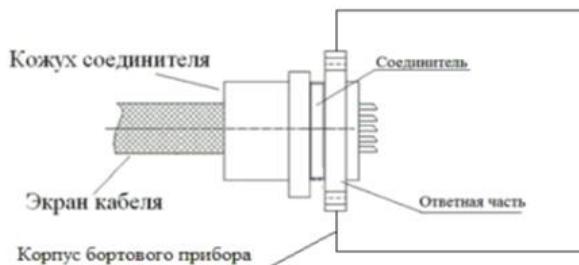


Рис. 14. Схема соединения экрана кабеля с электрическим кабельным соединителем

Fig. 14. Connection diagram of the cable shield with an electric cable connector

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Экраны бортовых кабелей конструктивно могут быть выполнены в виде сплошных тонкостенных труб, витых металлических лент, металлических и металлизированных тканей, сплетенных из металлических нитей оплеток (плетенок) или их комбинаций.

В современных системах кабельного экранирования перспективным решением выступает ленточная экранировка на основе алюминиевой или медной с нанесенным токопроводящим клеевым составом, где электрический контакт между витками обеспечивается как проводящими свойствами самого клея, так и механическим воздействием выступов гофрировки, создающих при намотке локальные зоны повышенного давления для улучшения межслойной проводимости; параллельно широкое применение находят металлизированные тканевые экраны, формируемые методом вакуумного напыления различных металлов на текстильную основу, что обеспечивает оптимальное сочетание лёгкости, гибкости и механической прочности с высокой технологичностью монтажа.

Наиболее сбалансированным решением по совокупности критериев эффективности экранирования, массогабаритных показателей, удобства монтажа и механических характеристик остаются традиционные плетёные экраны из металлических оплёток, параметры плетения которых (плотность, диаметр проволоки, шаг) могут варьироваться для достижения требуемого компромисса между степенью экранирования, массой и гибкостью кабельной продукции в конкретных условиях эксплуатации.

#### Рекомендации для устранения индуктивных помех.

Для устранения проблемы напряженности электромагнитного поля радиоизлучения от изделия (индуктивные помехи) необходимо рассмотреть возможность новой конструкции корпуса опытного образца оптоэлектронного изделия.

Металлические корпусы электронных устройств обеспечивает определенную защиту от проникновения из окружающего пространства в него электромагнитных помех. Однако неизбежные разрезы, швы, отверстия для кабелей и вентиляции сильно снижают их экранирующее воздействие. Для устранения данных проблем используют конструкции, обеспечивающие сплошное гальваническое соединение всех стенок прибора, с применением подходящих уплотнений, например, проволочных плетеных прокладок, схожих с кабельными оплетками. Хорошим примером являются стандартные электропроводящие листовые эластомеры ЗИПСИЛ 101 РЭП-01. Данный материал приклеивают непроводящим kleem с внутренней стороны изделия для улучшения качества электромагнитной совместимости.

Для устранения индуктивных наводок изделия на окружающие объекты бортовой сети используются специальные изолирующие уплотнительные прокладки.

Одним из промышленных вариантов, изолирующих уплотнительный прокладок, является серия профессиональных электропроводящих термостойких уплотнительных силиконовых жгутов серии ЗИПСИЛ 200 РЭП-01 для радиогерметизации, экранировки и одновременной герметизации от окружающей среды СВЧ-устройств и электронного оборудования.

Также используют специальный изолирующий скотч или жидкий изолирующий клей для устранения зазоров в корпусе изделия.

### **Заключение или Выводы (Conclusions)**

Проведенное исследование подтвердило эффективность разработанной методики проектирования бортовой кабельной сети летательного аппарата, обеспечивающей выполнение требований электромагнитной совместимости на этапе конструкторского проектирования. Установлено, что ключевой проблемой современных оборонных предприятий является дефицит времени на проработку вопросов ЭМС при переходе от научно-исследовательских работ к опытно-конструкторским, что приводит к существенным затратам на доработки изделий на поздних стадиях.

Экспериментальные исследования выявили недостаточную эффективность существующих подходов к проектированию кабельных систем, не учитывающих взаимное электромагнитное влияние бортового оборудования. Предложенная методика демонстрирует принципиально новый подход, основанный на интеграции в процесс проектирования формализованных топологических моделей распространения помех и специализированных алгоритмов оптимизации трассировки.

Практическая значимость работы подтверждена результатами испытаний, показавшими необходимость и эффективность применения усовершенствованных экранирующих конструкций и электропроводящих уплотнительных материалов для подавления помех. Разработанный подход позволяет существенно сократить количество итераций проектирования и гарантировать соответствие бортового электрооборудования установленным нормативным требованиям ГОСТ РВ 6601-002-2008.

### **Литература**

1. Нгуен Ван Хой. Разработка алгоритмов проектирования экранов кабелей электротехнических комплексов летательных аппаратов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва – 2014. Доступно по: [https://newdiss.ru/\\_avtoreferats/01007848852.pdf](https://newdiss.ru/_avtoreferats/01007848852.pdf). Ссылка активна на 06.09.2025.
2. Васинова А.Н. Прогнозирование электромагнитной совместимости электронных систем беспилотного летательного аппарата при воздействии радиоэлектронных средств //4-я МНТК "Современные инновации в науке и технике"/ Казань, 2014 – с.188-190.
3. Vauché R., Mefteh R. A. B., Haddad F., et. al. Experimental Time-Domain Study for Bandpass Negative Group Delay Analysis With Lill-Shape Microstrip Circuit. IEEE Access, 2021. Vol. 9. Pp. 155–167.
4. M. Z. M. Hamdalla, J. M. Roacho-Valles, A. Caruso, et. al. Electromagnetic Compatibility Study of Quadcopter UAVs: Characteristic Mode Analysis of the Frame's Material and Shape Effect. Prog. Electromagn. Res. M, vol. 112, 2022, pp. 1–14.
5. Залалиев И.Р., Ференец А.В. Влияние электромагнитных полей высокой интенсивности на электрические цепи летательных аппаратов // V Всероссийская научно-техническая конференция (к 50-летнему юбилею кафедры «Электроснабжение и электротехника» Института энергетики и электротехники). Министерство образования и науки Российской Федерации, Тольяттинский государственный университет, Институт энергетики и электротехники, 2017.- с.572-578
6. Belousov A. O., Zhechev E. S., Chernikova E. B., Nosov A. V., Gazizov T. R. UAVs protection and countermeasures in a complex electromagnetic environment // Complexity. 2022. Vol. 2022. pp. 1–16.

7. Belousov A. O., Medvedev A. V., Chernikova E. B., et. al. Switching order after failures in symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation. *Symmetry*. 2021. Vol. 13(6). № 1074. pp. 1–22.
8. Sheu B. H., Chiu C. C., Lu W. T., et. al. Development of UAV Tracing and Coordinate Detection Method Using a Dual–Axis Rotary Platform for an Anti–UAV System, *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. № 13. pp. 1–17.
9. Иванов А. А., Комнатнов М. Е. Полуаналитический метод для оценки эффективности экранирования корпуса с апертурой // Доклады ТУСУР. 2021. Т. 24. № 1. С. 16–23
10. Ларин В. П., Желудева К. В. Проблемы проектирования системы электроснабжения гиперзвукового летательного аппарата // Научное периодическое издание «INSITU» №4, 2016.- с.33-37
11. Мясников А.Ю. Проектирование компонентов бортовых кабельных сетей с учетом требований технологичности // Онтология проектирования, №3, том 13, 2023 – С.368-379
12. Ivanov A. A., Demakov A. V., Komnatnov M. E., Gazizov T. R. Semi-analytical approach for calculating shielding effectiveness of an enclosure with a filled aperture. *ELECTRICA*. 2022. № 22. pp. 220–225.
13. Белоусов А. О., Газизов Т. Р. Способ трассировки проводников модального фильтра на основе плоского кабеля. Патент на изобретение №RU2749994. 21.06.2021, бюл. №18. Доступно по: [https://rusneb.ru/catalog/000224\\_000128\\_0002749994\\_20210621\\_C1\\_RU/](https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002749994_20210621_C1_RU/). Ссылка активна на 06 сентября 2025.
14. Белоусов А. О., Газизов Т. Р. Способ трассировки проводников модального фильтра с круговым сечением. Патент на изобретение №RU2747104. 27.04.2021, бюл. №12. Доступно по: [https://rusneb.ru/catalog/000224\\_000128\\_0002749994\\_20210621\\_C1\\_RU/](https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002749994_20210621_C1_RU/). Ссылка активна на 06 сентября 2025.
15. Суздальцев И.В., Гаранин И.Н. Методика автоматизированной раскладки кабельных соединений по каналам беспилотного летательного аппарата, с учетом критерия электромагнитной совместимости // Современные материалы, техника и технология: материалы 5-й Междунар. науч.-практ. конф. - 2015. С. 41 - 44.
16. Tay Sui Jiana, Muhammad Hafidz Fazli Md Fauadiah, Saifudin Hafiz Yahaya, et al. // A deep learning approach for automated PCB defect detection: A comprehensive review. *XXII Multidisciplinary Reviews* 8(1):2025011.
17. Fung, K. C., Xue, K. W., Lai, C. M., et. al. // Improving PCB defect detection using selective feature attention and pixel shuffle pyramid. *Results in Engineering*, 21.
18. Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф. Методология обеспечения внутрисистемной электромагнитной совместимости бортового оборудования беспилотных летательных аппаратов // Изв. вузов. Авиационная техника, 2016. № 4, Казань – С.155-160
19. Bielsky T., Junemann M., Thielecke F. Parametric modeling of the aircraft electrical supply system for overall conceptual systems design. *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*, Hamburg University of Technology, Institute of Aircraft Systems Engineering, Hamburg, 2021, pp. 1–13.
20. Das, D., Elfrgani, A., and Reddy, C.J. Simulation of Conductive and Radiated Emission for Off and OnBoard Radio Receivers according to CISPR 12 and 25, *SAE Technical Paper* 2020-01-1371, 2020.
21. Клыков А.В., Кириллов В. Ю.. «Возможности компьютерного моделирования при решении задач электромагнитной совместимости бортовых кабельных сетей самолетов». Электронный журнал «Труды МАИ», 2012. Выпуск № 57. С. 54-59
22. Mohamed Z. M. Hamdalla, Anthony N. Caruso, Ahmed M. Hassan. Electromagnetic Compatibility Analysis of Quadcopter UAVs Using the Equivalent Circuit Approach. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation* 3, September 2022, pp. 1090 – 1101
23. Коптев А. Н., Мясников А. Ю. Теоретические основы проектирования простых жгутов бортовой кабельной сети летательного аппарата // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая Техника, Технологии и Машиностроение № 4, 2019. С.76-86
24. Дементьев А. Н. Клюев Д. С. Новиков А.Н. и др. Модель процесса оценки электромагнитной совместимости бортовой аппаратуры летательного аппарата // Труды МАИ № 123. - 2022. - С.1-21
25. Суздальцев И.В., Исмагилов Р.Н. Автоматизированное размещение бортовых электронных средств во внутреннем пространстве беспилотного летательного аппарата с учетом критериев электромагнитной совместимости // Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли, Казань, 2016. С. 232-238.
26. Das A., Campbell S. D., Werner D. H. An Augmented Y-parameter Method for Macromodeling Electromagnetic Structures in the Presence of Plane-Waves. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, Denver, CO, Jul. 10, 2022.

27. Ten Have. Waveform model to characterize time-domain pulses resulting in EMI on static energy meters. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, April 2021.
28. Zhao Ta, Xueming Liu, Ping Sun et. al. Improved electromagnetic compatibility testing for rail vehicles using a quantum-based 3D reconstruction algorithm. - *Optical and Quantum Electronics* (2024), 30 January 2024.
29. Жуков П.А. Исследования средств защиты электротехнических комплексов летательных аппаратов от электромагнитных воздействий: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук 05.09.03. Москва, 2022. Доступно по: <https://mai.ru/upload/iblock/c13/67t2n32mobnku0c0ym35kkmclit50bev/avtoreferat-ZHukov-P.A.-dlya-sayta-MAI.pdf>. Ссылка активна на 06.09.2025.
30. Masoudi, N. *Geometric-Based Optimization Algorithms for Cable Routing and Branching in Cluttered Environments* [dissertation]. Clemson University, 2020. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/354492874.pdf>. Accessed 06 Sep 2025.
31. Yuanyuan Li, Yuanyuan Fang, Kaiyuan Li et. al. Morphological Tracing and Functional Identification of Monosynaptic Connections in the Brain: A Comprehensive Guide. - *Neuroscience Bulletin*, May 2024.
32. Punisia Pemarathne, T.G.I. Fernando, Ant Colony Optimization Algorithm to Solve Electrical Cable Routing. *Advances in Electronics Engineering*, 2020, pp.69-85.
33. Nafiseh Masoud, Georges Fadel. An Optimization Framework for The Design of Cable Harness Layouts in Planar Interconnected Systems. *Journal of Mechanical Design* 144(1), July 2021. pp.1-29.
34. Qian Y., Du B. Ye Z, et. al. Simulation on transient electromagnetic influence of lightning strike for turboprop engine," in 2019 4th International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer Technologies and Optimization Techniques (ICEECCOT), Dec. 2019, pp. 1-7.
35. Hartman T., Grootjans R., Moonen N., et.al. Electromagnetic compatible energy measurements using the orthogonality of nonfundamental power components. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 63, no. 2, Apr. 2021. pp. 598–605.
36. Belousov A. O., Vlasova N. O., Gordeyeva V. O. , et.al. Breaking the Symmetry of Cable Structures as an Instrument for Improving Modal Decomposition to Protect Critical Equipment Against UWB Pulses. *Symmetry*. 2022. Vol. 14(6), № 1228. pp. 1-34.
37. Ромашенко М.А., Коновалов Р.Г., Воробьев М.Е. Основные этапы методики обеспечения электромагнитной совместимости для подвижных объектов связи // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 1. 2023. С. 62-68.
38. Ромашенко М.А., Коновалов Р.Г. Структура функциональных связей оборудования подвижного объекта связи для решения задач обеспечения ЭМС // Проблемы обеспечения надёжности и качества приборов, устройств и систем: сб. науч. тр. Воронеж, 2022. С. 140-145
39. Helko B., Zander M., Ronald L. Testing of DC Electricity Meters with Broadband Conducted Electromagnetic Disturbances, Conference: 2022 20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP), May 2022.
40. Кириллов В.Ю. Электромагнитная совместимость летательных аппаратов. М.: МАИ, 2012. 162 с.
41. Hamdalla, M. Z. M., et al. Characteristic mode analysis prediction and guidance of electromagnetic coupling measurements to a UAV model. *IEEE Access*, Vol. 10, 2022. pp. 914–925
42. Mohamed Z. M. Hamdalla, Jesus M. Roacho-Valles, Anthony N. Caruso, et. al. Electromagnetic Compatibility Study of Quadcopter UAVs: Characteristic Mode Analysis of the Frame's Material and Shape Effect. *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 112, 2022. pp. 1–14.
43. Xiaobing Niu, Shenglin Li, Runze Qiu. Efficient Electromagnetic Compatibility Optimization Design Based on the Stochastic Collocation Method. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, June 2024.
44. Yaojia Zhang, Li Wang, Lexuan Meng. An Analytical AC Resistance Calculation Method for Multiple-Conductor Feeder Cables in Aircraft Electric Power Systems. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 67.5 (2020), pp. 3340–3349.
45. Белоусов А. О. // Подходы к обеспечению электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств в составе комплекса функционального поражения беспилотных летательных аппаратов мощным электромагнитным излучением. Системы управления, связи и безопасности № 3. 2023. С.134-196.
46. Mingazov A.L. Design of on-board electrical structures with regard to electromagnetic compatibility // Английский язык в сфере профессиональной коммуникации. Материалы VIII Всероссийской молодежной научной конференции. Казань, 2022. С. 244-245
47. Zhechev Y. S., Belousov A. O., Zabolotsky A. M., et.al. Serpentine and Spiral Routing

Schemes for Microwave Transmission Lines to Ensure UWB Interference Immunity. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2023. pp. 1–13.

48. Мингазов А.Л., Федоров Е.Ю. Проектирование бортовых электроконструкций с учетом электромагнитной совместимости // Перспективные направления развития автотранспортного комплекса. Сборник статей XVI Международной научно-практической конференции. Пенза, 2022 С. 94-97.

49. Evgenii Fedorov, Andrey Ferenets, Artur Mingazov. Features and limitations in the design of a light aircraft generation system. 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems: The international scientific and practical conference materials. Ufa State Aviation Technical University. – Ufa: USATU publishing complex, 2021 - pp. 343-346

50. Evgenii Fedorov, Andrey Ferenets, Artur Mingazov. The Method of Selecting Protection Devices in the Automated Design of an Electrical Complex of a Transport Vehicle. International Conference on Automatics and Energy. *Journal of Physics: Conference Series* 2096 (2021). pp. 1-8.

51. Mingazov A.L. Application of genetic algorithms for solving the problem of structural components of aircraft electrical equipment // Английский язык в сфере профессиональной коммуникации. Сборник тезисов докладов VI Всероссийской молодежной научной конференции. Казань, 2020. С. 119-121.

### Авторы публикации

**Мингазов Артур Ленарович** – аспирант Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия. *mingazow.artur@yandex.ru*

**Федоров Евгений Юрьевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия. *zhenek\_fed@mail.ru*

### References

1. Nguyen Van Hoi. *Development of algorithms for designing cable screens for electrical complexes of aircraft*. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow – 2014. Available by: [https://new-disser.ru/\\_avtoreferats/01007848852.pdf](https://new-disser.ru/_avtoreferats/01007848852.pdf). Accessed: 09 Sep 2025. (In Russ).
2. Vasinova A.N. Forecasting electromagnetic compatibility of electronic systems of an unmanned aerial vehicle under the influence of radio-electronic means. *4-th ISTK "Modern innovations in science and technology"*, Kazan, 2014– pp.188-190. (In Russ).
3. Vauché R., Mefteh R. A. B., Haddad F., et. al. Experimental Time-Domain Study for Bandpass Negative Group Delay Analysis With Lill–Shape Microstrip Circuit. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 24155–24167. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3056221
4. M. Z. M. Hamdalla, J. M. Roacho-Valles, A. Caruso, et. al. Electromagnetic Compatibility Study of Quadcopter UAVs: Characteristic Mode Analysis of the Frame's Material and Shape Effect. *Prog. Electromagn. Res. M*, vol. 112, 2022, pp. 1–14. doi: 10.2528/PIERM22062907.
5. Zalaliev I.R., Ferenets A.V. The influence of high-intensity electromagnetic fields on the electrical circuits of aircraft. *V All-Russian Scientific and Technical Conference (dedicated to the 50th anniversary of the Department of Power Supply and Electrical Engineering of the Institute of Energy and Electrical Engineering)*. Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Tolyatti State University, Institute of Energy and Electrical Engineering, 2017, pp.572-578. (In Russ).
6. Belousov A. O., Zhechev E. S., Chernikova E. B., et. al. UAVs protection and countermeasures in a complex electromagnetic environment // *Complexity*, 2022. Vol. 2022. pp. 1–16. doi:10.1155/2022/8539326
7. Belousov A. O., Medvedev A. V., Chernikova E. B., et. al. Switching order after failures in symmetric protective electrical circuits with triple modal reservation. *Symmetry*, 2021. Vol. 13(6). № 1074. pp. 1–22. doi: 10.3390/sym13061074
8. Sheu B. H., Chiu C. C., Lu W. T., et. al. Development of UAV Tracing and Coordinate Detection Method Using a Dual–Axis Rotary Platform for an Anti–UAV System. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. No. 13. pp. 1-17. doi: 10.3390/app9132583
9. Ivanov A. A., Komnatnov M. E. A semi-analytical method for evaluating the effectiveness of shielding a body with an aperture. *Reports of TUSUR*. 2021. Vol. 24. No. 1. pp. 16-23. doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-1-16-23. (In Russ).
10. Larin V. P., Zheludeva K. V. Problems of designing a hypersonic aircraft power supply system. *SCIENTIFIC PERIODICAL "INSITU"* No. 4, 2016. pp.33-37. (In Russ).

11. A.Y. Myasnikov. Designing components of on-board cable networks taking into account the requirements of manufacturability. *Design Ontology*, No. 3, volume 13, 2023 – pp.368-379. (In Russ).
12. Ivanov A. A., Demakov A.V., Komnatnov M. E., et. al. Semi-analytical approach for calculating shielding effectiveness of an enclosure with a filled aperture. *ELECTRICA*. 2022. No. 22. pp. 220-225. (In Russ).
13. Belousov A. O., Gazizov T. R. *A method for tracing modal filter conductors based on a flat cable.* Patent RUS №RU2749994. 06.21.2021, Byul. №18. Available at: [https://rusneb.ru/catalog/000224\\_000128\\_0002749994\\_20210621\\_C1\\_RU/](https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002749994_20210621_C1_RU/). Accessed: 6 Sep 2025. (In Russ).
14. Belousov A. O., Gazizov T. R. *A method for tracing modal filter conductors with a circular cross-section.* Patent RUS №RU2747104. 04.27.2021, Byul. №12. Available at: [https://rusneb.ru/catalog/000224\\_000128\\_0002749994\\_20210621\\_C1\\_RU/](https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002749994_20210621_C1_RU/). Accessed: 6 Sep 2025. (In Russ).
15. Suzdal'tsev I.V., Garanin I.N. A technique for automated laying of cable connections through the channels of an unmanned aerial vehicle, taking into account the criterion of electromagnetic compatibility. *Modern materials, machinery and technology: proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference*, 2015, pp. 41-44. (In Russ).
16. Tay Sui Jiana, Muhammad Hafiz Fazli Md Fauad, Saifudin Hafiz Yahaya. et al. A deep learning approach for automated PCB defect detection: A comprehensive review. *XXII Multidisciplinary Reviews* 8(1):2025011, 2025. doi:10.31893/multirev.2025011
17. Fung, K. C., Xue, K. W., Lai, C. M., et. al. Improving PCB defect detection using selective feature attention and pixel shuffle pyramid. *Results in Engineering*, 21, 101992. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2024.101992>
18. Gainutdinov R.R., Chermoshentsev S.F.. Methodology for ensuring intra-system electromagnetic compatibility of on-board equipment of unmanned aerial vehicles // *Izv. vuzov. Aviation Technology*, 2016. No. 4, Kazan – pp.155-160. (In Russ).
19. Bielsky T., Junemann M., Thielecke F. Parametric modeling of the aircraft electrical supply system for overall conceptual systems design. *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*, Hamburg University of Technology, *Institute of Aircraft Systems Engineering*, Hamburg, 2021, pp. 1–13, doi: 10.25967/530143.
20. Das, D., Elfregani, A., and Reddy, C.J. Simulation of Conductive and Radiated Emission for Off and OnBoard Radio Receivers according to CISPR 12 and 25, *SAE Technical Paper* 2020-01-1371, 2020. doi: 10.4271/2020-01-1371
21. Klykov A.V., Kirillov V. Y. Computer simulation capabilities in solving problems of electromagnetic compatibility of aircraft on-board cable networks. *Electronic journal "Proceedings of MAI"*, 2012. Issue No. 57. pp. 54-59. (In Russ).
22. Mohamed Z. M. Hamdalla, Anthony N. et. al. Electromagnetic Compatibility Analysis of Quadcopter UAVs Using the Equivalent Circuit Approach. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation* 3, September 2022, pp. 1090 – 1101 doi:10.1109/OJAP.2022.3206893
23. Koptev A. N., Myasnikov A. Yu. Theoretical foundations of designing simple harnesses for an aircraft's on-board cable network. *Bulletin of Samara State University. Aerospace Engineering, Technology and Mechanical Engineering* No. 4, 2019. pp.76-86. (In Russ).
24. Dementiev A. N. Klyuev D. S. Novikov A.N. et al. A model of the electromagnetic compatibility assessment process for on-board aircraft equipment. *Proceedings of MAI* No. 123. - 2022. - pp.1-21. (In Russ).
25. Suzdal'tsev I.V., Ismagilov R.N. Automated placement of on-board electronic devices in the interior of an unmanned aerial vehicle, taking into account electromagnetic compatibility criteria. *New technologies, materials and equipment of the Russian aerospace industry*, Kazan, 2016, pp. 232-238. (In Russ).
26. Das A., Campbell S. D., Werner D. H. An Augmented Y-parameter Method for Macromodeling Electromagnetic Structures in the Presence of Plane-Waves. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, Denver, CO, Jul. 10, 2022. doi:10.1109/AP-S/USNC-URSI47032.2022.9887307
27. Ten Have. Waveform model to characterize time-domain pulses resulting in EMI on static energy meters. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. April 2021, doi: 10.1109/TEMC.2021.3062948.
28. Zhao Ta, Xueming Liu, Ping Sun et. al. Improved electromagnetic compatibility testing for rail vehicles using a quantum-based 3D reconstruction algorithm. *Optical and Quantum Electronics* (2024), 30 January 2024. doi: 10.1007/s11082-023-06067-y
29. Zhukov P.A. *Research of means of protection of electrotechnical complexes of aircraft from electromagnetic influences* [dissertation]. Moscow, 2022. Available at: <https://mai.ru/upload/iblock/c13/67>

t2n32mobnku0c0ym35kkmclit50bev/avtoreferat-ZHukov-P.A.-dlya-sayta-MAI.pdf. Accessed 09 Sep 2025. (In Russ)

30. Masoudi, N. *Geometric-Based Optimization Algorithms for Cable Routing and Branching in Cluttered Environments* [dissertation]. Clemson University, 2020. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/354492874.pdf>. Accessed 06 Sep 2025.

31. Yuanyuan Li, Yuanyuan Fang, Kaiyuan Li et. al. Morphological Tracing and Functional Identification of Monosynaptic Connections in the Brain: A Comprehensive Guide. *Neuroscience Bulletin*, May 2024. doi: 10.1007/s12264-024-01196-0

32. Punisi Pemarathne, T.G.I. Fernando. Ant Colony Optimization Algorithm to Solve Electrical Cable Routing. *Advances in Electronics Engineering*, 2020, pp.69-85. doi:10.1007/978-981-15-1289-6\_7.

33. Nafiseh Masoud, Georges Fadel. An Optimization Framework for The Design of Cable Harness Layouts in Planar Interconnected Systems. *Journal of Mechanical Design* 144(1), July 2021. pp.1-29. doi:10.1115/1.4051685.

34. Qian Y.-F., Du B., Ye Z.-F., et. al. Simulation on transient electromagnetic influence of lightning strike for turboprop engine. *4th International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer Technologies and Optimization Techniques (ICEECCOT)*, Dec. 2019, pp. 1-7. doi: 10.1109/ICEECCOT46775.2019.9114767.

35. Hartman T., Grootjans R., Moonen N. et.al. Electromagnetic compatible energy measurements using the orthogonality of nonfundamental power components. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 63, no. 2, pp. 598–605, Apr. 2021. doi: 10.1109/TEMC.2020.3019974

36. Belousov A. O., Vlasova N. O., Gordyeva V. O., et.al. Breaking the Symmetry of Cable Structures as an Instrument for Improving Modal Decomposition to Protect Critical Equipment Against UWB Pulses. *Symmetry*. 2022. Vol. 14(6), № 1228. P. 1–34, doi: 10.3390/sym14061228.

37. Romashchenko M.A., Konovalov R.G., Vorobyov M.E. The main stages of the methodology for ensuring electromagnetic compatibility for mobile communication facilities. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. Vol. 19. No. 1. 2023. – pp. 62-68. (In Russ).

38. Romashchenko M.A., Konovalov R.G. The structure of functional connections of mobile communication facility equipment for solving EMC problems. *Problems of ensuring reliability and quality of devices, devices and systems: collection of scientific papers Voronezh*, 2022. pp. 140-145. (In Russ).

39. Helko B., Zander M., Ronald L. Testing of DC Electricity Meters with Broadband Conducted Electromagnetic Disturbances. *Conference: 2022 20th International Conference on Harmonics & Quality of Power (ICHQP)*, May 2022, doi: 10.1109/ICHQP53011.2022.9808496

40. Kirillov V.Y. *Electromagnetic compatibility of aircraft*. Moscow: MAI, 2012. (In Russ).

41. Hamdalla, M. Z. M., et al. Characteristic mode analysis prediction and guidance of electromagnetic coupling measurements to a UAV model. *IEEE Access*, Vol. 10, 914–925, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3138296.

42. Mohamed Z. M. Hamdalla, Jesus M. Roacho-Valles, Anthony N. Caruso et. al. Electromagnetic Compatibility Study of Quadcopter UAVs: Characteristic Mode Analysis of the Frame's Material and Shape Effect. *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 112, 2022 . pp.1–14. doi:10.2528/PIERM22062907

43. Xiaobing Niu, Shenglin Lium Runze Qiu. Efficient Electromagnetic Compatibility Optimization Design Based on the Stochastic Collocation Method. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, June 2024. doi: 10.13052/2024.ACES.J.390607

44. Yaojia Zhang, Li Wang, and Lexuan Meng. An Analytical AC Resistance Calculation Method for Multiple-Conductor Feeder Cables in Aircraft Electric Power Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 67.5 (2020), pp. 3340–3349. doi: 10.1109/TIE.2019.2917417

45. Belousov A. O. Approaches to ensuring electromagnetic compatibility of radio-electronic devices as part of a complex of functional destruction of unmanned aerial vehicles by powerful electromagnetic radiation. *Control, communication and security systems* No. 3. 2023 - pp.134-196. (In Russ).

46. Mingazov A.L. Design of on-board electrical structures with regard to electromagnetic compatibility. *English in the field of professional communication. Materials of the VIII All-Russian Youth Scientific Conference*, Казань. 2022 – pp. 244-245. (In Russ).

47. Zhechev Y. S., Belousov A. O., Zabolotsky A. M., et. al. Serpentine and Spiral Routing Schemes for Microwave Transmission Lines to Ensure UWB Interference Immunity. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2023. pp. 1–13. doi: 10.1109/TMTT.2023.3276029

48. Mingazov A.L., Fedorov E.Y. Design of on-board electrical structures taking into account electromagnetic compatibility. *Promising areas of development of the motor transport complex. Collection of articles of the XVI International Scientific and Practical Conference*. Penza, 2022– pp. 94-97. (In Russ).

49. Fedorov E., Ferenets A., Mingazov A.. Features and limitations in the design of a light aircraft generation system. *2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems: The*

*international scientific and practical conference materials.* Ufa State Aviation Technical University. – Ufa: USATU publishing complex, 2021 - pp. 343-346. doi: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657309

50. Fedorov E., Ferenets A., Mingazov A. The Method of Selecting Protection Devices in the Automated Design of an Electrical Complex of a Transport Vehicle. *International Conference on Automatics and Energy. Journal of Physics: Conference Series* 2096 (2021) – pp. 1-8. doi: 10.1088/1742-6596/2096/1/012201

51. Mingazov A.L. Application of genetic algorithms for solving the problem of structural components of aircraft electrical equipment. *English in the field of professional communication. Collection of abstracts of the VI All-Russian Youth Scientific Conference.* Kazan, 2020 – pp. 119-120.

### **Authors of the publication**

**Artur L. Mingazov** – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia. *mingazow.artur@yandex.ru*

**Evgenii Yu. Fedorov** – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia. *zhenek\_fed@mail.ru*

*Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы*

**Получено** **07.09.2025 г.**

**Отредактировано** **22.10.2025 г.**

**Принято** **01.11.2025 г.**