

**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА
И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**

УДК 621.391.004

**ЭМИССИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ
ОТ ЛИНИЙ СВЯЗИ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ
БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

© 2020 г. Р. Р. Гайнутдинов^а, *, С. Ф. Чермошенцев^а

^аКазанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
ул. Карла Маркса, 10, Казань, 420111 Российская Федерация

*E-mail: emc-kai@mail.ru

Поступила в редакцию 11.04.2018 г.

После доработки 04.07.2018 г.

Принята к публикации 09.07.2018 г.

Предложен подход для исследования эмиссии электромагнитных помех от линий связи бортового оборудования беспилотного летательного аппарата. Рассмотрен беспилотный летательный аппарат, изготовленный из композитного материала. Приведен практический пример исследования электромагнитной обстановки во внутрифюзеляжном пространстве беспилотного летательного аппарата при эмиссии электромагнитных помех от линий связи интерфейсов и сети питания системы управления. Оценено влияние эмиссии электромагнитных помех на радиоприемники бортового оборудования беспилотного летательного аппарата.

DOI: 10.31857/S0033849420020059

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития летательных аппаратов, характеризуется широким внедрением автоматизированных технических систем. Наиболее высокого уровня автоматизации достигают беспилотные летательные (БЛ) аппараты, что обусловлено использованием дистанционных и автоматических систем управления. Основным критерием, во многом определяющим качество, надежность, функциональную безопасность и радиоэлектронную защиту БЛ-аппаратов, является электромагнитная совместимость (ЭМС). Нарушение ЭМС сложных технических систем, входящих в состав комплекса бортового оборудования БЛ-аппарата, может привести к снижению качества функционирования или к необратимым отказам. Под ЭМС бортового оборудования понимается его функционирование в соответствии с требуемыми техническими характеристиками в реальной электромагнитной обстановке, обусловленной электромагнитными взаимодействиями и воздействиями, не создающими недопустимых электромагнитных помех другому бортовому оборудованию [1, 2].

Высокий уровень автоматизации БЛ-аппаратов достигается за счет массового применения электроники для управления исполнительными механизмами и внедрением автоматизированных систем управления и контроля на основе совре-

менной элементной базы, с низкими уровнями сигналов и питающих напряжений, и делает данные системы менее устойчивыми к электромагнитным воздействиям. При этом состав бортового оборудования БЛ-аппаратов характеризуется одновременным применением аналоговых, цифровых и СВЧ-устройств, работающих в широком диапазоне частот (до нескольких гигагерц), напряжений и токов, что неуклонно расширяет пути электромагнитных взаимодействий. Все это явно приводит к ухудшению электромагнитной обстановки и трудностям в обеспечении ЭМС.

Наряду с увеличением уровня автоматизации в авиационной технике наблюдается устойчивая тенденция к уменьшению массы и увеличению прочности фюзеляжа летательного аппарата. Данные характеристики летательных аппаратов достигаются применением композитных (углепластиковых и стеклопластиковых) материалов. Однако улучшение одних характеристик летательного аппарата явно приводит к ухудшению других. Применение фюзеляжей летательных аппаратов на основе композитов (полностью или частично) явно усложняет обеспечение ЭМС бортового оборудования. Параметры композитных материалов характеризуются низкой электрической проводимостью [3], эффективностью экранирования, анизотропностью и т.д.

1. АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ЭМИССИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

Проблема исследования и обеспечения ЭМС бортового оборудования наибольшую актуальность приобретает именно для БЛ-аппаратов. Данный факт обусловлен необходимостью надежного функционирования в ограниченном пространстве композитного фюзеляжа большого количества электротехнических, электронных и радиоэлектронных систем. Для исследования ЭМС в первую очередь необходимо определить электромагнитную обстановку возле БЛ-аппаратов и во внутрифюзеляжном пространстве, вызванную функционированием бортового оборудования. Одним из основных источников электромагнитных помех во внутрифюзеляжном пространстве БЛ-аппарата является эмиссия электромагнитных помех, характеризующаяся излучениями линий связи при функционировании бортового оборудования. Линии связи подобно антеннам излучают электромагнитные поля, создавая паразитную электромагнитную обстановку [2, 4].

Большой вклад в решение задач связанных с исследованиями эмиссии электромагнитных помех от блоков и линий связи электронных средств внесли российские ученые и специалисты [5, 6]. Среди зарубежных авторов в первую очередь необходимо отметить работы [7–9], в которых описаны теоретические и экспериментальные методики исследования помех излучаемых линиями связи при функционировании технических систем. Основу исследований, как правило, составляют экспериментальные и аналитические методы исследований. Для исследования эмиссии также применяются методы электродинамического моделирования при существенном упрощении объекта исследования. В работах даны рекомендации для уменьшения помехоэмиссии на основе развития базовых методов обеспечения ЭМС. Широкий круг работ носит сугубо практический характер, т.е. описывается опыт исследования и обеспечения ЭМС при эмиссии электромагнитных помех от устройств или систем конкретного типа. При этом вопросы эмиссии электромагнитных помех от бортового оборудования БЛ-аппаратов не нашли должного отражения в научно-технической литературе.

Цель данной работы – исследование эмиссии электромагнитных помех от линий связи и их влияние на функционирование бортового оборудования БЛ-аппаратов. В качестве примера рассматриваются интерфейсы, формирующие систему управления БЛ-аппаратов и сеть питания.

Можно выделить два аспекта задачи влияния эмиссии электромагнитных помех на бортовое оборудование БЛ-аппаратов. Первое заключает-

ся в исследовании электромагнитной обстановки, создаваемой излучениями линий связи интерфейсов и сети питания. Данная информация может быть полезна при определении оптимальных мест размещения бортового оборудования. Второй аспект связан с влияниями излучений от линий связи на радиоприемники бортового оборудования, а именно на радиоканал системы управления БЛ-аппаратов.

2. МЕТОДЫ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭМИССИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

Исследование эмиссии электромагнитных помех от интерфейсов БЛ-аппаратов может быть проведено методами, основанными на аналитических расчетах, экспериментальных исследованиях и электродинамическом моделировании. Аналитические методы не позволяют учитывать множество факторов, влияющих на точность прогнозирования. Экспериментальные исследования применимы лишь на поздних этапах разработки БЛ-аппаратов, что не позволяет оценить ЭМС, когда объект еще в “цифровом виде”. Для прогнозирования эмиссии электромагнитных помех от интерфейсов БЛ-аппаратов предлагается применять программные реализации численных методов на основе разработки имитационных моделей. В качестве инструмента для прогнозирования предлагается использовать 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 областях, TLM-метод, метод конечных интегралов [10]. Проведенные авторами [11–13] исследования прогнозирования ЭМС технических систем с применением подхода на основе электродинамического моделирования в аналогичных задачах и сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными показывают расхождения не более 15%, при полном и корректном описании объекта исследования.

2.1. Беспилотный летательный аппарат

Исследуем эмиссию электромагнитных помех от линий связи БЛ-аппаратов на практическом примере. Рассмотрим БЛ-аппарат, который имеет следующие параметры: 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). Антенна радиомодема представлена четвертьволновым вибратором и расположена

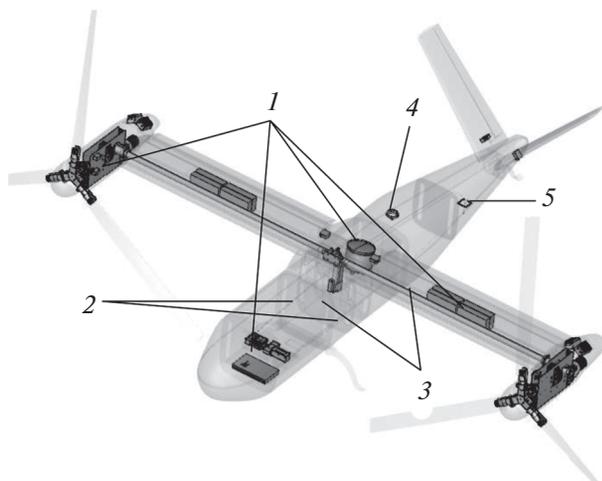


Рис. 1. Компонентная схема БЛ-аппарата: 1 – блоки бортового оборудования; 2 – линии связи интерфейсов; 3 – линии связи сети питания; 4 – антенна спутникового приемника; 5 – антенна приемопередатчика радиолинии.

в хвостовой части фюзеляжа, а антенна спутникового навигационного приемника – в центре (рис. 1). Параметры радиоприемника и спутникового приемника: частота 2.4 и 1.5 ГГц, чувствительность приемника –90 и –120 дБм соответственно. Структура системы управления БЛ-аппарата построена на основе базового интерфейса RS-485. Посредством преобразователей и широтно-импульсной модуляции сигналы управления поступают от интерфейса RS-485 к исполнительным механизмам. Интерфейс RS-232 используется для организации связи блока системы управления с радиомодемом.

Перечислим основные конструктивные и электрофизические параметры интерфейсов и линий связи следующие.

а. *Интерфейс RS-485.* Общая длина линии связи интерфейса 9354 мм (на физическом уровне представлена кабелем FTP 4-cat5E). При моделировании интерфейса RS-485 на концы линий связи подключаются эквивалентные согласующие нагрузки в 120 Ом. При этом в каждом месте подключения преобразователя (периферийного контроллера интерфейса RS-485) параллельно линии связи подключается источник сигналов соответствующий паспортным характеристикам данного интерфейса. В работе исследован наихудший случай: одновременная передача информации по интерфейсу, т.е. активированы все контроллеры. Также в начале линий связи на вторую пару кабеля подается напряжение для питания периферийных контроллеров.

б. *Интерфейс RS-232.* Длина линий связи 1863 мм для подключения радиомодема (на физическом уровне интерфейс представлен кабе-

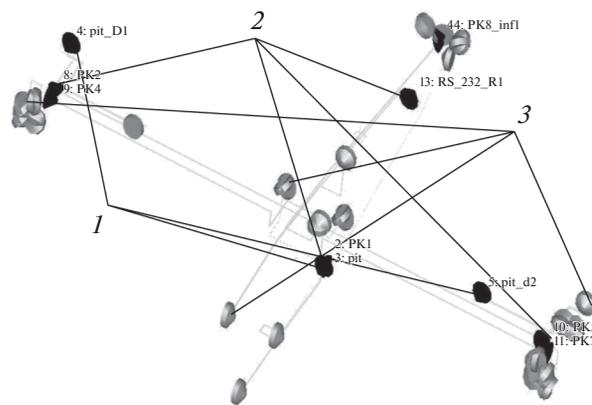


Рис. 2. Схема трассировки линий связи с источниками сигналов и согласующими элементами: 1 – источники напряжения питания; 2 – источники сигналов интерфейсов; 3 – согласующие элементы.

лем FTP 4-cat5E). В случае с интерфейсом RS-232 к одному концу линии связи подключается источник сигнала в соответствии с паспортными характеристиками интерфейса, а к другому – эквивалентная нагрузка 120 Ом.

в. *Широтно-импульсная модуляция (ШИМ).* Используется для управления исполнительными механизмами через преобразователь интерфейса RS-485 (на физическом уровне представлен набором трех проводов МГТФ 0.12). Для каждого комплекта проводов, объединяющих преобразователи и исполнительные механизмы, к одному концу комплекта проводов подключаются источник сигнала с напряжением в соответствии с инструкцией (5 В, транзисторно-транзисторная логика), а к другому – эквивалентные нагрузки 50 Ом.

г. *Сеть питания бортового оборудования.* На физическом уровне представлены набором из двух проводов МГТФ 0.14. В линии связи сети питания бортового оборудования подается напряжение 12 В.

д. *Сеть питания силовой установки.* На физическом уровне представлены набором из двух проводов АWG8. На линии связи питания силовой установки подается напряжение 60 В.

Структура трассировки линий связи интерфейсов с источниками сигналов и согласующими элементами представлена на рис. 2.

2.2. Модели для исследования электромагнитной обстановки и влияния эмиссии электромагнитных помех на бортовое оборудование

Проведено исследование распределения напряженности электрического поля при эмиссии электромагнитных помех от линий связи интерфейсов и сети питания. Напряженность электромагнит-

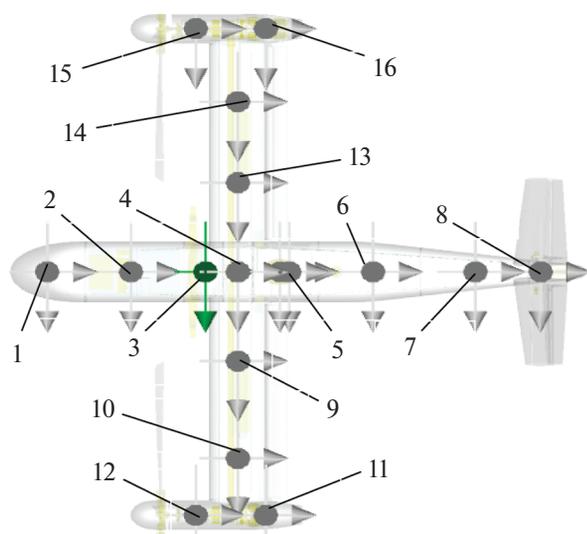


Рис. 3. Точки расчета (№ 1–16) напряженности электромагнитного поля во внутрифюзеляжном пространстве БЛ-аппарата.

ного поля во внутрифюзеляжном пространстве БЛ-аппарата, создаваемая излучениями от линий связи, рассчитывается в точках, представленных на рис. 3.

Имитационная модель БЛ-аппарата разработана для исследования эмиссии электромагнитных помех от линий связи. Модель учитывает геометрические и электрофизические параметры БЛ-аппарата, а именно: расположение блоков бортового оборудования в БЛ-аппарате; параметры материала фюзеляжа и оперения БЛ-аппарата; расположение антенных систем; геометрические и электрофизические параметры линий связи и их геометрию прокладки по БЛ-аппарату; временные и амплитудные параметры сигналов интерфейсов и уровень напряжения питания устройств.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ ПРИ ЭМИССИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

Эмиссия электромагнитных помех была исследована одновременно от всех интерфейсных и силовых линий связи. Вначале рассчитывали напряженность электромагнитного поля, создаваемую эмиссией электромагнитных помех во внутрифюзеляжном пространстве. Распределение напряженности электрического поля в пространстве БЛ-аппарата при излучении линий связи интерфейсов и сети питания представлено на рис. 4.

Сводные значения напряженности электрического поля при эмиссии электромагнитных помех от линий связи, рассчитанные в соответствующих точках внутрифюзеляжного пространства БЛ-аппарата, представлены на рис. 5.

При эмиссии электромагнитных помех от линий связи во внутрифюзеляжном пространстве БЛ-аппарата отмечается сложная электромагнитная обстановка. Значения напряженности электрического поля максимальны в точках (4, 8 и 14), которые расположены рядом с наибольшим количеством линий связи в центре БЛ-аппарата, крыльях и ближе к мотогондолам. В данных точках внутрифюзеляжного пространства напряженность электрического поля превосходит минимальные уровни, установленные нормативными документами [14]. Следует отметить, что максимальны значения напряженности электрического поля в отсеках с компактным расположением линий связи широтно-импульсной модуляции, которые объединяют периферийные контроллеры с исполнительными механизмами.

Максимальное значение напряженности электрического поля достигает 161 В/м, в точке № 14 (рис. 6). При этом электромагнитная волна имеет

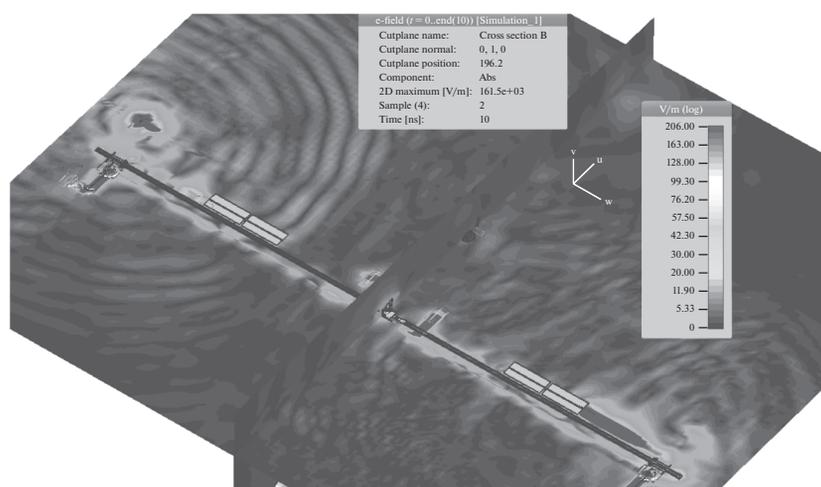


Рис. 4. Распределение напряженности электрического поля по БЛ-аппарату.

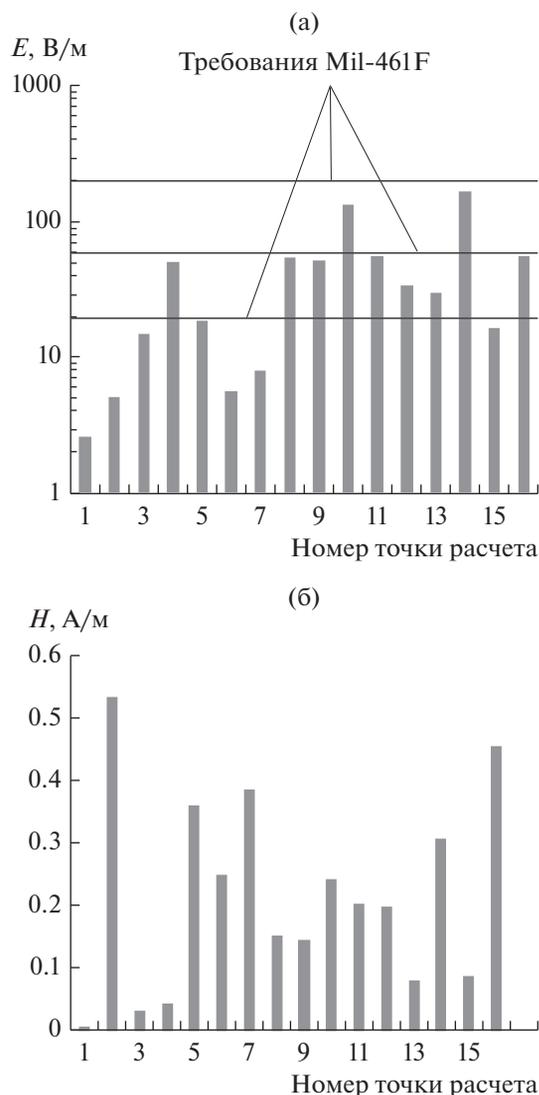


Рис. 5. Уровни напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей в точках расчета.

сложную форму, обусловленную влиянием излучений одновременно нескольких линий связи. Основные колебания электромагнитной волны соответствуют частоте 1.5 ГГц. Были сопоставлены требования нормативно-технических документов (Mil-461E-std) с рассчитанными значениями напряженности электрического поля. Определено, что уровни напряженности электрического поля во внутрифюзеляжном пространстве БЛ-аппарата при эмиссии достигают высоких значений и приведут к нарушению качества функционирования бортового оборудования БЛ-аппарата при несоблюдении требований по уровням помехоустойчивости бортового оборудования, которое размещено в летательном аппарате, изготовленном в композитном фюзеляже.

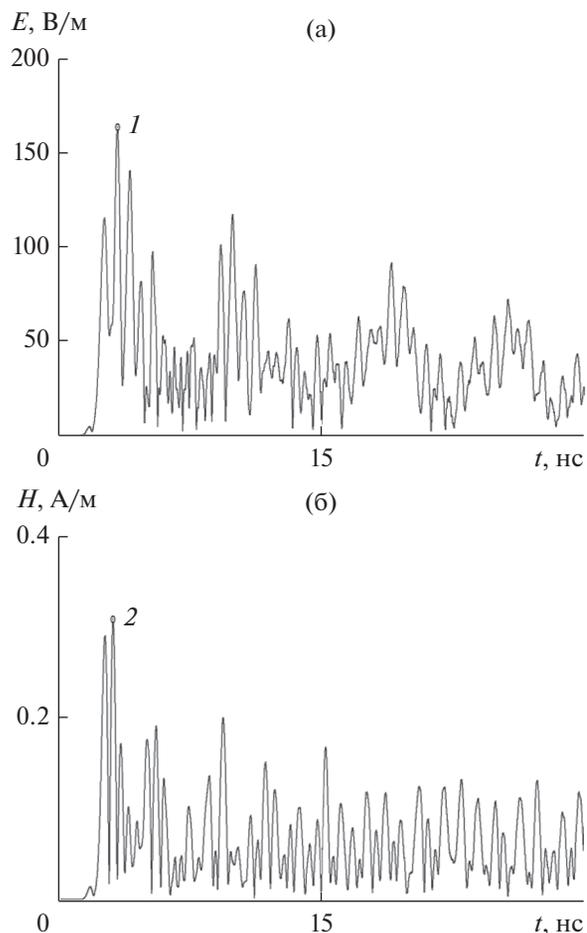


Рис. 6. Зависимость изменения напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей от времени; максимальные значения 163 (1) и 0.36 А/м (2).

Для улучшения электромагнитной обстановки во внутрифюзеляжном пространстве БЛ-аппарата необходимо обеспечить экранирование линий связи широтно-импульсной модуляции на уровень выше 60 дБ. Экранирование линий связи широтно-импульсной модуляции предлагается проводить по ОСТ 1 01025-82 [15]. Для этих целей может быть использовано устройство выравнивания опорного потенциала [16]. Для достижения требуемой эффективности экранирования могут быть применены методы оптимального проектирования [17].

3.1. Результаты исследования электромагнитной совместимости радиоприемников при влиянии эмиссии электромагнитных помех через антенно-фидерные тракты

Далее были рассчитаны электромагнитные помехи на нагрузке 50 Ом в антенно-фидерном тракте спутниковой навигационной системы и

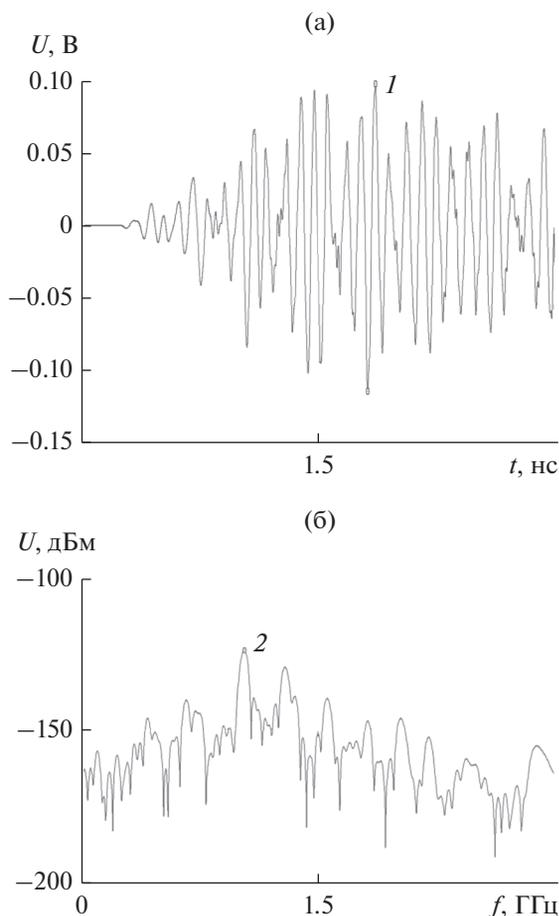


Рис. 7. Электромагнитная помеха в антенно-фидерном тракте спутниковой навигационной системы во временной области (а) и спектр плотности мощности (б); максимальные значения 0.09 (1) и -126 дБм (2).

радиолинии. Электромагнитная помеха в антенно-фидерном тракте спутниковой навигационной системы представлена на рис. 7.

Уровни электромагнитных помех в антенно-фидерном тракте спутниковой навигационной системы достигают значений по амплитуде в 0.21 В, а основная частота колебаний соответствует 1 ГГц. Уровень электромагнитной помехи в антенно-фидерном тракте на частоте работы радиоприемника составляет -137 дБм, уровень чувствительности радиоприемника -123 дБм. Следовательно, нарушения качества функционирования спутниковой навигационной системы в результате эмиссии электромагнитных помех не произойдет, также не произойдет блокирование работы приемника на частоте электромагнитной помехи (-123 дБм).

Электромагнитная помеха в антенно-фидерном тракте радиолинии представлена на рис. 8. Уровни электромагнитных помех в антенно-фидерном тракте радиолинии достигают значений по амплитуде в 0.06 В, основная частота колеба-

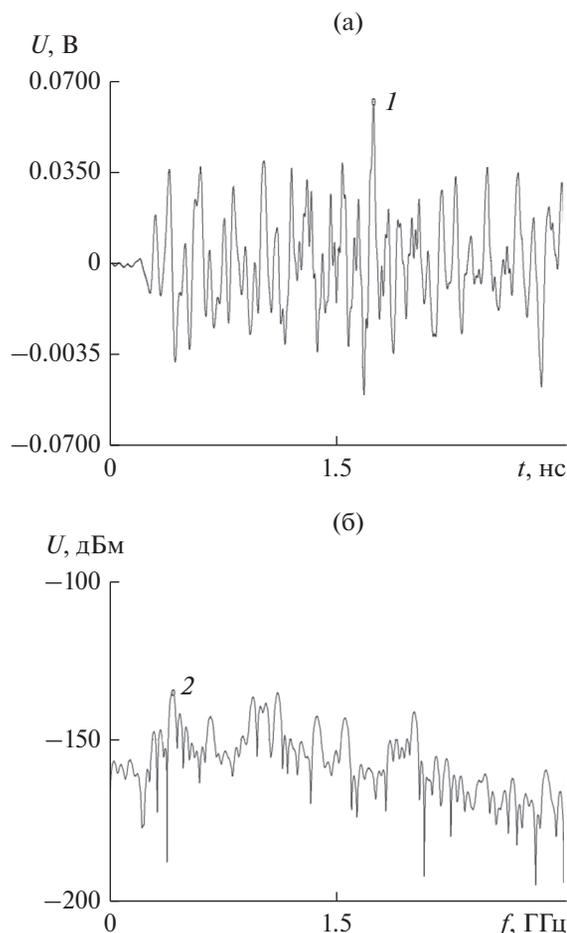


Рис. 8. Электромагнитная помеха в антенно-фидерном тракте радиолинии во временной области (а) и спектр плотности мощности (б); максимальные значения 0.06 (1) и -135 дБм (2).

ний составляет 0.4 ГГц. Уровень электромагнитной помехи в антенно-фидерном тракте на частоте работы радиоприемника составляет -164 дБм, уровень чувствительности радиоприемника составляет -90 дБм. Следовательно, нарушения качества функционирования радиолинии в результате эмиссии электромагнитных помех не произойдет. Также не произойдет блокирование работы приемника на частоте электромагнитной помехи (-135 дБм). Однако данные электромагнитные помехи необходимо учитывать при исследовании возникновения кумулятивных эффектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам работы можно сделать следующие основные выводы.

1. Предложен подход для исследования эмиссии электромагнитных помех от линий связи бортового оборудования БЛ-аппарата.

2. Разработаны имитационные модели БЛ-аппарата и его элементов, которые позволяют прогнозировать электромагнитную обстановку во внутрифюзеляжном пространстве и электромагнитные помехи в антенно-фидерных трактах при эмиссии электромагнитных помех от линий связи. При этом детально учитываются геометрические, конструкционные и электрофизические параметры БЛ-аппарате (расположение блоков электронного оборудования в БЛ-аппарате; параметры материала корпуса БЛ-аппарата, параметры кабелей и геометрия их прокладки).

3. Исследования электромагнитной обстановки во внутрифюзеляжном пространстве БЛ-аппарата при эмиссии электромагнитных помех показывают, что прогнозируемые уровни напряженности электромагнитного поля могут достигать 161 В/м. Сопоставление данных уровней с требованиями нормативных документов показывает, что ЭМС бортового оборудования БЛ-аппарата обеспечена не будет. Следовательно, необходимо применение конструкционных методов обеспечения ЭМС.

4. Уровни электромагнитных помех в антенно-фидерных трактах достигают значений по амплитуде: для радиолинии 0.06 В, а основная частота колебаний составляет 0.4 ГГц; для спутниковой навигационной системы 0.21 В, при частоте 1 ГГц. Данные значения электромагнитных помех в антенно-фидерных трактах радиолинии и спутниковой навигационной системы показывают отсутствие влияния эмиссии электромагнитных помех. Однако данные электромагнитные помехи необходимо учитывать при исследовании влияний радиопередатчиков на радиоприемники радиоэлектронных средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балюк Н.В., Болдырев В.Г., Булеков В.П. и др. Электромагнитная совместимость технических средств подвижных объектов. М.: Изд-во МАИ, 2004.
2. Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф. // Изв. вузов. Авиационная техника. 2016. Т. 59. № 4. С. 155.
3. Dawson J.F. // Aerospace Electromagnetic Compatibility: Proc. 2016 ESA Workshop. 23–25 May 2016, Valencia. P. 1.
4. Кециев Л.Н., Лемешко Н.В. // Технологии электромагнитной совместимости. 2010. № 2. С. 3.
5. Кириллов В.Ю., Марченко М.В., Томилин М.М. Электромагнитная совместимость бортовой кабельной сети летательных аппаратов. М.: Изд-во МАИ, 2014.
6. Чермошенцев С.Ф. Информационные технологии электромагнитной совместимости электронных средств. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2000.
7. Paul C.R. Analysis of Multiconductor Transmission Lines. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
8. Sorensen M., Hubing T.H., Jensen K. // Proc. 2016 IEEE Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility, Ottawa, 25–29 July 2019. P. 36.
9. Baklezos A.T. // IEEE Trans. 2016. V. EC-58. № 6. P. 1694.
10. Su C., Ke H., Hubing T. // Proc. of the 25th International Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, March 8–12, 2009, Monterey, California, USA. P. 736.
11. Chermoshentsev S.F., Gaynutdinov R.R. // Proc. 2015 XVIII Intern. Conf. on Soft Computing and Measurements (SCM), St. Petersburg, 2015. P. 90.
12. Гайнутдинов Р.Р. // Вестник Казан. гос. тех. ун-та им. А.Н. Туполева. 2012. № 3. С. 132–137.
13. Artemiev I.V., Gaynutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. // Proc. 2018 19th Intern. Conf. of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Erlagol, 2018.
14. Кециев Л.Н., Балюк Н.В. Зарубежные военные стандарты в области ЭМС. М.: Грифон, 2014.
15. ОСТ 1 01025-82 Экранирование проводов, жгутов, кабелей и металлизация самолетов (вертолетов). Общие технические требования. 24 с. <https://pdf.standartgost.ru/catalog/Data2/1/4293834/4293834470.pdf>
16. Чермошенцев С.Ф., Гайнутдинов Р.Р. Устройство выравнивания опорного потенциала (варианты). Пат. РФ № 2583101. Оpubл. 10.05.2016.
17. Gaynutdinov R.R., Suzdaltsev I.V. // Proc. 2019 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2019. Sochi, 2019.