

Экспериментальные исследования электромагнитных помех в линиях связи летательного аппарата при влиянии излучений антенн радиопередатчиков

Р.Р. ГАЙНУТДИНОВ,
канд. техн. наук,
С.Ф. ЧЕРМОШЕНЦЕВ,
д-р техн. наук
(КНИТУ-КАИ, Казань)
emc-kai@mail.ru

Проводятся экспериментальные исследования влияния электромагнитных излучений антенн радиопередатчиков на бортовое оборудование летательного аппарата. В качестве основных приемников электромагнитных помех рассматриваются интерфейсные линии связи. Разработан экспериментальный стенд для исследования электромагнитных помех в линиях связи при влиянии излучений антенн радиопередатчиков. Рассматривается беспилотный летательный аппарат с фюзеляжем и оперением, изготовленным из композитного материала.

Электромагнитная совместимость, экспериментальный стенд, электромагнитная помеха, композитный фюзеляж, летательный аппарат

Тенденция развития авиационных комплексов, в первую очередь пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов (БЛА), предполагает уменьшение их массы, увеличение полезной нагрузки, экономичности, расширение функциональности применения. Уменьшение массы и увеличение полезной нагрузки БЛА достигается использованием в конструкции фюзеляжей летательного аппарата композитных материалов. Композитные материалы имеют низкую и частотно зависимую электрическую проводимость. Расширение функционального применения связано с интеграцией в летательный аппарат различных типов бортовых радиоэлектронных, электронных и электротехнических систем. Отметим, что к качеству функционирования БЛА представляются такие же жесткие требования, как и к пилотируемым летательным аппаратам [1, 2].

Основным критерием, определяющим надежность, качество функционирования и функциональную безопасность авиационных комплексов, является электромагнитная совместимость.

Под электромагнитной совместимостью летательного аппарата понимается его функционирование в соответствии с требуемыми техническими характеристиками в реальной электромагнитной обстановке, обусловленной электромагнитным взаимодействием его бортового оборудования и внешнего электромагнитного воздействия [3, 4]. Внутрисистемная электромагнитная совместимость летательного аппарата ограничивается электромагнитным взаимодействием источников и рецепторов помех в рамках одного объекта.

Применение композитных материалов в конструкции фюзеляжей летательных аппаратов неэффективно с точки зрения обеспечения его электромагнитной совместимости, так как вследствие плохой способности экранирования композитных материалов ухудшаются электромагнитные характеристики. Из-за отсутствия должного экранирования не обеспечивается первоначальная защита бортового оборудования летательного аппарата от внешнего электромагнитного воздействия и внутрисистемного взаимодействия, при этом невозможно использовать фюзеляж для обеспечения металлизации бортового оборудования [5, 6].

Расширение функционального применения бортового оборудования усложняет электромагнитную обстановку во внутрифюзеляжном пространстве БЛА, что уменьшает устойчивость бортового оборудования к электромагнитным воздействиям и внутрисистемным конфликтам. Также сохраняется тенденция уменьшения уровней информационных сигналов и питающих напряжений элементной базы (микропроцессоры, микроконтроллеры и микроЭВМ), из-за чего снижается электромагнитная совместимость технических систем.

Типовой состав бортового оборудования летательного аппарата представлен на рис. 1 [7–9].

Отметим, что именно электромагнитная совместимость во многом определяет тактико-технические характеристики оборудования летательного аппарата. Из-за некачественного исследования электромагнитной совместимости летательного аппарата на ранних стадиях разработки невозможно добиться тре-

буемых технических характеристик реального объекта, а также обеспечить соблюдение требований нормативных документов.

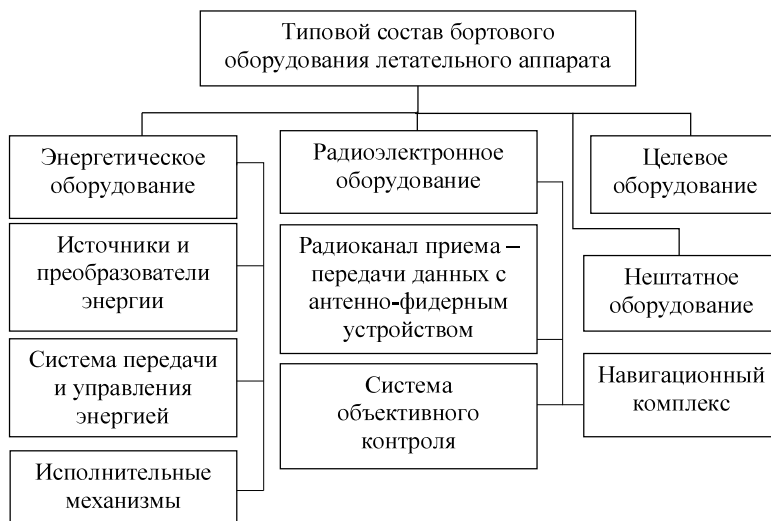


Рис. 1

Проблема обеспечения внутрисистемной электромагнитной совместимости летательного аппарата, фюзеляж и оперение которого изготовлены из композитного материала, недостаточно полно исследуется в работах зарубежных и российских авторов. В свою очередь, проблема влияния электромагнитных излучений антенн радиопередатчиков обусловлена изготовлением фюзеляжа летательного аппарата из композитного материала и установкой радиоэлектронного оборудования различного назначения. Так, электромагнитные излучения антенн радиопередатчиков во внутрифюзеляжном пространстве летательного аппарата создают сложную электромагнитную обстановку, в связи с чем может нарушиться функционирование бортового оборудования [9, 10].

Целью данной работы является разработка экспериментального стенда для исследования электромагнитной совместимости летательного аппарата. Проведены исследования электромагнитных помех в линиях связи БЛА при влиянии излучения антенны его радиопередатчика.

Исследуется БЛА, изготовленный из композитного материала. Предметом исследования являются электромагнитные помехи в линиях связи БЛА.

Проведение измерений электромагнитных помех в линиях связи малых летательных аппаратов при излучении антенн его радиопередатчиков существенно затруднено. Например, в исследуемых линиях связи наблюдаются электромагнитные помехи различных типов с взаимным их преобразованием. Существуют электромагнитные помехи, возникающие от воздействия других внешних источников (например, коммутационные процессы в оборудовании). Щупы измерительных приборов искажают истинную картину электромагнитного поля при воздействии мощных электромагнитных импульсов, вследствие чего возникают дополнительные наводки или шумы на экране осциллографа.

Разработанный экспериментальный стенд для исследования электромагнитных помех в линиях связи при излучении антенн радиопередатчиков позволяет оценить уровень и форму электромагнитных помех, сделать выводы о возможности нарушения функционирования бортового оборудования, провести сопоставительный анализ результатов экспериментальных исследований и компьютерного моделирования.

Схема экспериментального стенда приведена на рис. 2. Здесь: 1 – безэховая экранированная камера; 2 – измерительный прибор (цифровой осциллограф с полосой пропускания 1 ГГц, частота дискретизации – 10 ГГц); 3 – генератор гармонических сигналов (R&S SMA 100); 4 – коаксиальная линия для измерения параметров электромагнитных помех; 5 – коаксиальная линия для подачи сигнала на антенну радиопередатчика; 6 – беспилотный летательный аппарат; 7 – антенна радиопередатчика; 8 – монтажная печатная плата.

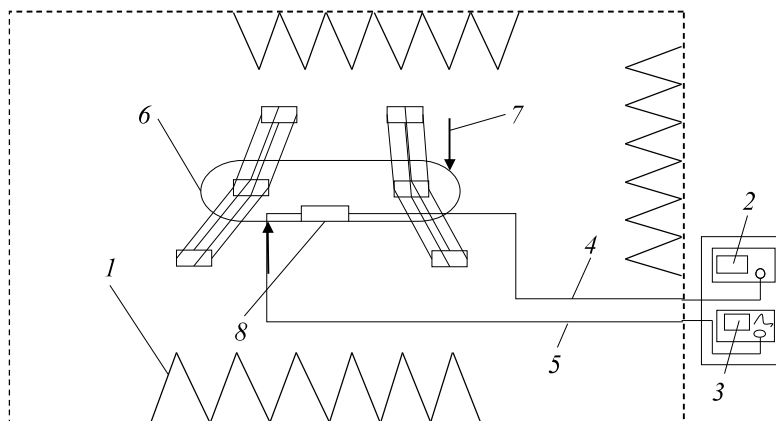


Рис. 2

При анализе электромагнитных помех в линиях связи летательного аппарата для каждого случая проводится не менее десяти измерений, в результате отсеиваются явно аномальные значения, а итоговое значение выбирается как среднее от измеренных.

В работе рассматривается летательный аппарат типа конвертоплан со следующими параметрами: длина – 1100 мм, размах крыльев – 1000 мм, ширина и высота фюзеляжа – 200 мм, тип материала фюзеляжа – слоистый композит (углепластик), толщина материала – 5 мм. Антенна радиоэлектронного средства – радиомодема – представлена четвертьволновым вибратором и расположена в хвостовой части фюзеляжа (диапазон рабочих частот – 400 МГц, выходная мощность передатчика не более 2 Вт) (рис. 3).

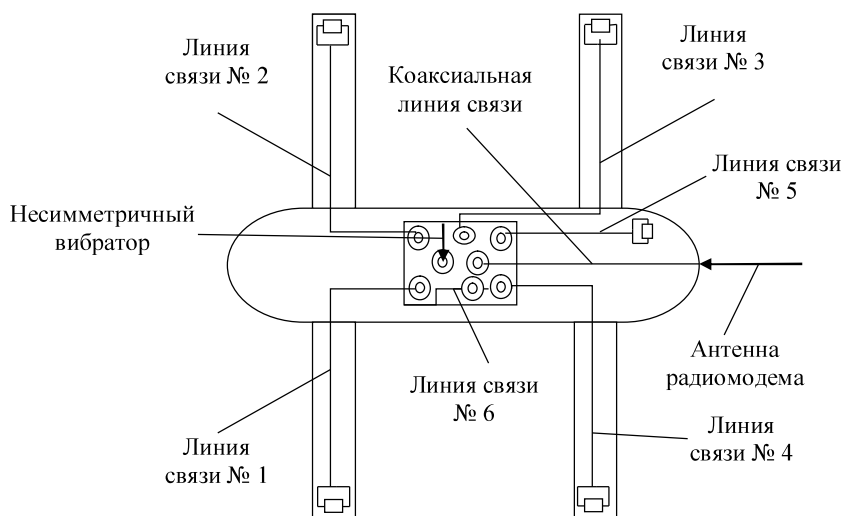


Рис. 3

Для анализа электромагнитных помех разработан макет тестовой печатной платы с размерами 50×90 мм. Тестовая печатная плата представляет собой двухсторонний фольгированный стеклотекстолит, имитирует плату управления БЛА. В печатную плату встроены разъемы типа BNC. К контактам разъема с одной стороны подсоединяется линия связи, с другой – коаксиальная измерительная линия. Рассматриваются типовые линии связи – двухпроводные, микрополосковые.

Электромагнитные помехи измеряются в шести линиях связи:

- линия связи № 1 (представлена двухпроводной линией связи, соединяющей плату управления и сервопривод в левом переднем крыле);
- линия связи № 2 (представлена двухпроводной линией связи, соединяющей плату управления и сервопривод в правом переднем крыле);

- линия связи № 3 (представлена двухпроводной линией связи, соединяющей плату управления и сервопривод в левом заднем крыле);
- линия связи № 4 (представлена двухпроводной линией связи, соединяющей плату управления и сервопривод в правом заднем крыле);
- линия связи № 5 (представлена витой парой и имитирует линию связи интерфейса, соединяет плату управления и оборудование в носовой части БЛА);
- линия связи № 6 (представлена микрополосковой линией связи (длина – 178 мм) на макетной печатной плате).

Сервоприводы имитируются эквивалентной нагрузкой, роль которой выполняет резистор (50 Ом), таким же образом микрополосковая линия нагружена на резистор (50 Ом). В случае с витой парой эквивалентную нагрузку выполняют два последовательно соединенных резистора по 50 Ом. Дипольная излучающая антенна, расположенная в хвостовой части летательного аппарата, соединяется с тестовой монтажной платой посредством коаксиальной линии связи.

Максимальное значение электромагнитных помех наблюдается в контурах, образованных линиями связи № 3, 4, соединяющими плату управления и сервоприводы, расположенные в хвостовой части летательного аппарата. Уровень электромагнитных помех в линии связи № 3 составляет 330 мВ, в линии связи № 4 – 397 мВ.

Осциллограмма максимального уровня электромагнитной помехи представлена на рис. 4, а, спектр плотности электромагнитных помех – на рис. 4, б.

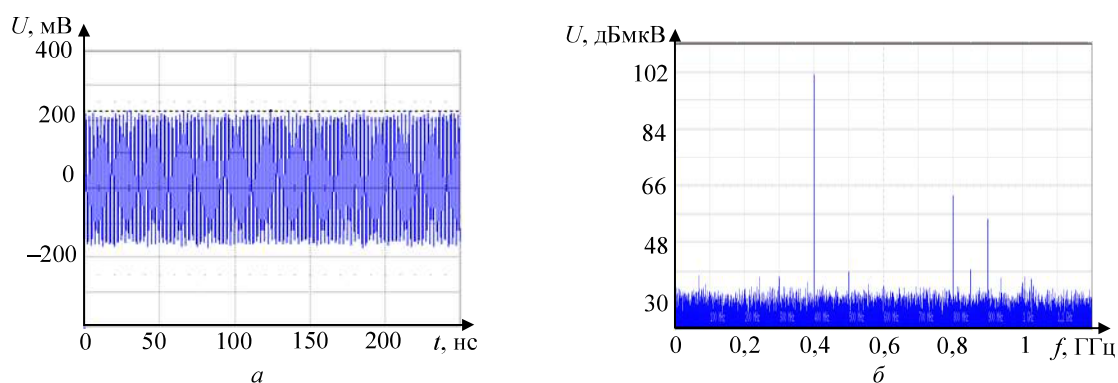


Рис. 4

Значения электромагнитных помех в контурах, образованных линиями связи № 1, 2, соединяющими плату управления и сервоприводы, расположенные в носовой части, существенно ниже. Уровень электромагнитных помех в линии связи № 1 составляет 56 мВ, в линии связи № 2 – 110 мВ.

Осциллограмма максимального уровня электромагнитной помехи представлена на рис. 5, а, спектр плотности электромагнитных помех – на рис. 5, б.

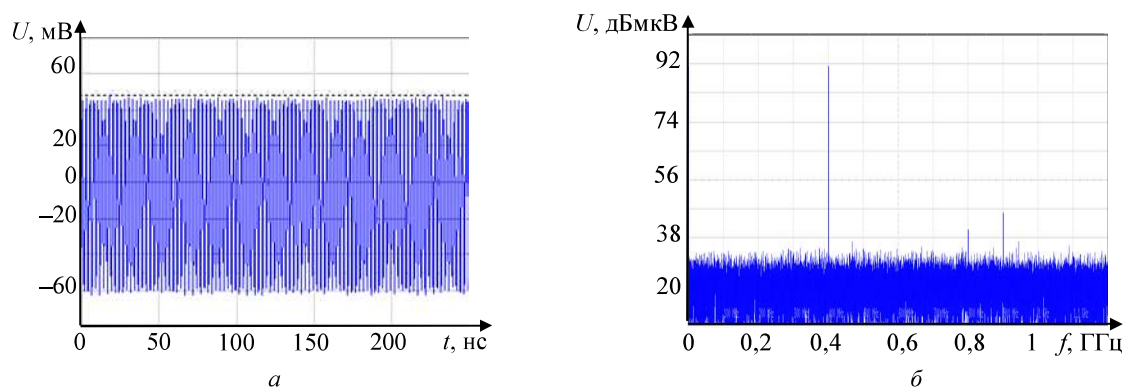


Рис. 5

Уровень электромагнитной помехи в контуре, образованном линией связи № 5, соединяющей плату управления и оборудование в носовой части БЛА, составляет 358 мВ.

Осциллограмма электромагнитной помехи представлена на рис. 6, а, спектр плотности электромагнитной помехи – на рис. 6, б.

Уровень электромагнитной помехи в контуре, образованном микрополосковой линией связи на макетной печатной плате (линия связи № 6), составляет 28,8 мВ.

Осциллограмма электромагнитной помехи представлена на рис. 7, а, спектр плотности электромагнитной помехи – на рис. 7, б.

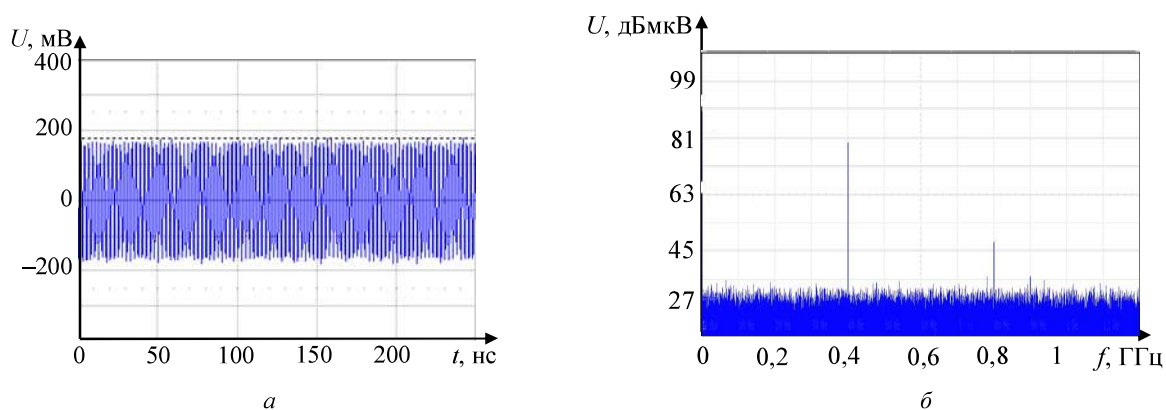


Рис. 6

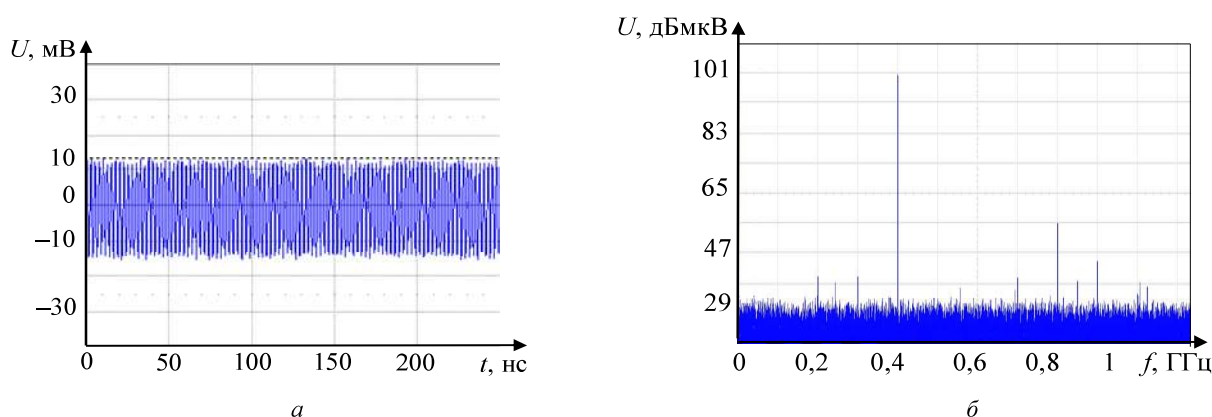


Рис. 7

В соответствии с требованиями нормативных документов [11] допустимые уровни электромагнитных помех в интерфейсных линиях связи и сети электропитания не должны превышать 11,22 мВ в диапазоне частот $10 \cdot 10^{-6} \dots 1$ ГГц [10–12]. При сравнении измеренных уровней электромагнитных помех и уровней, соответствующих требованиям нормативных документов, возникающие электромагнитные помехи (397 мВ) превышают допустимые, из-за чего ухудшится качество функционирования бортового оборудования. Для устранения данных недостатков необходимо применить организационные и технические методы обеспечения электромагнитной совместимости БЛА.

Для уменьшения уровня электромагнитных помех на летательном аппарате целесообразно применение конструктивных методов обеспечения электромагнитной совместимости, в частности экранирование. Прокладку линий связи можно выполнить с применением металлических кабель-каналов. Также возможно экранирование фюзеляжа (например, металлической сеткой или тканью). Для уменьшения уровней электромагнитных помех можно использовать полосовые фильтры и методы оптимального конструирования [13, 14].

Таким образом, разработан экспериментальный стенд и получены результаты экспериментальных исследований электромагнитных помех в линиях связи летательного аппарата при влиянии излучений антенны радиопередатчика.

Результаты исследования могут применяться на практике, позволяют оценить специфику электромагнитных взаимодействий при функционировании бортового оборудования летательного аппарата, в частности, при электромагнитном излучении антенн его радиопередатчиков. Результаты исследований также могут использоваться при сопоставительном анализе для подтверждения расчетных методов исследования.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балюк Н.В. и др. Электромагнитная совместимость технических средств подвижных объектов. М.: МАИ, 2004. 647 с.
2. Gaynutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Study Radiation from Radio Transmitters Antennas Influence on the UAV Onboard Equipment // Proc. of the International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, Oct. 1–25, 2019, Ufa, Russia. P. 1–4.
3. Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф. Методология обеспечения внутрисистемной электромагнитной совместимости бортового оборудования беспилотных летательных аппаратов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2016. № 4. С. 155–160.
4. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. М.: Радио и связь, 1987. 256 с.
5. Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф. Электромагнитная совместимость перспективных авиационных комплексов // Технологии электромагнитной совместимости. 2018. № 2 (65). С. 62–78.
6. Кириллов В.Ю., Марченко М.В., Томилиן М.М. Электромагнитная совместимость бортовой кабельной сети летательных аппаратов. М.: МАИ, 2014. 172 с.
7. Wang Bingqie, Quan Limin, Su Donglin. Measurement of Isolation between Antennas Mounted on Aircraft // Proc. of the International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, Aug. 16–17, 2007, Hangzhou, China. P. 1311–1314.
8. Guo Dandan et al. The Complex Network Model of the Airborne Equipment Electromagnetic Compatibility // Proc. of the 9th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, Nov. 29 – Dec. 2, 2010, Guangzhou, China. P. 1019–1022.
9. Седелников Ю.Е. и др. Антенные системы радиосредств перспективных БЛА: проблемы и направления решения // Изв. вузов. Авиационная техника. 2015. № 2. С. 81–86.
10. Кечиев Л.Н., Балюк Н.В. Зарубежные военные стандарты в области ЭМС. М.: Грифон, 2014. 447 с.
11. MIL-STD-461G. Department of Defense Interface Standard. Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment [Electronical Resource]. URL: <https://www.esdguns.com/img/cms/PDF/mil-std-461g-standard-for-electromagnetic-interference-control.pdf> (дата обращения: 15.10.2024).
12. Gaynutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Virtual Testing of Electronic Systems by Electromagnetic Compatibility Requirements // Proc. of the 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering, Oct. 2–6, 2018, Novosibirsk, Russia. P. 320–323.
13. Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф. Размещение бортового оборудования в пространстве фюзеляжа беспилотного летательного аппарата с применением генетического алгоритма // Моделирование, оптимизация и информационные технологии [Электронный журнал]. 2024. № 1 (44). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1484> (дата обращения: 15.10.2024).
14. Амирханов А.А., Гайнутдинов Р.Р. Трассировка кабелей в технических объектах с учетом критерия электромагнитной совместимости // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2024. № 1. С. 79–86.

Поступила в редакцию 15.11.24

После доработки 10.12.24

Принята к публикации 15.12.24

Experimental Studies of Electromagnetic Interference in Aircraft Communication Lines on Exposure to Radiation from Radio Transmitter Antennas

R.R. GAINUTDINOV AND S.F. CHERMOSHENTSEV

Tupolev Kazan National Research Technical University, Kazan

In this paper, experimental studies on exposure to electromagnetic radiation of radio transmitter antennas on an aircraft onboard equipment are described. Interface communication lines are considered as the main receivers of electromagnetic interference. An experimental test bench has been developed to study the electromagnetic interference in communication lines on exposure to radiation from radio transmitter antennas. An unmanned aerial vehicle with a fuselage and empennage made of composite material is considered.

Electromagnetic compatibility, experimental test bench, electromagnetic interference, composite fuselage, aircraft