

Труды МАИ. 2025. № 140
Trudy MAI. 2025. No. 140. (In Russ.)

Научная статья

УДК 658.512.2

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184068>

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ ГЕНЕРАТОРА НА СИСТЕМУ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рустам Рафкатович Гайнутдинов^{1✉}, Сергей Федорович Чермошенцев²

^{1,2}Казанский национальный исследовательский технический университет

им. А.Н. Туполева,

Казань, Российская Федерация

¹emc-kai@mail.ru✉

²sapr@kai.ru

Аннотация. Проведены исследования внутрисистемных электромагнитных взаимодействий при эмиссии электромагнитных помех, обусловленных излучениями от силовых линий связи генератора. Предложен подход на основе электродинамического моделирования к прогнозированию эмиссии электромагнитных помех и схемотехнического моделирования для оценки уровней электромагнитных помех в информационных линиях связи при влиянии силовых линий связи генератора. Рассмотрен практический пример прогнозирования электромагнитной обстановки во внутреннем пространстве мотогондолы летательного аппарата, изготовленного из композитного материала при эмиссии

электромагнитных помех от силовых линий связи генератора и влияние данных помех на систему управления двигателем через информационные линии связи, расположенные во внутреннем пространстве мотогондолы.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, электромагнитная совместимость, электромагнитная помеха, летательный аппарат, композитный фюзеляж

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

Для цитирования: Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф. Исследование влияния силовых линий связи генератора на систему управления двигателем летательного аппарата на основе компьютерного моделирования // Труды МАИ. 2025. № 140. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184068>

Original article

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF GENERATOR POWER LINES ON THE ENGINE CONTROL SYSTEM OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE BASED ON COMPUTER SIMULATION

Rustam R. Gaynutdinov^{1✉}, Sergey F. Chermoshentsev²

^{1,2}Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev,
Kazan, Russian Federation

¹emc-kai@mail.ru✉

²sapr@kai.ru

Abstract. In this paper, studies of intra-system electromagnetic interactions in the emission of electromagnetic interference caused by radiation from the power lines of the generator are carried out. An approach based on electrodynamic modeling to predict the emission of electromagnetic interference and circuit modeling to assess the levels of electromagnetic interference in information communication lines under the influence of generator power lines is proposed. A practical example of predicting the electromagnetic situation in the internal space of the engine nacelle of an unmanned aerial vehicle made of composite material during the emission of electromagnetic interference from the generator power lines and the effect of these interference on the engine control system through information communication lines located in the internal space of the engine nacelle is considered. The results of the study show that electromagnetic interference (maximum values) in the communication lines of the engine control system reach levels up to 13.6 V, and the frequency of electromagnetic interference oscillations is 400 Hz. These levels of electromagnetic interference can lead to a violation of the quality of the engine control system. Comparison of the maximum level of magnetic field strength (110 A/m) with the requirements for on-board equipment in accordance with the regulatory document KT-160D (clause 19.3.3) shows that on-board equipment that meets the requirements of "class CC" will be able to function properly in the electromagnetic environment of the aircraft nacelle with emissions from the generator power communication lines. The method of forecasting the electromagnetic environment caused by electromagnetic fields from the aircraft power

supply system can be an integral part of the methods for designing the aircraft power supply system and for tracing communication lines taking into account EMC requirements. High currents from the generator make the aircraft power supply network a source of a low-frequency magnetic field, which is radiated by the circuits formed by the conductors of the power supply system. An important step in reducing low-frequency magnetic fields is to reduce the areas of current circuits by rationally organizing the grounding system and equalizing the reference potential.

Keywords: computer modeling, electromagnetic compatibility, electromagnetic interference, aircraft, composite fuselage

Funding: The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement No. 075-03-2023-032 of 16.01.2023)

For citation: Gaynutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Investigation of the influence of generator power lines on the engine control system of an unmanned aerial vehicle based on computer simulation. *Trudy MAI*. 2025. No. 140. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=184068>

Введение

В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция к применению в конструкциях летательных аппаратов композитных материалов. Применение композитных материалов улучшает аэродинамические и массогабаритные характеристики летательных аппаратов (ЛА), однако улучшая одни характеристики

неуклонно ухудшаются другие, и, в первую очередь, электромагнитные, что обусловлено анизотропностью данного вида материалов. Ухудшение электромагнитных характеристик ведет к острой актуализации вопросов обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) ЛА. Под ЭМС ЛА понимается, его функционирование в соответствии с требуемыми техническими характеристиками при электромагнитных взаимодействиях его бортового оборудования в реальной электромагнитной обстановке (обусловленной электромагнитными взаимодействиями и воздействиями). Внутрисистемная ЭМС ЛА ограничивается электромагнитными взаимодействиями бортового оборудования ЛА [1-5]. Понятие ЭМС, в первую очередь, определяет надежность, функциональную безопасность и качество функционирования ЛА.

Увеличение количества и разнообразия потребителей электроэнергии на борту ЛА ужесточает требования к качеству электроэнергии, которые регламентируются стандартами: ГОСТ Р 54073-2010 «Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии» [6] и MIL-STD-704 «Aircraft electric power characteristics» [7]. Одним из факторов, оказывающих существенное влияние на качество электроэнергии в системе электроснабжения ЛА, являются кондуктивные помехи различного происхождения. Требования к качеству электроэнергии, установленные стандартами, таким образом, являются обобщённым показателем «допустимых уровней электромагнитных помех в системе электроснабжения ЛА». Именно от качества электроэнергии зависят параметры

эмиссии электромагнитных помех от силовых линий системы электроснабжения ЛА [8, 9].

При функционировании системы электроснабжения ЛА на борту наблюдается сложная электромагнитная обстановка, а проложенные рядом информационные линии связи бортового оборудования являются хорошими рецепторами электромагнитных помех. Так функционирование силовых линий связи приводит к образованию электромагнитных помех в информационных линиях связи, а последние обуславливают нарушение качества функционирования бортового оборудования.

Одним из актуальных вопросов в обеспечении внутрисистемной ЭМС ЛА является исследование излучения электромагнитных помех от силовых линий связи генератора и оценка их влияния на информационные линии связи. Электромагнитное излучение от источника помехи - явление, процесс при котором электромагнитная энергия излучается источником помехи в пространство в виде электромагнитных волн. Большой вклад в решение вопросов внутрисистемной ЭМС ЛА внесли российские учёные и специалисты [1, 4, 10], а среди зарубежных авторов следует отметить работы [11, 12, 13]. Анализируя данные публикации, можно сделать вывод о недостаточности исследований именно в области эмиссии электромагнитных помех от силовых линий связи генератора и системы электроснабжения ЛА в целом. Вопросы внутрисистемных электромагнитных взаимовлияний между системами бортового оборудования при их функционировании, а, в частности, при взаимовлияниях информационных и силовых линий связи не нашли должного отражения в научно-технической литературе. Также отсутствуют подходы к

прогнозированию электромагнитной обстановки и электромагнитных помех в информационных линиях связи при влиянии электромагнитного поля, обусловленного излучением от силовых линий генератора, когда проект находится на ранних стадиях разработки в «Цифровом виде».

Целью данной работы является исследование электромагнитной обстановки в мотогондоле ЛА при эмиссии от силовых линий связи генератора и их влияние на систему управления двигателем на основе компьютерного моделирования.

Методы исследования и средства для моделирования электромагнитной обстановки и электромагнитных помех

Проведение исследований и оценка ЭМС бортового оборудования ЛА при электромагнитных воздействиях и взаимодействиях может выполняться по трем уровням детальности [5, 14]. В данной работе рассматривается первый и второй уровень детальности исследований. На первом уровне детальности проводятся исследования электромагнитной обстановки во внутрифюзеляжном пространстве мотогондолы ЛА, далее значения напряженности электромагнитного поля сопоставляются с уровнями восприимчивости конкретного типа оборудования в соответствии с нормативно-техническими документами. Так электромагнитная обстановка во внутрифюзеляжном пространстве мотогондолы ЛА позволит сделать вывод о необходимости применения дополнительных мер защиты к оборудованию, размещенному в мотогондоле ЛА. На втором уровне детальности исследований рассчитываются электромагнитные помехи в интерфейсных линиях связи системы управления двигателем.

Исследование эмиссии от силовых линий связи генератора и оценка их влияния на информационные линии связи может быть проведена на основе аналитических расчетов, экспериментальных исследований и имитационного моделирования. Аналитические методики не позволяют учитывать множество факторов, влияющих на точность прогнозирования: параметры материала мотогондолы ЛА, компоновку оборудования и т.д. Экспериментальные исследования применимы лишь на поздних этапах разработки объекта. В данной работе прогнозирование электромагнитной обстановки на ЛА при эмиссии от силовых линий связи генератора и влиянии электромагнитных помех проводится с применением программ компьютерного моделирования методами комбинированного (электродинамического и схемотехнического) анализа [5, 15-17].

Для исследования и прогнозирования, влияния электромагнитных излучений от силовых линий связи генератора на систему управления двигателем, разработана имитационная модель мотогондолы ЛА, содержащая генератор, блоки бортового оборудования и линии связи. Электромагнитные помехи исследуются в 7 линиях связи системы управления двигателем соответственно с длинами: 0,8 м; 1,3 м; 1,6 м; 1,7 м; 2 м; 2,3 м; 2,4 м. На физическом уровне линии связи системы управления двигателем используют кабель КВСФ 75 (ТУ19-705.198-81). Силовая линия связи на физическом уровне представлена кабелем БПМО-25 и имеет длину 1 м. Детальность описания параметров модели позволяет учесть взаимные резонансные эффекты электромагнитных волн и обеспечивает адекватное распределение напряженности

электромагнитного поля. Графическое представление имитационной модели мотогондолы ЛА с блоками бортового оборудования представлено на рисунке 1.

При анализе электромагнитной обстановки в мотогондоле ЛА рассчитывается распределение напряженности электрического и магнитного поля. Напряжённость электрического и магнитного поля, создаваемая излучением от силовых линий генератора, рассчитывается в точках, представленных на рисунке 2. Принцип выбора точек обусловлен требованиями по оценке уровней электромагнитного поля в мотогондоле ЛА:

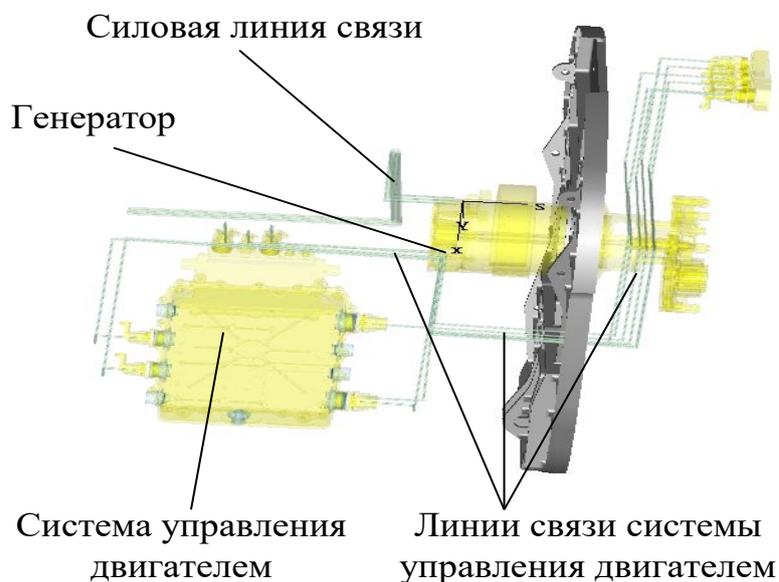


Рисунок 1 - Графическое представление имитационной модели мотогондолы ЛА с исследуемыми линиями связи

Для расчета электромагнитных помех в линиях связи применяется комбинированная модель объекта исследования (рисунок 3). Так вначале на основе применения электродинамических методов рассчитываются коэффициенты связи между силовой и информационными линиями связи, а затем на основе применения схемотехнических методов рассчитываются значения электромагнитных помех.

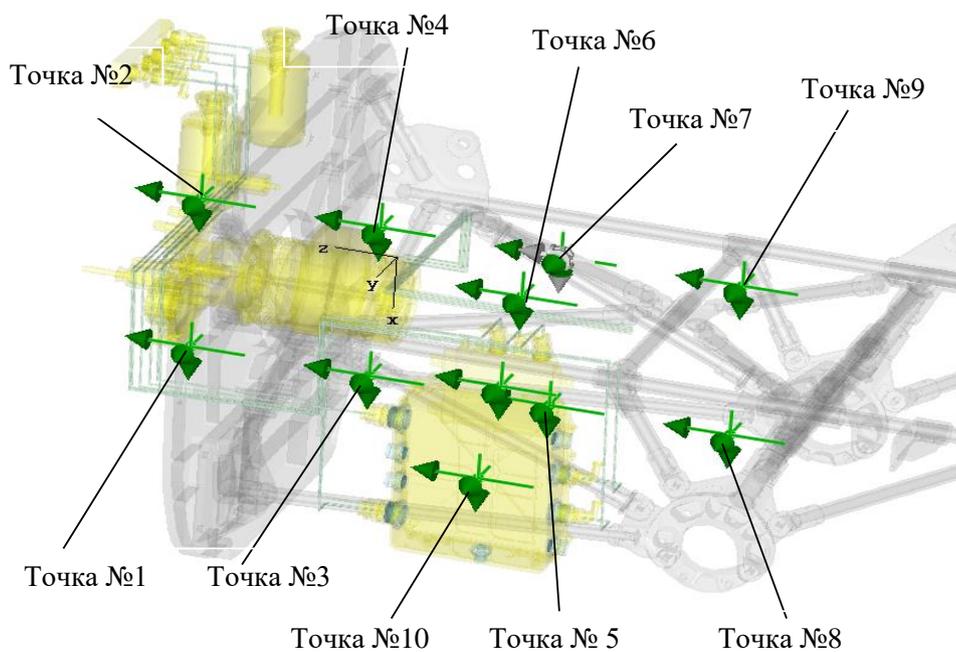


Рисунок 2 - Расположение точек расчета напряженности
электромагнитного поля в имитационной модели ЛА

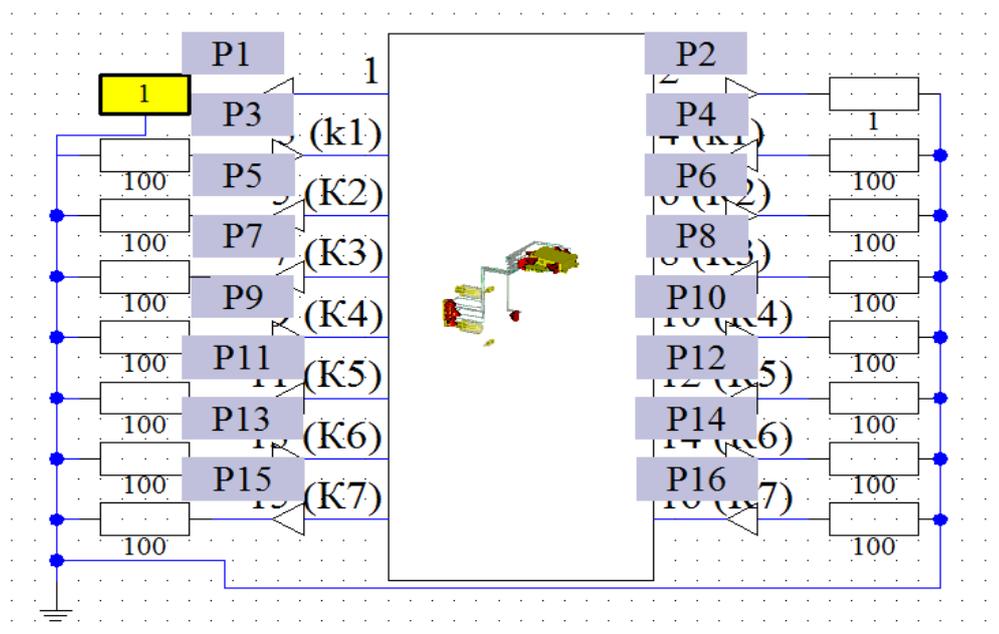


Рисунок 3 - Графическое представление комбинированной модели объекта
исследования для расчета электромагнитных помех

Уровень сигнала подаваемого на линию связи от генератора соответствует электрической мощности 40 кВт (частота 400 Гц).

При проведении моделирования эмиссии и влияния электромагнитных помех от силовых линий связи генератора на информационные линии связи системы управления двигателем учитываются геометрические и электрофизические параметры объекта исследования, а именно: расположение блоков системы управления в мотогандоле; параметры материалов; расположение блоков, их конструкционные и электрофизические параметры; наличие неоднородностей в блоке системы управления; геометрические и электрофизические параметры линий связи; топология прокладки линий связи в мотогандоле.

Результаты прогнозирования электромагнитной обстановки и электромагнитных помех

Результаты распределения электрического и магнитного поля по мотогандоле ЛА представлены на рисунке 4.

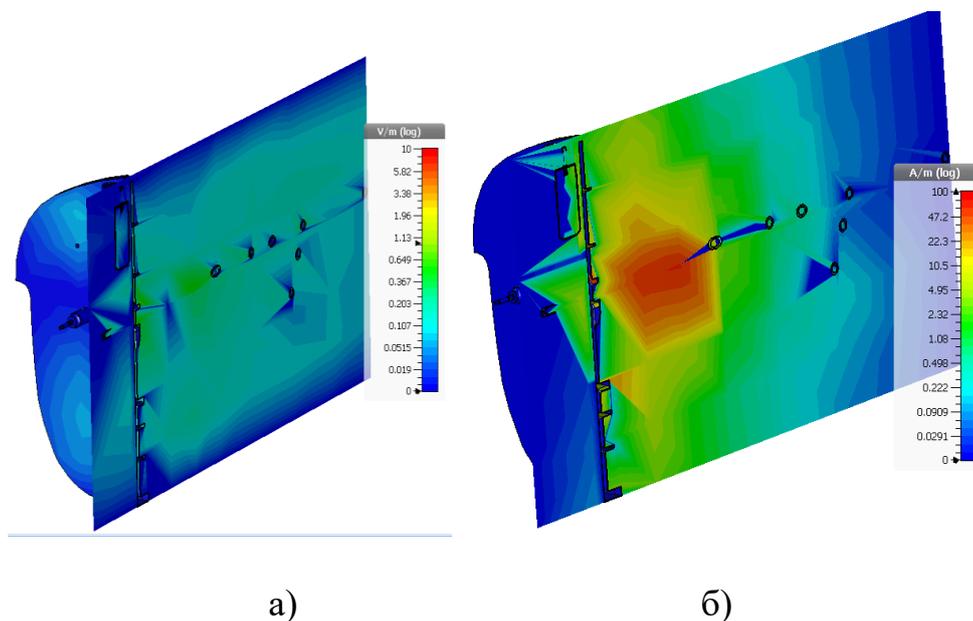


Рисунок 4 - Распределение электрического (а) и магнитного (б)

поля по мотогандоле ЛА

Значения напряженности электрического и магнитного поля, рассчитанные в соответствующих точках (см. рисунок 2) представлены на рисунке 5 и рисунке 6.

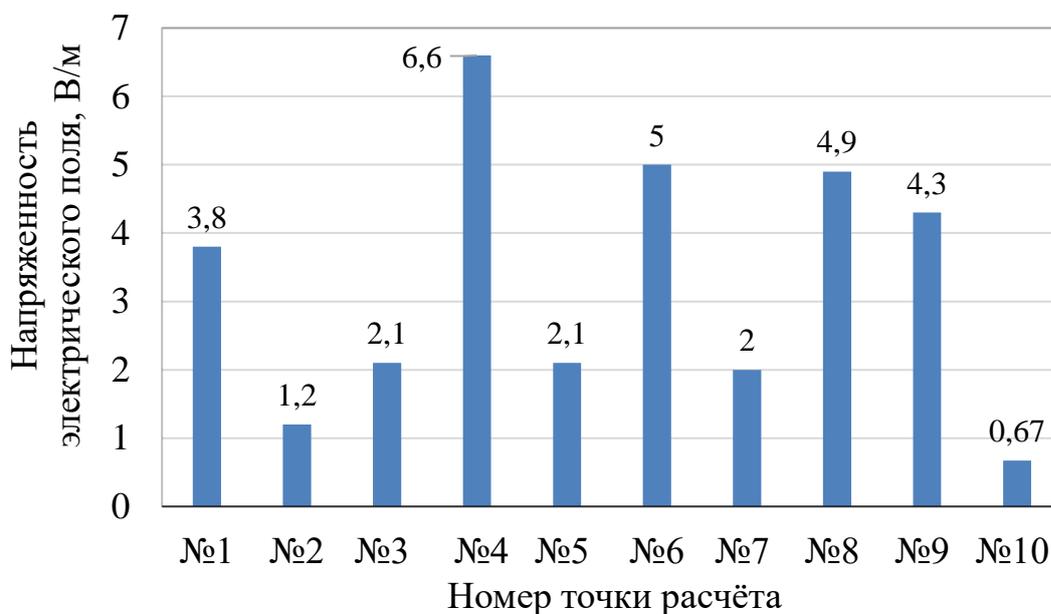


Рисунок 5 - Значения напряженности электрического поля в точках расчета

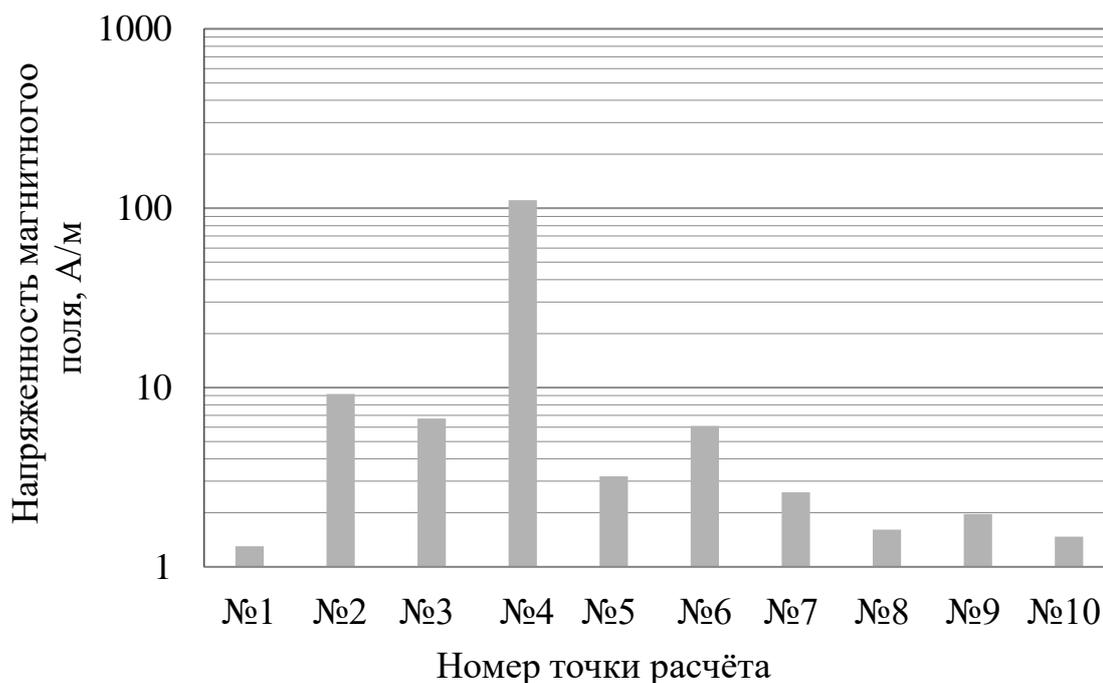


Рисунок 6 - Значения напряженности магнитного поля в точках расчета

Из результатов моделирования видно, что максимальная напряженность электромагнитного поля наблюдается в точке №4. Это обусловлено близостью точки расчёта № 4 к силовой линии связи. Для исследования интерес также представляют точки №5, №7, расположенные вблизи блоков бортового оборудования. Изменение уровня напряженности электрического и магнитного поля в точке № 4 по времени представлено на рисунке 7.

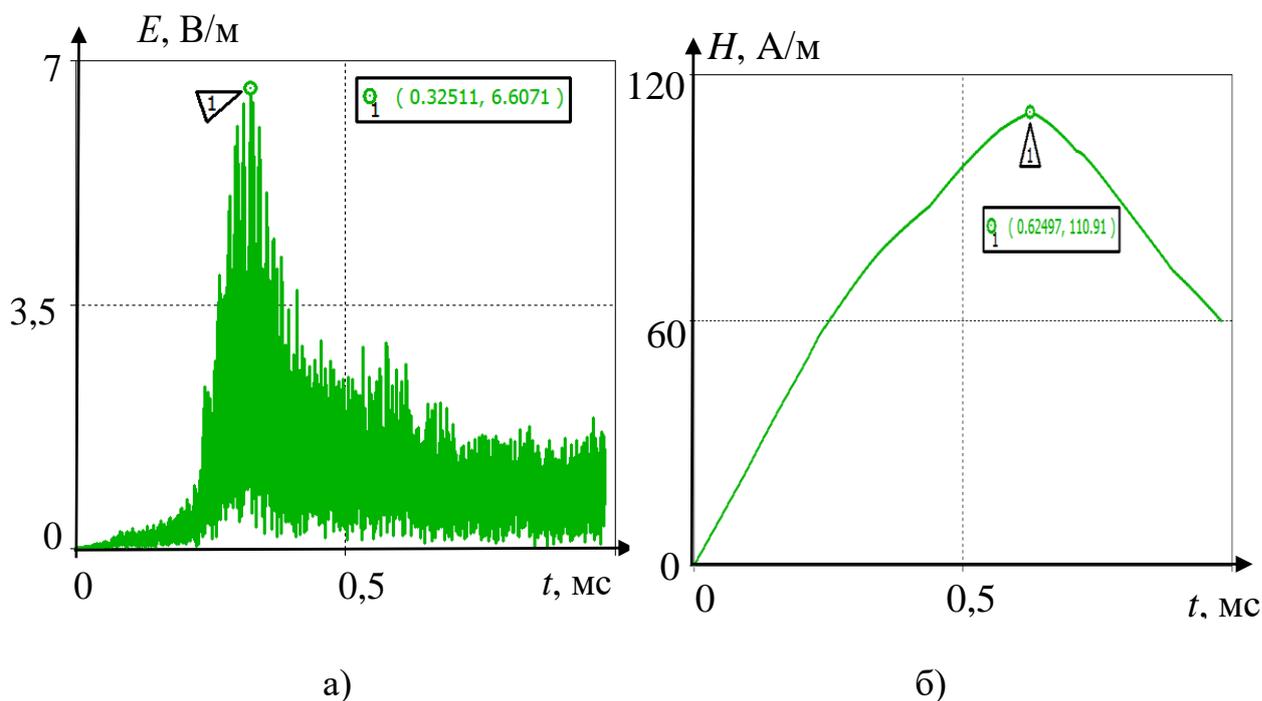


Рисунок 7 - Изменение напряжённости электрического (а) и магнитного (б) поля в точке № 4 во времени

Распределение электрического и магнитного поля по сечению блока системы управления двигателем представлено на рисунке 8.

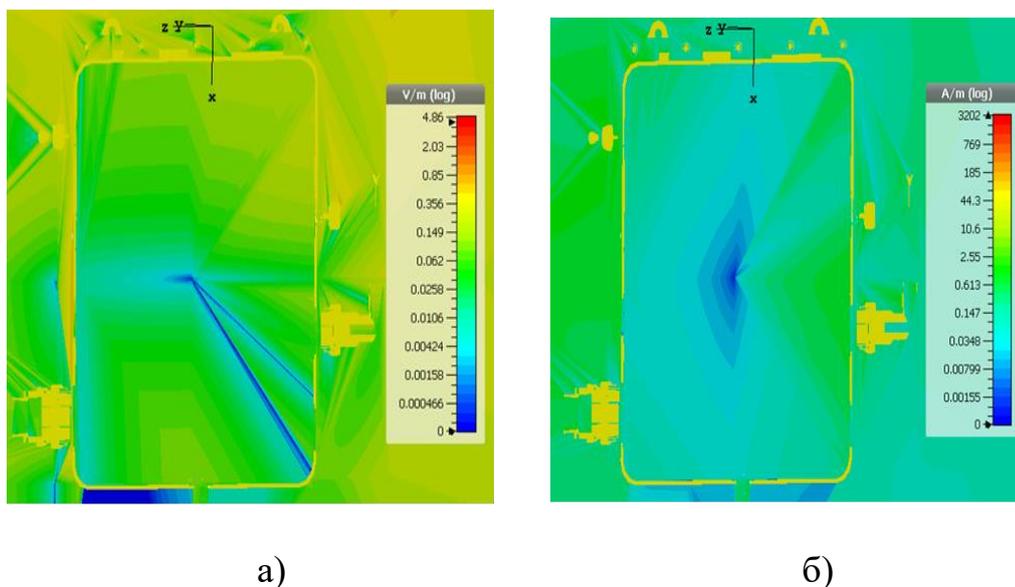


Рисунок 8 - Распределение напряженности электрического (а) и магнитного (б) поля по сечению блока системы управления двигателем

Значения амплитуд электромагнитных помех, рассчитанные в соответствующих точках линий связи представлены на рисунке 9.

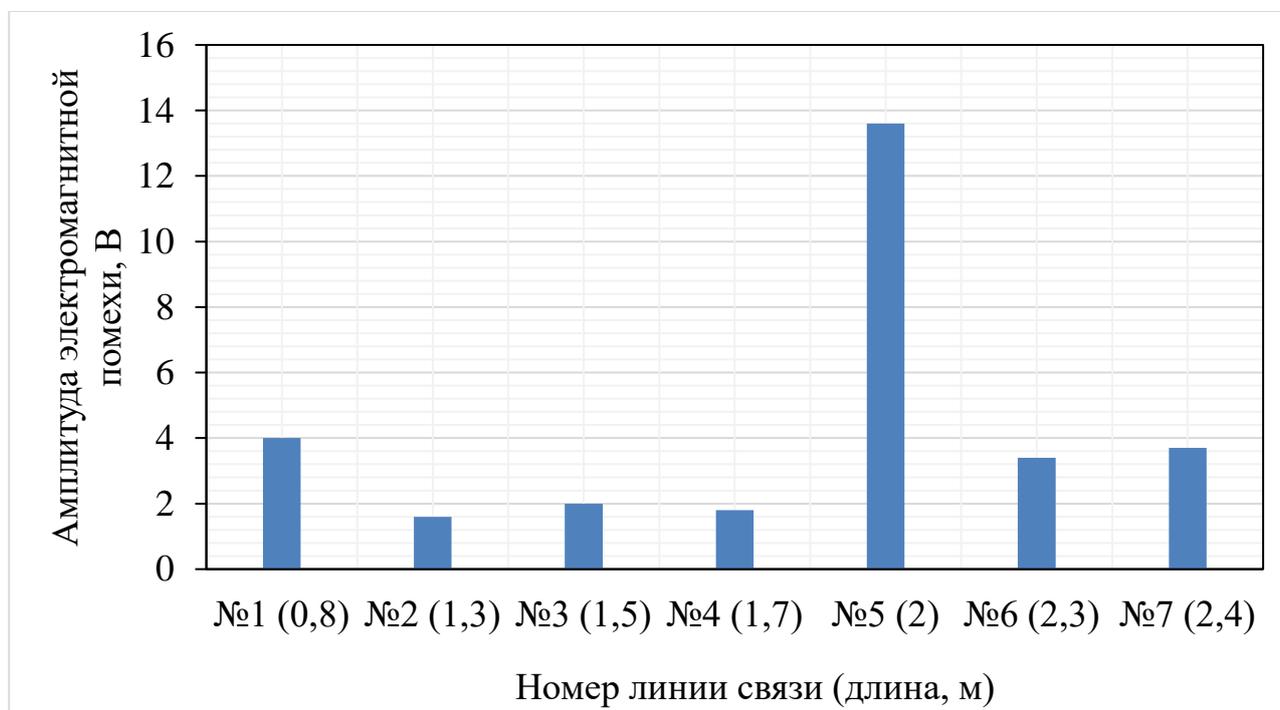


Рисунок 9 - Сводные значения амплитуд электромагнитных помех в информационных линиях связи

Электромагнитная помеха в линии связи системы управления двигателем (точка № 5) при влиянии силовой линии представлена на рисунке 10.

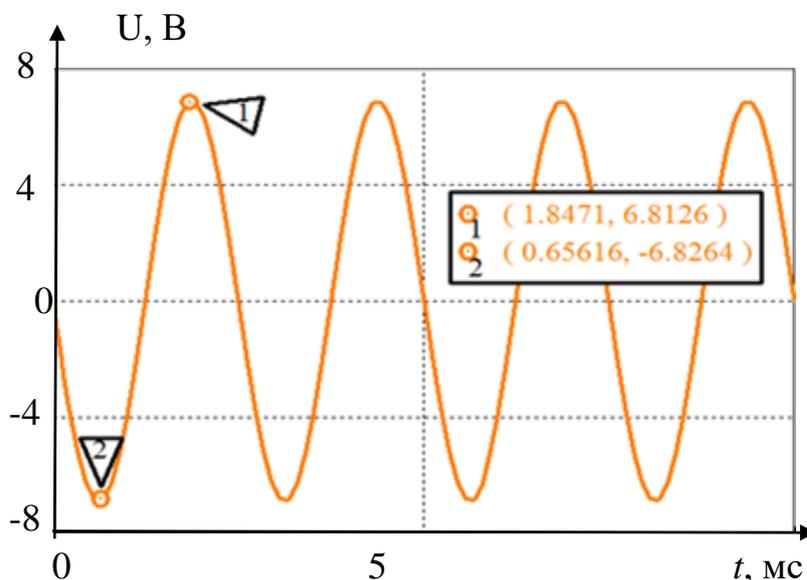


Рисунок 10 - Электромагнитная помеха в информационной линии связи во времени

Обсуждение результатов

Из результатов компьютерного моделирования видно, что распределение напряжённости электрического поля по мотогандоле ЛА равномерное, при этом максимальные значения наблюдаются вблизи силовых линий генератора. Максимальная напряжённость магнитного поля достигает 110 А/м, (точка наблюдения №4, рисунок 7). Сопоставление данного уровня с требованиями к бортовому оборудованию КТ-160Д (пункт 19.3.3) показывает, что оборудование класса СС будет соответствовать требованию на частоте испытаний 400 Гц, поскольку максимальное допустимое значение напряжённости магнитного поля 120

А/м [18]. Из результатов исследования видно, что в основном преобладает напряженность магнитного поля, что обусловлено низкими частотами воздействия. Изменение уровня магнитного поля во времени практически полностью повторяет воздействующий сигнал на частоте 400 Гц. Электромагнитная волна в мотогондоле ЛА имеет сложную форму обусловленную многократными переотражениями внутри. Основные колебания электрического поля соответствуют частоте 0,14 МГц. В точках №5 и №7, расположенных вблизи элементов системы управления двигателем, уровень электромагнитного поля не превышает допустимых значений. Уровни напряженности электромагнитного поля не должны привести к нарушению качества функционирования системы управления двигателем при расчётных значениях.

В соответствии с требованиями стандарта MIL-STD-461 [19] допустимые уровни электромагнитных помех в линиях связи интерфейсов и сети питания при низкочастотном электромагнитном воздействии не должны превышать уровень 126 дБмкВ (2 В) в частотном диапазоне до 150 кГц. При сопоставлении расчетных уровней и уровней, соответствующих требованиям нормативных документов, полученные электромагнитные помехи в линиях связи превышают допустимые значения.

Способ прогнозирования электромагнитной обстановки, обусловленной электромагнитными полями от системы электропитания ЛА может являться составной частью методик по проектированию системы электропитания ЛА и по трассировке линий связи с учётом требований ЭМС. Высокие токи от генератора делают сеть электропитания ЛА источником низкочастотного магнитного поля,

которое излучается контурами, образованными проводниками системы электропитания. Важным этапом, для уменьшения низкочастотных магнитных полей является уменьшение площадей токовых контуров, путём рациональной организации системы заземления и выравнивания опорного потенциала [20, 21].

Заключение

1. Предложен подход к прогнозированию электромагнитной обстановки и электромагнитных помех в интерфейсных линиях связи при влиянии излучений от силовых линий связи генератора. Разработаны имитационные модели объекта исследования, которые учитывают, геометрические и электрофизические параметры мотогондолы ЛА, геометрию размещения блоков бортового оборудования и трассировку силовых и информационных линий связи.

2. Сопоставление максимального уровня напряжённости магнитного поля (110 А/м), с требованиями к бортовому оборудованию в соответствии с нормативным документом КТ-160Д (пункт 19.3.3) показывает, что бортовое оборудование, соответствующее требованиям «класса СС», сможет надлежащим образом функционировать в электромагнитной обстановке мотогондолы ЛА при эмиссии от силовых линий связи генератора.

3. Результаты исследования показывают, что электромагнитные помехи (максимальные значения) в линиях связи системы управления двигателем достигают уровней до 13,6 В, а частота колебаний электромагнитных помех составляет 400 Гц. Данные уровни электромагнитных помех могут привести к нарушению качества функционирования системы управления двигателем.

4. Используемый в работе подход может быть применён для прогнозирования электромагнитных излучений от системы электроснабжения ЛА и его частей. Данный подход может являться составной частью общей методики проектирования системы электропитания ЛА с учётом требований ЭМС.

Список литературы

1. Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Нгуен В.Х. Моделирование воздействия мощных электромагнитных помех на электротехнический комплекс самолета // Труды МАИ. 2013. № 71. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=46938>
2. Gaynutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Emission of electromagnetic disturbances from coupling paths of avionics unmanned aerial vehicles // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Astana. 2017. P. 1-5. DOI: [10.1109/SIBCON.2017.7998580](https://doi.org/10.1109/SIBCON.2017.7998580)
3. Кириллов В.Ю., Жегов Н.А. Исследование восприимчивости бортовых кабелей космического аппарата к электромагнитным помехам в СВЧ диапазоне // Труды МАИ. 2012. № 59. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=34406>
4. Кечиев Л.Н., Акбашев Б.Б., Степанов П.В. Экранирование технических средств и экранирующие системы. - М.: ООО «Группа ИДТ», 2010. - 470 с.
5. Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф. Электромагнитная совместимость перспективных авиационных комплексов // Технологии электромагнитной совместимости. 2018. № 2 (65). С. 62-78.

6. ГОСТ Р 54073-2010. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. – М.: Стандартинформ, 2011. – 33 с.
7. MIL-STD-461F. Department of defense interface standard Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment. December 10, 2007. 255 p.
8. Sorensen M., Hubing T.H., Jensen K. Study of the Impact of Board Orientation on Radiated Emissions due to Common-Mode Currents on Attached Cables // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC 2016, Ottawa, 25-29 July 2016. P. 36-39. DOI: [10.1109/ISEMC.2016.7571595](https://doi.org/10.1109/ISEMC.2016.7571595)
9. Кириллов В.Ю., Марченко М.В., Томилин М.М. Электромагнитная совместимость бортовой кабельной сети летательных аппаратов. - М.: Изд-во МАИ, 2014. - 172 с.
10. Балюк Н.В., Болдырев В.Г., Булеков В.П. и др. Электромагнитная совместимость технических средств подвижных объектов. - М.: Изд-во МАИ, 2004. – 647 с.
11. Paul C.R. Analysis of Multiconductor Transmission Lines. New Jersey: Published by John Wiley & Sons. Inc., 2007. 623 p.
12. Baklezos A.T. Electromagnetic Emission Modeling in Case of Shielded Cabling With Respect to the Ground Dielectric Properties // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2016. V. 58, No. 6. P. 1694-1700. DOI: [10.1109/TEMC.2016.2588583](https://doi.org/10.1109/TEMC.2016.2588583)
13. Tooley M., Wyatt D. Aircraft Electrical and Electronic Systems. Elsevier. 2009. 424 p.
14. Gaynutdinov R., Chermoshentsev S. Study Radiation from Radio Transmitters Antennas Influence on the UAV Onboard Equipment // 2019 International Conference on

- Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). Ufa. Russia. 2019. P. 1-4. DOI: [10.1109/ICOECS46375.2019.8949988](https://doi.org/10.1109/ICOECS46375.2019.8949988)
15. Chermoshencev S.F., Gaynutdinov R.R. Modeling the external electromagnetic influences on the complex electronic equipment // 2015 XVIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). St. Petersburg. 2015. P. 90-92. DOI: [10.1109/SCM.2015.7190420](https://doi.org/10.1109/SCM.2015.7190420)
16. Клыков А.В., Кириллов В.Ю. Возможности компьютерного моделирования при решении задач электромагнитной совместимости бортовых сетей самолетов // Труды МАИ. 2012. № 57. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=30760>
17. Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Томилин М.М. Моделирование переходных процессов усилителя тока двигателя рулевого привода // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23, № 2. С. 175-184.
18. RTCA D0-160E. Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment, Washington, D.C., U.S. Dept. of Transportation, Federal Aviation Administration, 2005.
19. MIL-STD-461G. Department of defense interface standard. Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment. 324 p. URL: <https://www.esdguns.com/img/cms/PDF/mil-std-461g-standard-for-electromagnetic-interference-control.pdf>
20. Gainutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Methodology to ensure the intrasystem electromagnetic compatibility of UAV avionics // Russian Aeronautics (Iz VUZ). 2016. V. 59, No 4. P. 613–618. DOI: [10.3103/S1068799816040279](https://doi.org/10.3103/S1068799816040279)

21. Гайнутдинов Р.Р., Чермошенцев С.Ф. Устройство выравнивания опорного потенциала (варианты). Патент РФ № 2583101, опубл. 10.05.2016.

References

1. Kirillov V.Yu., Klykov A.V., Nguen V.Kh. Modeling the impact of powerful electromagnetic interference on aircraft's electrotechnical complex. *Trudy MAI*. 2013. No. 71. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=46938>
2. Gaynutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Emission of electromagnetic disturbances from coupling paths of avionics unmanned aerial vehicles. *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. Astana. 2017. P. 1-5. DOI: [10.1109/SIBCON.2017.7998580](https://doi.org/10.1109/SIBCON.2017.7998580)
3. Kirillov V.Yu., Zhegov N.A. The study of the susceptibility of on-Board cabling spacecraft to electromagnetic interference in the microwave frequency range. *Trudy MAI*. 2012. No. 59. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=34406>
4. Kechiev L.N., Akbashev B.B., Stepanov P.V. *Ekranirovanie tekhnicheskikh sredstv i ekraniruyushchie sistemy* (Screening of technical means and screening systems). Moscow: ООО «Gruppa IDT» Publ., 2010. 470 p.
5. Gainutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Electromagnetic compatibility of perspective aviation complexes. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestimosti*. 2018. No. 2 (65). P. 62-78. (In Russ.)
6. *GOST R 54073-2010. Sistemy elektrosnabzheniya samoletov i vertoletov. Obshchie trebovaniya i normy kachestva elektroenergii* (GOST R 54073 - 2010. Power supply

systems for airplanes and helicopters. General requirements and standards of electricity quality). Moscow: Standartinform Publ., 2011. 33 p.

7. MIL-STD-461F. Department of defense interface standard Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment. December 10, 2007. 255 p.

8. Sorensen M., Hubing T.H., Jensen K. Study of the Impact of Board Orientation on Radiated Emissions due to Common-Mode Currents on Attached Cables. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC 2016*, Ottawa, 25-29 July 2016. P. 36-39. DOI: [10.1109/ISEMC.2016.7571595](https://doi.org/10.1109/ISEMC.2016.7571595)

9. Kirillov V.Yu., Marchenko M.V., Tomilin M.M. *Elektromagnitnaya sovместimost' bortovoi kabel'noi seti letatel'nykh apparatov* (Electromagnetic compatibility of the onboard cable network of aircraft). Moscow: Izd-vo MAI Publ., 2014. 172 p.

10. Balyuk N.V., Boldyrev V.G., Bulekov V.P. etc. *Elektromagnitnaya sovместimost' tekhnicheskikh sredstv podvizhnykh ob"ektov* (Electromagnetic compatibility of technical means of mobile objects). Moscow: Izd-vo MAI Publ., 2004. 647 p.

11. Paul C.R. *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*. New Jersey: Published by John Wiley & Sons. Inc., 2007. 623 p.

12. Baklezos A.T. Electromagnetic Emission Modeling in Case of Shielded Cabling With Respect to the Ground Dielectric Properties. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2016. V. 58, No. 6. P. 1694-1700. DOI: [10.1109/TEMC.2016.2588583](https://doi.org/10.1109/TEMC.2016.2588583)

13. Tooley M., Wyatt D. *Aircraft Electrical and Electronic Systems*. Elsevier. 2009. 424 p.

14. Gaynutdinov R., Chermoshentsev S. Study Radiation from Radio Transmitters Antennas Influence on the UAV Onboard Equipment. *2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*. Ufa. Russia. 2019. P. 1-4. DOI: [10.1109/ICOECS46375.2019.8949988](https://doi.org/10.1109/ICOECS46375.2019.8949988)
15. Chermoshencev S.F., Gaynutdinov R.R. Modeling the external electromagnetic influences on the complex electronic equipment. *2015 XVIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*. St. Petersburg. 2015. P. 90-92. DOI: [10.1109/SCM.2015.7190420](https://doi.org/10.1109/SCM.2015.7190420)
16. Klykov A.V., Kirillov V.Yu. Capabilities of computer simulation for solving problems of electromagnetic compatibility of electrical wiring interconnection aircraft system. *Trudy MAI*. 2012. No. 57. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=30760>
17. Kirillov V.Yu., Klykov A.V., Tomilin M.M. Aircraft steering gear system current amplifier transients simulation. *Aerospace MAI Journal*. 2016. V. 23, No 2. P. 175-184.
18. *RTCA D0-160E. Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment*, Washington, D.C., U.S. Dept. of Transportation, Federal Aviation Administration, 2005.
19. *MIL-STD-461G. Department of defense interface standard. Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment*. 324 p. URL: <https://www.esdguns.com/img/cms/PDF/mil-std-461g-standard-for-electromagnetic-interference-control.pdf>

20. Gainutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. Methodology to ensure the intrasystem electromagnetic compatibility of UAV avionics. *Russian Aeronautics (Iz VUZ)*. 2016. V. 59, No 4. P. 613–618. DOI: [10.3103/S1068799816040279](https://doi.org/10.3103/S1068799816040279)

21. Gainutdinov R.R., Chermoshentsev S.F. *Ustroistvo vyravnivaniya opornogo potentsiala (varianty)*. *Patent RF № 2583101* (The device for equalizing the reference potential (variants): Russian Federation Patent No. 2583101), 10.05.2016.

Статья поступила в редакцию 24.09.2024

Одобрена после рецензирования 02.01.2025

Принята к публикации 25.02.2025

The article was submitted on 24.09.2024; approved after reviewing on 02.01.2025; accepted for publication on 25.02.2025