

22. Boneh D., Zhandry M. Quantum-secure message authentication codes, *In Proceedings of Eurocrypt*, 2013, pp. 592-608.
23. Potapov V., Gushansky S., Guzik V., Polenov M. Architecture and Software Implementation of a Quantum Computer Model, *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer Verlag, 2016, Vol. 465, pp. 59-68.
24. Bennett C.H., Shor P.W., Smolin J.A., Thapliyal A.V. Entanglement-assisted Capacity of a Quantum Channel and the Reverse Shannon Theorem, *IEEE Transactions on Information Theory*, 2002, Vol. 48, pp. 26-37.
25. Kleppner D., Kolenkow R. An Introduction to Mechanics (Second ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 2014, 49 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор Г.В. Куповых.

**Гушанский Сергей Михайлович** – Южный федеральный университет; e-mail: smgushanskiy@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371656; кафедра вычислительной техники; к.т.н.; доцент.

**Потапов Виктор Сергеевич** – e-mail: vitya-potapov@rambler.ru; кафедра вычислительной техники; ассистент.

**Бородянский Юрий Михайлович** – Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича; e-mail: borodyanskyum@gmail.com; 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, 22, к. 1; к.т.н.; доцент.

**Gushanskiy Sergey Mikhailovich** – Southern Federal University; e-mail: smgushanskiy@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371656; the department of computer engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Potapov Victor Sergeevich** – e-mail: vitya-potapov@rambler.ru; the department of computer engineering; assistant.

**Borodyansky Yuri Mikhailovich** – St. Petersburg State University of Telecommunications prof. M.A. Bonch-Bruевич; e-mail: borodyanskyum@gmail.com; 193232, St. Petersburg, pr. Bolshevnikov, 22, build. 1; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.371

DOI 10.18522/2311-3103-2020-6-150-159

**В.П. Можайцев, Д.В. Семенихина**

### **ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ЭКРАНИРОВАНИЯ ФЮЗЕЛЯЖЕМ КРИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В СОСТАВЕ ВОЗДУШНОГО СУДНА**

*Рассматриваются проблемы обеспечения безопасности полета самолетов, использующих электрические / электронные системы, при воздействии высокоинтенсивных электромагнитных полей. Разрабатывается методика анализа воздействия высокоинтенсивных электромагнитных полей, создающих электромагнитную обстановку в зоне нахождения воздушного судна, на базе основных факторов электромагнитной совместимости самолета, таких как электромагнитная обстановка, механизм связи или воздействия, чувствительность или восприимчивость приёмников электромагнитного излучения с пороговыми значениями помех в частотной и временной областях. Анализируются два метода оценки устойчивости самолета к воздействию высокоинтенсивных электромагнитных полей: испытания методом сканирования высокого уровня и испытания методом сканирования низкого уровня. Целью данной статьи является оценка коэффициента экранирования фюзеляжем в местах установки блоков критических систем с помощью программного обеспечения для численного электродинамического моделирования. Задачей исследования является создание и расчет математической модели критической системы в составе воздушного судна. В статье разработаны электродинамические модели критической систе-*

мы самолета – многофункционального жидкокристаллического индикатора, и проводится расчет в пакете полноволнового электродинамического проектирования Ansys HFSS. В HFSS-модель кабины воздушного судна вносятся обоснованные упрощения для расчета коэффициента экранирования фюзеляжем. Упрощение модели подразумевает исключение мелких деталей и объектов, которые намного меньше длины волны и уменьшение области исследования модели, поскольку блоки критической системы расположены в передней части кабины. Проведена оценка и коэффициента экранирования фюзеляжем в диапазоне частот от 100 МГц до 1 ГГц, выполнен анализ и сравнение полученных результатов с испытаниями в составе воздушного судна. Результаты имеют схожий характер, однако, рассчитанные значения коэффициента экранирования ниже на 5–15 дБ в диапазоне частот от 400 МГц до 850 МГц. Так же в диапазоне частот до 400 МГц имеются характерные резонансные «провалы» коэффициента экранирования. Полученные результаты позволят выделить наиболее опасные источники и зоны возбуждения электромагнитных помех для последующего детального анализа, уменьшить сроки и стоимости проведения испытаний.

*Коэффициент экранирования; критическая система; высокоинтенсивные электромагнитные поля; воздушное судно.*

**V.P. Mozhaytsev, D.V. Semenikhina**

### **EVALUATION OF THE SHIELDING COEFFICIENT BY CRITICAL SYSTEM FUSELAGE IN THE COMPOSITION OF THE AIRCRAFT**

*This article discusses the problems of ensuring the flight safety of aircraft using electrical / electronic systems when exposed to high-intensity electromagnetic fields. A method is being developed for analyzing the impact of high-intensity radiated fields that create an electromagnetic environment in the aircraft location area, based on the main factors of the aircraft electromagnetic compatibility, such as the electromagnetic environment, the mechanism of communication or action, the sensitivity or susceptibility of electromagnetic radiation receivers with threshold values of interference in the frequency and time domains. Two methods for assessing the aircraft resistance to high-intensity electromagnetic fields are analyzed: high-level scan tests and low-level scan tests. The purpose of this article is to estimate the fuselage shielding coefficient in the places where critical systems units are installed using software for numerical electrodynamic modeling. The objective of the study is to create and calculate a mathematical model of the critical system as part of an aircraft. The article developed electrodynamic models of the critical system of the aircraft – a multifunctional liquid crystal indicator, and the calculation is carried out in the Ansys HFSS full-wave electrodynamic design package. Reasonable simplifications are made to the HFSS cockpit model for calculating the fuselage-shielding factor. Simplifying the model means eliminating small parts and objects that are much shorter than the wavelength and reducing the model's area of study, since the critical system blocks are located in the front of the cockpit. The estimation of the fuselage-shielding factor in the frequency range from 100 MHz to 1 GHz is carried out, the analysis and comparison of the results obtained with the tests in the aircraft are carried out. The results are of a similar nature, however, the calculated values of the shielding factor are 5–15 dB lower in the frequency range from 400 to 850 MHz. Also in the frequency range up to 400 MHz, there are characteristic resonant "dips" of the screening coefficient. The results obtained will make it possible to single out the most dangerous sources and zones of excitation of electromagnetic interference for subsequent detailed analysis, and to reduce the time and cost of testing.*

*Shielding factor; critical system; and high intensity radiated fields; aircraft.*

**Введение.** Высокоинтенсивные электромагнитные поля (ВИЭМП) или High-intensity radiated fields (HIRF) – один из факторов, электромагнитных явлений, которые могут существовать во всех возможных внешних радиочастотных (РЧ) полях [1]. HIRF поля создают электромагнитную обстановку в зоне нахождения воздушного судна (ВС). Увеличение использования сложной электроники в современных самолетах, а также расширенное использование спектра во всем мире делает тему восприимчивости в условиях высокоинтенсивного излучаемого поля ключевым вопросом для сертификации любого воздушного транспортного средства [2].

Проблемы обеспечения безопасности полета самолетов, использующих электрические / электронные системы при воздействии HIRF существенно увеличились за счет следующих основных факторов:

- а) большой зависимости от электрических / электронных систем, выполняющих функции, необходимые для продолжения безопасного полета и посадки;
- б) уменьшения электромагнитного (ЭМ) экранирования, за счет применения композитных материалов;
- в) потенциального увеличения восприимчивости интегральных схем из-за увеличения скорости обработки информации;
- г) ожидания того, что внешняя радиочастотная среда будет становиться все более серьезной из-за увеличения числа и мощности РЧ излучателей.

Чтобы обеспечить работоспособность бортового оборудования на ВС в условиях ВИЭМП, необходимо учитывать три основных фактора ЭМС [3]:

- ◆ электромагнитную обстановку, характеризующуюся напряженностями внешних воздействующих полей, частотой, крутизной фронтов импульсов;
- ◆ механизм связи или воздействия, определяемый коэффициентами затухания или передаточными функциями;
- ◆ чувствительность или восприимчивость приёмников электромагнитного излучения с пороговыми значениями помех в частотной и временной областях.

Среда HIRF представляет собой совокупность передатчиков, которые находятся в воздухе, на суше, на морских платформах и на корабле. Эти передатчики становятся все более сложными, более эффективными, более мощными и более многочисленными. Излучатели охватывают весь радиочастотный спектр, и их излучаемые поля сильно различаются по уровням энергии и характеристикам сигнала.

Разделяют четыре обстановки, характеризующие HIRF [4, 5]:

- а) жесткая среда для самолетов с фиксированным потолком (не используется в правилах HIRF);
- б) сертификационная (HIRF I);
- в) нормальная (HIRF II);
- г) жесткая (HIRF III).

Для оценки уровня электромагнитного поля внутри ВС при облучении его внешним ЭМП в диапазоне частот от 100 МГц до 18 ГГц применяется коэффициент экранирования фюзеляжа ВС. Коэффициент экранирования показывает, насколько корпус ВС ослабляет внешнее ЭМП, определяя степень защиты бортового электронного оборудования. Коэффициент экранирования ЭМП фюзеляжем ВС определяется как отношение уровня напряжённости внешнего ЭМП и уровня напряжённости ЭМП, измеренного внутри ВС.

В 2013 - 2014 годах в авиационные правила АП-23, АП-25, АП-27 были добавлены специальные пункты (25.1317, 23.1308 для самолётов и 27.1317 для вертолётов). В этих пунктах подробно отражены требования к бортовому оборудованию ВС в части стойкости к воздействию внешнего ЭМП (частоты внешних ЭМП, уровни напряжённости электрического поля, тип модуляции). До того, как эти пункты были добавлены в авиационные правила, требования к воздействию и устойчивости к HIRF определялись в «Специальных технических условиях», которые разрабатывались для каждого ВС. Требования, предъявляемые к бортовому оборудованию по стойкости к воздействию HIRF, задаваемые в [6–9], зависят от категории критичности выполняемых им функций. Следовательно, на начальном этапе процесса сертификации ВС необходимо разработать перечень критических и существенных систем ВС, которые подлежат оценке на устойчивость к воздействию HIRF. Для различных категорий оборудования в соответствии с вышеприведённой классификацией должны выполняться определенные требования. Так для

оборудования категории А испытания в составе ВС являются обязательными [4]. Устойчивость БО в составе ВС должна обеспечиваться в диапазоне частот от 10 кГц до 40 ГГц.

Для оборудования категории В и С испытания в составе ВС не требуются. Сертификация этого оборудования подтверждается результатами лабораторных квалификационных испытаний в соответствии с требованиями и нормами приведенными в АП и КТ-160G: для оборудования категории В по категории жёсткости R, R, R и для оборудования категории С по категории жёсткости T, T, T или S, S, S. Первая буква – категория жёсткости испытаний на восприимчивость к помехам проводимости, вторая буква – категория жёсткости испытаний на восприимчивость к помехам излучения без модуляции и с амплитудной модуляцией прямоугольными импульсами типа «меандр», третья буква – категория жёсткости испытаний на восприимчивость к импульсным помехам излучения. Категории приведены в соответствии с классификацией КТ-160G (DO-160G/ED-14G), раздел 20 [5]. Однако, если оборудование категории В и С не соответствует требованиям КТ-160G (DO-160G/ED-14G), раздел 20) или не прошло квалификационные испытания, то допускается проводить испытания этого оборудования для подтверждения в составе ВС.

Существует два метода оценки устойчивости самолета к воздействию HIRF [10, 11]:

- ◆ испытания методом сканирования высокого уровня;
- ◆ испытания методом сканирования низкого уровня.

Испытания методом сканирования высокого уровня, проводятся облучением самолета реальными уровнями воздействия HIRF. При испытаниях методом сканирования низкого уровня используются радиочастотные поля низкой амплитуды, по сравнению с уровнями РЧ, используемыми во время стендовых или высокоуровневых испытаний, для определения внутренней ЭМО ВС [12].

**Создание и расчет математической модели.** В качестве программного обеспечения для численного электродинамического моделирования воспользуемся программным продуктом ANSYS HFSS [13–15]. Выберем блок критической системы (КС) и тип ВС. За КС примем многофункциональный индикатор жидкокристаллический (МФИ-ЖК), поскольку данное оборудование установлено практически на каждом ВС и по уровню критичности имеет категорию А. Моделью ВС будет передняя часть кабины самолета Бе-200ЧС. МФИ-ЖК, установленные на самолете Бе-200ЧС в количестве бшт, расположены под лобовыми окнами кабины экипажа.

Создадим электродинамическую модель передней части кабины ВС с установленными блоками КС. Для этого воспользуемся импортированием из графического редактора NX [16], в котором уже создана электронная компоновочная модель ВС (рис. 1, 2). Импортированная модель из UG в HFSS представлена на рис. 3. Данная модель содержит большое количество деталей, элементов конструкции, мелких деталей, которые пересекаются между собой, приводят к ошибкам расчета, усложняют расчет, делая его практически невозможным.

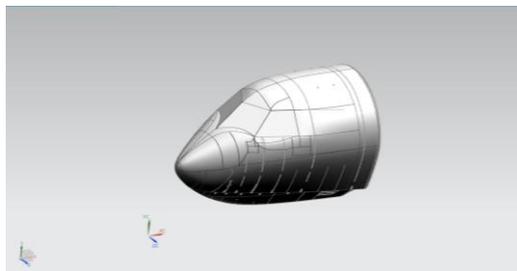


Рис. 1. Внешний вид компоновочной модели кабины самолета в NX

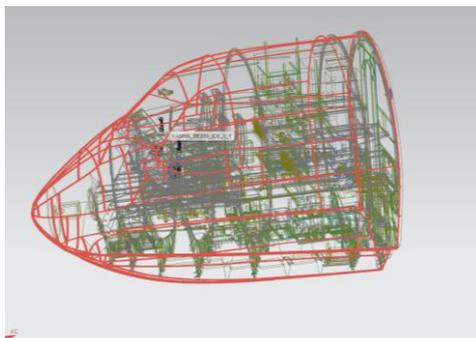


Рис. 2. Компоновочная модель кабины самолета в NX

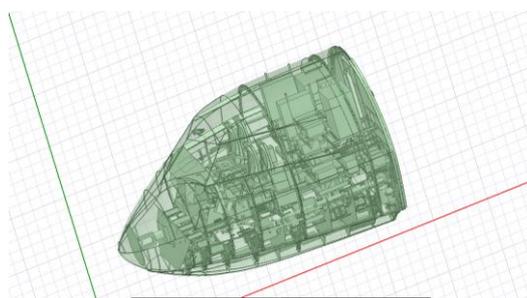


Рис. 3. Модель самолета в HFSS

Для проведения расчета коэффициента экранирования, необходимо упростить модель [17]. Упрощение модели подразумевает исключение мелких деталей и объектов, которые намного меньше длины волны. Данные объекты не повлияют на расчет коэффициента экранирования в заданном диапазоне частот. Также можно уменьшить область исследования модели, поскольку блоки КС расположены в передней части кабины. Итоговая упрощенная модель для расчета представлена на рис. 4.

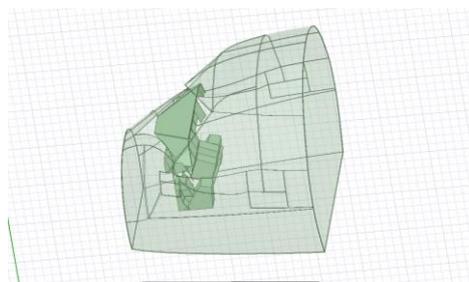


Рис. 4. Упрощенная модель для расчета КЭ

Наведенные уровни ЭМП на блок КС рассчитываются на трех «линиях», расположенных в верхней, средней и нижней части МФИ-ЖК на расстоянии 50 мм. Каждая линия содержит 120 точек с шагом 10 мм. Облучение КС зададим в виде плоской волны, амплитудой 1 В/м, падающей на КС под углом от  $-90^\circ$  до  $90^\circ$  в азимутальной плоскости  $\varphi$ , с шагом  $30^\circ$ , и под углом от  $-150^\circ$  до  $0^\circ$  в угломестной плоскости  $\theta$ , с шагом  $30^\circ$  (рис. 5).

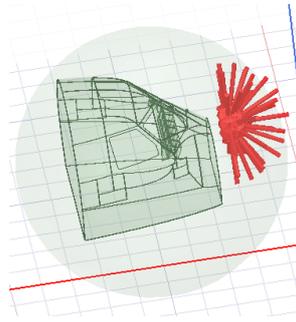


Рис. 5. Направления облучения ВС

Максимальные значения уровня ЭМП, наведенного на КС представлены на рис. 6.

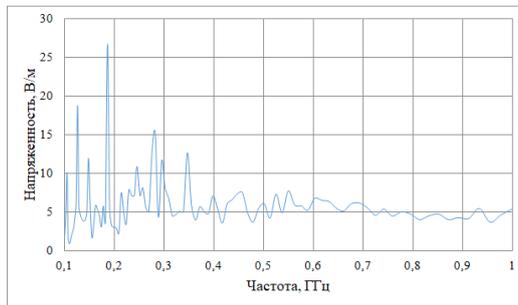


Рис. 6. Максимальные значения уровня ЭМП, наведенного на КС

Теперь необходимо провести калибровку уровня напряжённости ЭМП – рассчитать наведенные уровни ЭМП в тех же точках, но без ВС.

Для расчета КЭ фюзеляжем необходимо найти отношение максимального значения уровня напряженности при калибровке к максимальному значению уровня напряженности, рассчитанного внутри ВС. Рассчитанный КЭ фюзеляжем в диапазоне от 100 МГц до 1 ГГц представлен на рис. 7.

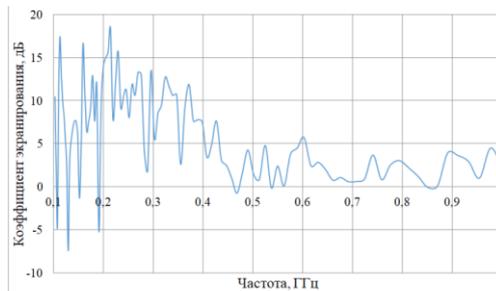


Рис. 7. Частотная характеристика КЭ фюзеляжем

Отрицательные значения коэффициента экранирования на некоторых частотах означают, что на данных частотах возникли резонансные явления. Эти частоты необходимо проверить при проведении испытаний в составе объекта. Для повышения точности расчета необходимо более детально учитывать компоновку места расположения критической системы.

## Сравнение результатов расчета КЭ с испытаниями в составе ВС

На рис. 8 представлены результаты расчета КЭ (синяя линия) и КЭ, полученного по результатам испытаний в составе ВС (оранжевая линия).

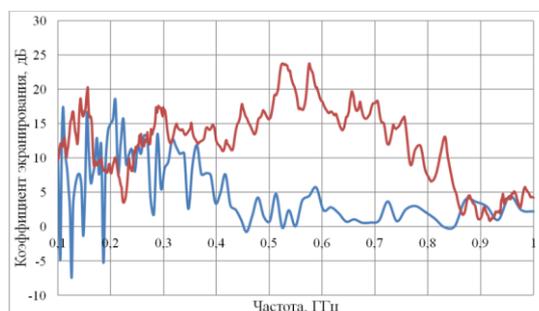


Рис. 8. Сравнение результатов расчета КЭ с испытаниями в составе ВС

Проанализировав результаты расчета и испытаний, можно сделать вывод, что кривые имеют схожий характер, однако, рассчитанные значения КЭ ниже на 5–15 дБ в диапазоне частот от 400 МГц до 850 МГц. Так же в диапазоне частот до 400 МГц имеются характерные резонансные «провалы» КЭ. Это обусловлено следующими моментами:

- ♦ расчет КЭ выполнен в более широком диапазоне облучения в угломестной плоскости, что является затруднительным при проведении испытаний;
- ♦ расчет КЭ выполнен более подробно для КС, т.е. значения наведенного ЭМП рассчитывались через каждые 30 мм вдоль всех блоков, что при проведении испытаний значительно увеличит затраченное время;
- ♦ расчет КЭ проводился на упрощенной электродинамической модели, в которой отсутствовали элементы конструкции внутри кабины, соответствующие диапазону частот от 400 до 850 МГц (0,75–0,35 м).

Отметим, что расчет данной модели проводился на компьютере с 16 Гб ОЗУ, что очень мало для расчетов больших электродинамических моделей с подробными элементами компоновки.

Повышение точности электродинамической модели и «наполнение» модели элементами конструкции позволит дать высокую сходимость рассчитанных испытаний с реальными результатами.

Повысим точность и детализируем электродинамическую модель и сравним полученные результаты. На рис. 9 представлена детализированная модель для расчета КЭ.

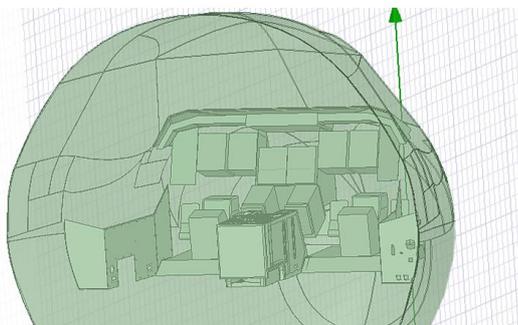


Рис. 9. Детализированная модель для расчета КЭ

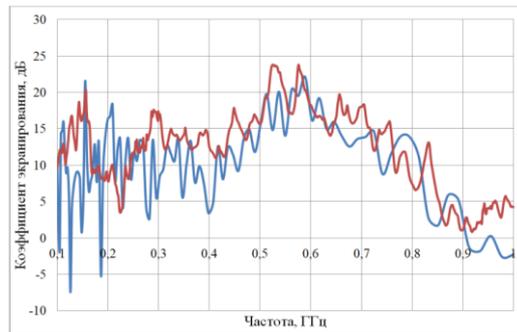


Рис. 10. Сравнение результатов расчета КЭ с испытаниями в составе ВС

Как видно из рис. 10, повышение точности и детализации модели повышает сходимость результатов расчета с результатами испытаний в составе ВС.

**Заключение.** Полученные результаты оценки коэффициента экранирования фюзеляжем можно использовать для более углубленного анализа и подтверждения норм соответствия устойчивости оборудования к HIRF для предварительной сертификации.

Одним из вариантов проверки (сертификации) соответствия нормам воздействия излучения электромагнитных полей на ВС является переход к виртуальным методам исследований. Используя математические модели и специальные для этих целей программные продукты, можно виртуально моделировать воздействие HIRF в соответствии с ED 107 [4], AC/AMJ 20.1317 [5], KT-160D [9].

Рассмотренная концепция виртуального моделирования позволяет достичь следующих качественно новых показателей дальнейшего развития проведения испытаний воздействия HIRF в составе ВС [18]:

- ◆ выделение для последующего детального анализа наиболее опасных источников и зон возбуждения электромагнитных помех;
- ◆ повышение безопасности ВС;
- ◆ уменьшение сроков и стоимости проведения испытаний;
- ◆ переход к «виртуальной» сертификации;
- ◆ уменьшение ограничений в использовании портативной техникой (телефоны, точки доступа интернет, специальное медицинское оборудование) для пассажиров [19–21];
- ◆ улучшение тактико-технических показателей ВС таких как: уменьшение ЭМИ от бортового оборудования установленном на ВС, уменьшение массы вследствие уменьшения экранов и защитных экранов по результатам моделирования ЭМС, повышение радиоэлектронной защищённости ВС от внешних воздействий естественного и техногенного характера (молнии, РЛС, ЭМИ оружие), переход от металлических деталей планера (естественных экранов) к композитным материалам без снижения ЭМ защиты.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Борисов М.Б. Воздействие внешних электромагнитных полей высокой интенсивности на бортовое оборудование ВС // Сб. научных трудов ГосНИИ ГА. – 2010. – № 311. – С. 75-85.
2. ARP5583. Guide to Certification of Aircraft in a High Intensity Radiated Field (HIRF) Environment. 2010.
3. Шваб А.И. Электромагнитная совместимость. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 466 с.
4. EUROCAE ED 107. Guide to certification of aircraft in a high-intensity radiated field (HIRF) environment. 2010.

5. AC/AMJ 20.1317. The certification of aircraft electrical and electronic systems for operation in the High Intensity Radiated Field (HIRF) Environment., 1998.
6. The Federal Aviation Regulations USA (FARs), part 25.
7. Certification Specification CS-25 EASA.
8. АП-25. Авиационные правила. Нормы летной годности самолетов транспортной категории.
9. КТ 160D. Квалификационные требования. Раздел 20.0 Радиочастотная восприимчивость (радиоизлучение и проводимость), АР МАК, 2004.
10. Miller D.C. Aircraft and Subsystem Level HIRF Test Methods // SAE Transactions. – 1990. – Vol. 99. – P. 1771-1783.
11. Shi G., Liao Y., Ying X. Zhang Y. Methods of high intensity radiated field testing for civil aircraft // 2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), Angers, 2017.
12. Huiying Li, Mark Bolsover, Junhui Ye, Linfang Yan. The Role of Electromagnetic Compatibility Qualification Considerations in Airborne System Integration Programs // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 99. – P. 208-213.
13. Банков С.Е., Гутцайт Э.М., Курушин А.А. Решение оптических и СВЧ задач с помощью HFSS. – М.: ООО «Оркада», 2012. – 250 с.
14. Patrick Hindle. 5 Leading EDA Tools for EMC/EMI Design Challenges // Microwave journal. – 2017. – No. 7. – P. 20-40.
15. Сайт компании-разработчика программного продукта ANSYS EMIT. – <https://www.ansys.com/products/electronics/radio-frequency-interference>.
16. Сайт компании-разработчика программного продукта NX. – <https://www.idealplm.ru/uEditor/files/4/397/ObzorNX.pdf>.
17. Emmanuel Perrin, Fabrice Tristant, Christophe Guiffaut, Fabien Terrade, Alain Reineix. A 3D Model to compute lightning and HIRF coupling effects on avionic equipment of an aircraft // 2012 ESA Workshop on Aerospace EMC. – May 2012. – Venise, Italy. – P. 1-5.
18. Cui Y. and Cui C. A developing method of aircraft HIRF/L preventive maintenance program // 2013 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE), Chengdu, 2013. – P. 1215-1218.
19. Nalbantoglu C., Kiehl T., God R., Stadler T., Kebel R. and Bienert R. Electromagnetic compatibility (EMC) for integration and use of near field communication (NFC) in aircraft // 2016 ESA Workshop on Aerospace EMC (Aerospace EMC), Valencia, 2016. – P. 1-6.
20. DO-294C - Guidance on Allowing Transmitting Portable Electronic Devices (T-PEDS) on Aircraft, Washington, DC, USA, 2008.
21. DO-307 - Aircraft Design and Certification for Portable Electronic Device (PED) Tolerance, Washington, DC, USA, 2007.

## REFERENCES

1. Borisov M.B. Vozdeystvie vneshnikh elektromagnitnykh poley vysokoy intensivnosti na bortovoe oborudovanie VS [The impact of external electromagnetic fields of high intensity on the on-board equipment of the AIRCRAFT], *Sb. nauchnykh trudov GosNII GA* [Collection of scientific works of GosNII GA], 2010, No. 311, pp. 75-85.
2. ARP5583. Guide to Certification of Aircraft in a High Intensity Radiated Field (HIRF) Environment. 2010.
3. Shvab A.Y. Elektromagnitnaya sovместimost' [Electromagnetic compatibility]. Moscow: Energoatomizdat, 1998, 466 p.
4. EUROCAE ED 107. Guide to certification of aircraft in a high-intensity radiated field (HIRF) environment. 2010.
5. AC/AMJ 20.1317. The certification of aircraft electrical and electronic systems for operation in the High Intensity Radiated Field (HIRF) Environment., 1998.
6. The Federal Aviation Regulations USA (FARs), part 25.
7. Certification Specification CS-25 EASA.
8. АП-25. Авиационные правила. Нормы летной годности самолетов транспортной категории [АП-25. Aviation regulations. Standards of airworthiness of transport category aircraft].

9. KT 160D. Kvalifikatsionnye trebovaniya. Razdel 20.0 Radiochastotnaya vospriimchivost' (radioizluchenie i provodimost'), AR MAK, 2004 [CT 160D. Qualification requirements. Section 20.0 Radio Frequency susceptibility (Radio emission and conductivity), AR IAC, 2004].
10. Miller D.C. Aircraft and Subsystem Level HIRF Test Methods, *SAE Transactions*, 1990, Vol. 99, pp. 1771-1783.
11. Shi G., Liao Y., Ying X. Zhang Y. Methods of high intensity radiated field testing for civil aircraft, *2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), Angers, 2017*.
12. Huiying Li, Mark Bolsover, Junhui Ye, Linfang Yan. The Role of Electromagnetic Compatibility Qualification Considerations in Airborne System Integration Programs, *Procedia Engineering*, 2015, Vol. 99, pp. 208-213.
13. Bankov C.E., Guttsayt E.M., Kurushin A.A. Reshenie opticheskikh i SVCh zadach s pomoshch'yu HFSS [Solving optical and microwave problems using HFSS]. Moscow: OOO «Orkada», 2012, 250 p.
14. Patrick Hindle. 5 Leading EDA Tools for EMC/EMI Design Challenges, *Microwave journal*, 2017, No. 7, pp. 20-40.
15. Sayt kompanii-razrabotchika programmnoogo produkta ANSYS EMIT [Website of the company-developer of the software product ANSYS EMI]. Available at: <https://www.ansys.com/products/electronics/radio-frequency-interference>.
16. Sayt kompanii-razrabotchika programmnoogo produkta NX [Website of the company that develops the NX software product]. Available at: <https://www.ideal-plm.ru/uEditor/files/4/397/ObzorNX.pdf>.
17. Emmanuel Perrin, Fabrice Tristant, Christophe Guiffaut, Fabien Terrade, Alain Reineix. A 3D Model to compute lightning and HIRF coupling effects on avionic equipment of an aircraft, *2012 ESA Workshop on Aerospace EMC*, May 2012, Venise, Italy, pp. 1-5.
18. Cui Y. and Cui C. A developing method of aircraft HIRF/L preventive maintenance program, *2013 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE), Chengdu, 2013*, pp. 1215-1218.
19. Nalbantoglu C., Kiehl T., God R., Stadler T., Kebel R. and Bienert R. Electromagnetic compatibility (EMC) for integration and use of near field communication (NFC) in aircraft, *2016 ESA Workshop on Aerospace EMC (Aerospace EMC), Valencia, 2016*, pp. 1-6.
20. DO-294C - Guidance on Allowing Transmitting Portable Electronic Devices (T-PEDS) on Aircraft, Washington, DC, USA, 2008.
21. DO-307 - Aircraft Design and Certification for Portable Electronic Device (PED) Tolerance, Washington, DC, USA, 2007.

Статью рекомендовала к опубликованию д.ф.-м.н., профессор Л.В. Черкесова.

**Можайцев Виталий Павлович** – Южный федеральный университет; e-mail: [mvp\\_emc@inbox.ru](mailto:mvp_emc@inbox.ru); 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +79094302590; студент 2 курса магистратуры.

**Семенихина Диана Викторовна** – e-mail: [d\\_semenikhina@mail.ru](mailto:d_semenikhina@mail.ru); тел.: + 79094412058; кафедра АиРПУ; д.т.н.; профессор.

**Mozhaytsev Vitaliy Pavlovich** – Southern Federal University; e-mail: [mvp\\_emc@inbox.ru](mailto:mvp_emc@inbox.ru); 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79094302590; 2nd year student.

**Semenikhina Diana Viktorovna** – e-mail: [d\\_semenikhina@mail.ru](mailto:d_semenikhina@mail.ru); phone: + 79094412058; the department of A&RTD; dr. of eng. sc.; professor.