

УДК 621.371.32

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ В ВИДЕ ИЗЛУЧАЕМОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ВО ВНУТРЕННЕМ ПРОСТРАНСТВЕ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Жихарев Д.Ю.¹, Кириллов В.Ю.^{2*}

¹ *Ракетно-космическая корпорация «Энергия»,
ул. Ленина, 4А, Королев, Московская обл., 141070, Россия*

² *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

** e-mail: k309@mai.ru*

Представлен метод моделирования электромагнитной обстановки (ЭМО) бортовых систем космических аппаратов (КА). Суть метода состоит в замене реальных бортовых приборов (БП), излучающих электромагнитные помехи (ЭМП), эквивалентными источниками. Преимущество метода заключается в том, что он позволяет при небольшом количестве экспериментальных измерений моделировать ЭМО, создаваемую БП. Исследования реальных образцов БП позволяет значительно повысить точность моделирования ЭМО вследствие индивидуального характера электромагнитных помех в электрических схемах каждого из приборов. Данный метод позволяет моделировать ЭМО с учетом геометрических размеров и взаимного расположения приборов в любом месте КА.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, электромагнитная обстановка, моделирование.

Возрастающая сложность бортового электронного оборудования современных КА, увеличение количества бортовых электронных устройств, миниатюризация элементной базы приводят к увеличению количества излучаемых электромагнитных помех, создаваемых бортовой аппаратурой КА и бортовой кабельной сетью (БКС) во внутреннем пространстве конструкции КА. В результате увеличивается количество наведенных кондуктивных помех в электрических цепях БКС, соизмеримых с полезными сигналами [1, 2].

Реализация все более сложных алгоритмов управления, использование против КА источников преднамеренных электромагнитных помех повышают актуальность решения задач электромагнитной совместимости КА.

Технические задания на проектирование бортовой электронной аппаратуры КА содержат требования по электромагнитной совместимости (ЭМС), которые должны учитываться, начиная с первых этапов проектирования: разработки конструкции и схем бортовых электронных устройств, приборов и систем [2].

Проблемы ЭМС в электрооборудовании и во всем разнообразии технических средств стали настолько актуальными, что игнорирование данных проблем на более поздних этапах проектирования изделия влечет за собой большие материальные затраты, возрастающие в геометрической прогрессии в зависимости от этапа проектирования изделия.

Одним из перспективных направлений при разработке новых систем КА с учетом ЭМС, а также при внедрении новых модулей в существующие системы является моделирование ЭМО. Моделирование ЭМО позволяет предварительно оценить уровни излучаемых ЭМП в любой точке конструкции КА и сделать вывод о необходимости повышения помехоустойчивости системы или изменения штатных трасс прокладки жгутов кабелей. Моделирование ЭМО может применяться для синтеза новых систем и совместного расположения оборудования в безопасных зонах с учетом ЭМС.

Электромагнитное моделирование приборов на основе их проекта или чертежной документации является почти нереализуемой задачей ввиду высокой сложности и трудоемкости создания полных электромагнитных моделей многочисленных компонентов бортовых приборов и их непредсказуемого электромагнитного взаимодействия внутри БП. Нецелесообразно моделировать целый участок КА с множеством приборов и кабелей, так как это потребует больших трудозатрат и неоправданно с точки зрения точности получаемого результата, поскольку каждый из выполненных образцов одного и того же БП будет отличаться от других по своему электромагнитному воздействию на окружающие его устройства [1, 5]. Абсолютно идентичных устройств с этой точки зрения не бывает.

Единственным подходящим способом моделирования бортовых приборов с точки зрения приемлемой погрешности оценки ЭМО и трудоемкости является моделирование с использованием реальных объектов — бортовых устройств. Предлагаемый способ моделирования позволит по небольшому количеству контрольных измерений вокруг прибора восстановить его электромагнитный «портрет», который даст возможность расчетным способом определить электромагнитное поле прибора в любой точке пространства вокруг него. Это даст возможность провести анализ электромагнитной обстановки внутри КА с множеством приборов, выдать рекомендации по прокладке трактов (высокой частоты и низкой частоты) с целью минимизации наводок на них, а также по взаимному размещению проанализированных приборов [1, 4, 5].

Простыми измерениями поля в безэховой камере обойтись не удастся ввиду того, что по мере удаления от источника напряженность поля постоянно меняется и предсказать ее динамику невозможно без большого числа контрольных измерений вокруг прибора [1]. В соответствии со стандартом MIL-STD-461F измерения напряженностей электрического или магнитного полей производятся на расстоянии 1 м от испытываемого технического сред-

ства (ИТС). На более близких расстояниях от ИТС метрологические характеристики антенн ухудшаются и точно оценить напряженность излучаемого поля не представляется возможным [1, 2].

В реальных условиях промежутков, разделяющих электронную аппаратуру при установке на борту КА, значительно меньше 1 м и зачастую составляет несколько сантиметров, и игнорирование того факта, что на сверхблизких расстояниях от источника излучаемых ЭМП напряженность поля может существенно отличаться от измеренной и вдобавок увеличиться за счет соседних БП, может привести к тому, что установленные модули будут подвергаться воздействию излучаемых ЭМП, в виде электромагнитного поля, в разы большего экспериментально измеренного по существующим методикам. В связи с этим существует большой риск того, что БП будут функционировать неправильно или не функционировать вовсе [1, 2].

Параметры ЭМО предлагается оценивать с использованием моделей, построенных на основе контрольных измерений показаний реальных образцов БП с последующей заменой реальных источников эквивалентными при помощи формул классической электродинамики [1, 3].

Замена реального БП эквивалентным источником основывается на преимущественном виде поля, которое генерирует рассматриваемое устройство или БП. В ближней зоне соотношение напряженностей электрического и магнитного полей зависит от источника помех и расстояния от источника. Так, если в электрических цепях бортового устройства протекают значительные токи (например, в десятки ампер, при относительно малых напряжениях — десятки вольт), то в ближней зоне преобладает магнитное поле. В свою очередь, у бортовых устройств с высокими напряжениями в электрических цепях и относительно низкими значениями токов в ближней зоне преобладает электрическое поле [1, 3].

В соответствии с установленным типом эквивалентного источника подбирается одна из четырех формул, описывающих зависимость убывания напряженности электрического или магнитного поля от расстояния между источником поля (электрический диполь — в случае если генерируется преимущественно электрическое поле, магнитная рамка — если магнитное) и пространственной точкой измерения.

Формулы, выражающие зависимость напряженности поля от расстояния, являются решением уравнений Максвелла при использовании обобщенных электродинамических потенциалов:

$$\underline{E}_\theta = \frac{I \sin \theta \frac{\omega^2}{c^3}}{4\pi \epsilon_a} e^{-j\left(\frac{\omega R}{c} + \frac{\pi}{2}\right)} \left[\frac{-1}{\omega R} + \frac{j}{\omega^2 R^2} + \frac{1}{\omega^3 R^3} \right]; \quad (1)$$

$$\underline{E}_R = \frac{I \cos \theta \frac{\omega^2}{c^3}}{2\pi \epsilon_a} e^{-j\left(\frac{\omega R}{c} + \frac{\pi}{2}\right)} \left[\frac{j}{\omega^2 R^2} + \frac{1}{\omega^3 R^3} \right], \quad (2)$$

где \underline{E}_θ — тангенциальная составляющая комплексной амплитуды напряженности электрического поля;

\underline{E}_R — радиальная составляющая комплексной амплитуды напряженности электрического поля;

I — сила тока, протекающего в электрических цепях ИТС;

l — длина элемента тока;

$0 \leq \theta \leq 180^\circ$ — угол между осью Z (вертикальная ось) и отрезком, соединяющим начало сферических координат и точку P (конец вектора R). В случае, когда эквивалентный генератор поля моделируется

элементом тока, принимается $\theta = \frac{\pi}{2}$, что позво-

лит исключить составляющую \underline{E}_R при моделировании источника излучения;

R — расстояние от источника генерации поля до точки его измерения;

$\omega = 2\pi f$ — рабочая частота ИТС (угловая);

f — рабочая частота ИТС;

$c = 3 \cdot 10^8$ — скорость света в вакууме, м/с;

$\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon_r = 8,86 \cdot 10^{-12}$ — абсолютная диэлектрическая проницаемость, Ф/м;

$\epsilon_r = 1,0006$ — относительная диэлектрическая проницаемость воздуха;

$\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ — электрическая постоянная, Ф/м.

Формулы (1) и (2) характеризуют изменение напряженности электрического поля по мере удаления от эквивалентного источника поля (элемента тока).

В сферической системе координат у вектора H только одна проекция H_ψ отлична от нуля — аксиальная составляющая комплексной амплитуды напряженности магнитного поля:

$$\underline{H}_\psi = \frac{I \sin \theta \frac{\omega^2}{c^2}}{4\pi} e^{-j\frac{\omega R}{c}} \left[\frac{j}{\omega R} + \frac{1}{\omega^2 R^2} \right]. \quad (3)$$

Формула (3) выражает изменение напряженности магнитного поля по мере удаления от эквивалентного источника генерации (элемента тока).

Для источника поля в виде рамки с током в сферической системе координат у вектора только одна проекция \underline{E}_ψ отлична от нуля:

$$\underline{E}_\psi = \frac{\mu_a I S \omega \cos \psi \frac{\omega^2}{c^2}}{4\pi} e^{-j\left(\frac{\omega R}{c} + \frac{\pi}{2}\right)} \left[\frac{j}{\omega R} + \frac{1}{\omega^2 R^2} \right], \quad (4)$$

где S — площадь магнитной рамки;

$\mu_a = \mu_0 \mu_r = 1,25663152 \cdot 10^{-7}$ — абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м;

$\mu_r = 1,00000037$ — относительная магнитная проницаемость;

$\mu_0 = 1,25663706 \cdot 10^{-6}$ — магнитная постоянная, Гн/м;

$0 \leq \psi \leq 180^\circ$ — угол между осью Z (вертикальная ось) и отрезком, соединяющим начало сферических координат и точку P (конец вектора R).

В случае, когда эквивалентный генератор поля моделируется магнитной рамкой, принимается $\psi = 0$, что позволит исключить составляющую \underline{E}_ψ при моделировании источника излучения.

Формула (4) выражает изменение напряженности электрического поля по мере удаления от эквивалентного источника генерации (магнитной рамки).

Формулы для напряженности магнитного поля, создаваемого источником в виде рамки с током, имеют вид:

$$\underline{H}_\theta = \frac{I S \cos \psi \frac{\omega^3}{c^3}}{4\pi} e^{-j\frac{\omega R}{c}} \left[\frac{-1}{\omega R} + \frac{j}{\omega^2 R^2} + \frac{1}{\omega^3 R^3} \right]; \quad (5)$$

$$\underline{H}_R = \frac{I S \sin \psi}{2\pi} e^{-j\frac{\omega R}{c}} \left[\frac{j}{\omega^2 R^2} + \frac{1}{\omega^3 R^3} \right], \quad (6)$$

где H_θ — тангенциальная составляющая комплексной амплитуды напряженности магнитного поля;

H_R — радиальная составляющая комплексной амплитуды напряженности магнитного поля.

Формулы (5) и (6) выражают изменение напряженности магнитного поля по мере удаления от эквивалентного источника излучения (магнитной рамки).

Изменяя значения силы тока I и длины проводника (элемента тока) l , или площади магнитной рамки S в зависимости от моделируемого случая (эквивалентный генератор поля — элемент тока или магнитная рамка), можно достигнуть совпадения теоретической зависимости распределения функции с экспериментально измеренными значениями в промежутке расстояний от 1 до 1,5 м от ИТС.

Предлагаемый способ моделирования ЭМО на борту КА сводится к поочередному моделированию работающих в некоторой области электротехнических устройств и последующему объединению их в систему для определения параметров напряженностей их совместного поля в любых точках моделируемого сегмента КА.

Моделирование каждого электротехнического средства в отдельности состоит в предварительной замене его эквивалентным источником с учетом

значений силы тока и напряжения в их электрических схемах [3]. Предварительная замена заключается в подборе параметров эквивалентного источника, основанном на совпадении динамики распределения напряженности поля на некотором удалении от источника. В дальнейшем получившийся эквивалентный источник моделируется в программной среде Ansoft HFSS Studio с учетом геометрических размеров реального моделируемого электротехнического оборудования.

На рис. 1—3 приведены примеры моделирования имитаторов БП (имитационных моделей) при помощи предложенного метода. В качестве имитаторов БП использовались металлические конструкции в виде кубических медных корпусов с подключенными генераторами для создания излучаемых ЭМП.

Выводы

Предложен метод моделирования ЭМО в конструкции КА, основанный на расчете напряженностей электрического и магнитного полей, создаваемых БП. Отличительной чертой представленного метода является возможность вычисления напряженности результирующего поля, излучаемого всеми БП в любой точке пространства конструкции КА.

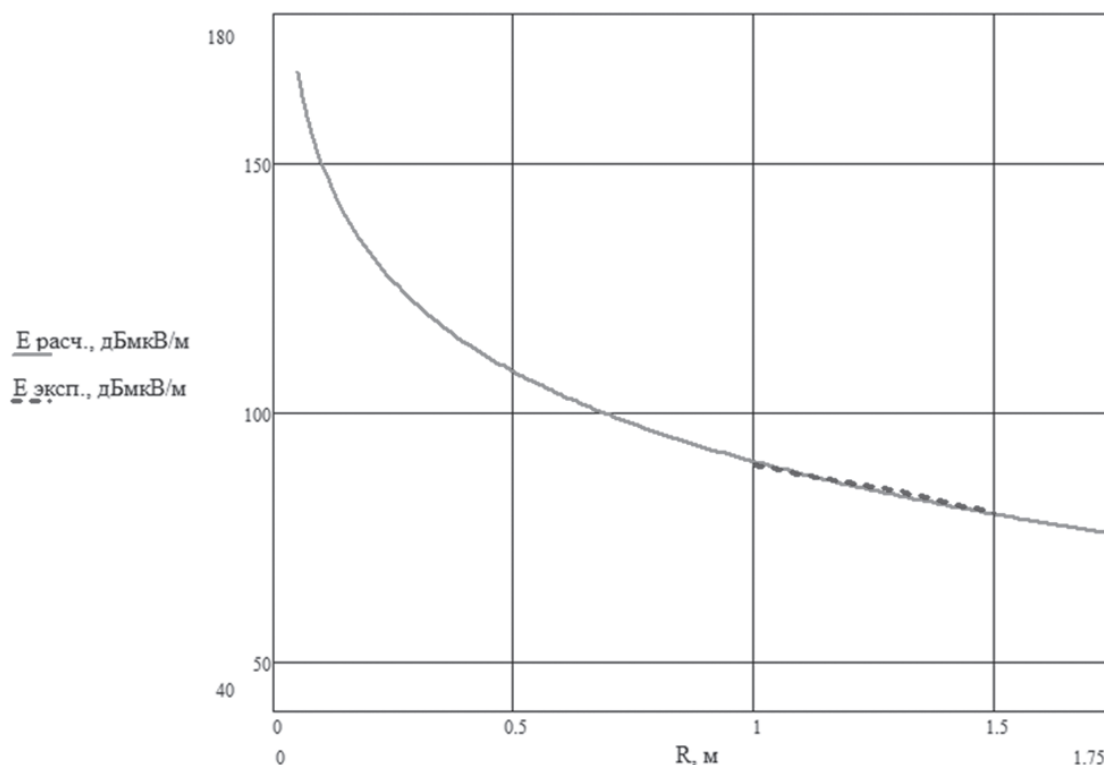
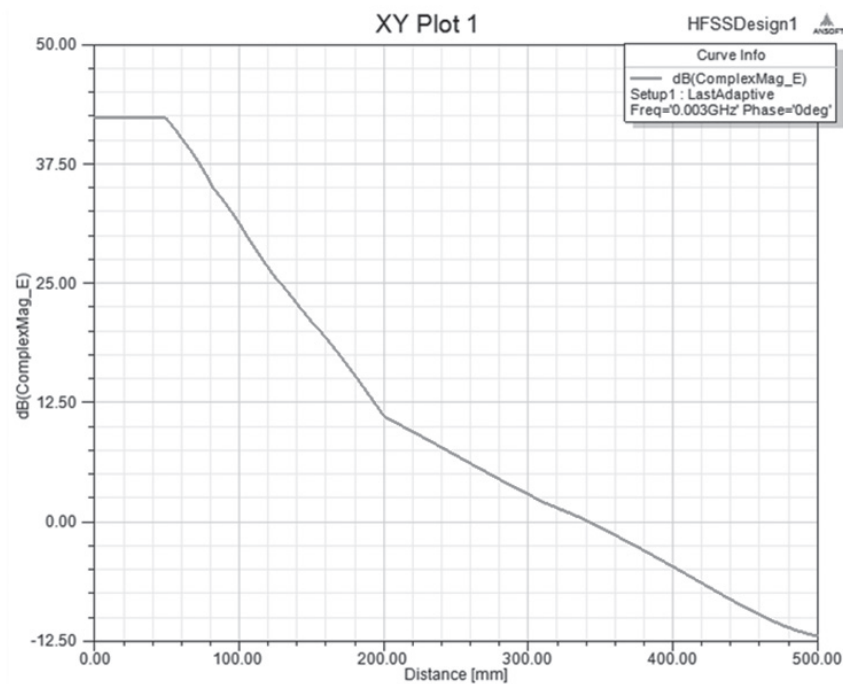
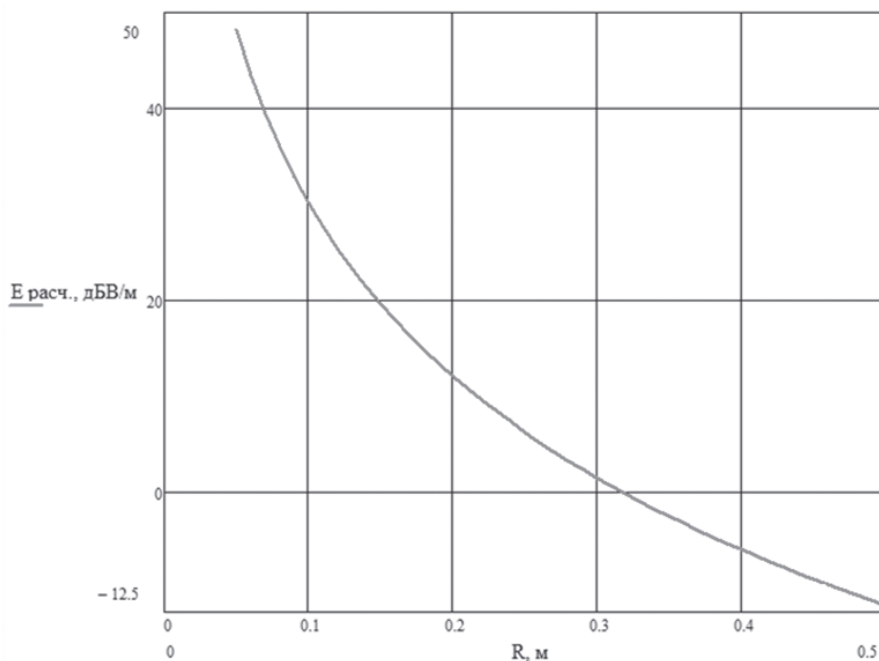


Рис. 1. Пример замены имитатора БП эквивалентным источником на основании совпадения динамики распределения напряженности электрического поля по мере удаления от БП: $E_{расч}$ — напряженность поля, создаваемого рассчитанным эквивалентным источником; $E_{эксп}$ — экспериментально полученная характеристика напряженности электрического поля, измеренная в диапазоне расстояний от 1 до 1,5 м с шагом 0,1 м



а)



б)

Рис. 2. Пример моделирования имитатора БП в программной среде Ansoft HFSS Studio на основе совпадения функций распределения электрического поля по мере удаления от его источника: а — от модели, построенной в программной среде; б — от эквивалентного источника

Данный метод моделирования ЭМО может быть успешно использован для решения ряда задач конструкционного проектирования бортовых систем КА, которое заключается в определении оптимального с точки зрения ЭМС пространственного расположения БП.

Библиографический список

1. Кириллов В.Ю. Электромагнитная совместимость летательных аппаратов. — М.: МАИ, 2012. — 164 с.
2. Электромагнитная совместимость технических средств подвижных объектов. Учебное пособие / Под ред. В.П. Булекова. — М.: МАИ, 2004. — 648 с.

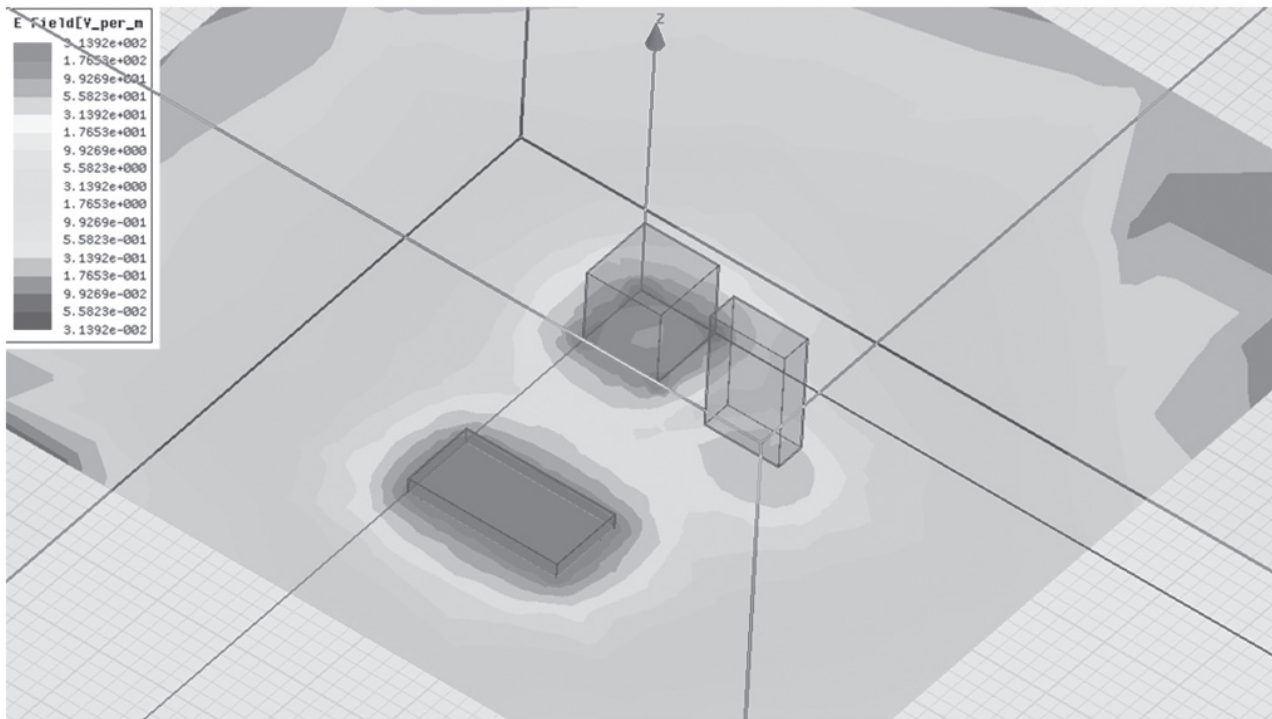


Рис. 3. Пространственное распределение электрического поля, создаваемого тремя имитаторами БП

3. Атабеков Г.И., Купалян С.Д., Тимофеев А.Б., Хухриков С.С. Теоретические основы электротехники. Ч. 2 и 3. Нелинейные электрические цепи. Электромагнитное поле. — М.: Энергия, 1979. — 432 с.
4. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн: Учеб. пособие для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. — 544 с.
5. Кириллов В.Ю., Марченко М.В., Томилин М.М. Электромагнитная совместимость бортовой кабельной сети летательных аппаратов. — М.: Изд-во МАИ, 2014. — 172 с.

MODELING OF ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENT AS A RADIATED FIELD IN THE INTERNAL SPACECRAFT STRUCTURES

Zhikharev D.Yu.¹, Kirillov V.Yu.^{2*}

¹ Rocket-Space Corporation "Energia",

4A, Lenin str., Korolev, Moscow region, 141070, Russia

² Moscow Aviation Institute (National Research University),

MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia

* e-mail: k309@mai.ru

Abstract

Modeling of the electromagnetic environment is a promising direction of designing the systems on board the spacecraft

Modeling electromagnetic environment allows you to define the levels of radiated electromagnetic

interference in different parts of the spacecraft structure and draw conclusions on the need to improve on-board equipment and changing ways of laying cables.

The paper presents a method of electromagnetic environment modeling of systems on board the spacecraft. The method consists in replacing the real on-

board devices, emitting electromagnetic interference (EMI), by equivalent sources. The advantage of the method is that it allows recreate electromagnetic environment created by on-board devices and a small number of experimental measurements. Studies of real samples of on-board devices can significantly improve modeling accuracy of electromagnetic environment due to the individual features of electromagnetic interference in electrical circuits of each of the devices. This method allows model electromagnetic environment according to geometric dimensions and arrangement of devices anywhere in the spacecraft.

The paper gives examples of modeling of on-board instruments on the basis of the proposed method. As imitators corps on-board devices used metal construction of a cubic structure with attached generators. Initially, the electric field strength is measured using an antenna, then calculates the values of the field theoretical method. The modeling results are presented in the form of the spatial distribution of the electric field.

Keywords: electromagnetic compatibility, electromagnetic environment, modeling.

References

1. Kirillov V.Yu. *Elektromagnitnaya sovmestimost' letatel'nykh apparatov* (Electromagnetic compatibility of aircraft), Moscow, MAI, 2012, 164 p.
2. Bulekov V.P. *Elektromagnitnaya sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv podvizhnykh ob"ektov* (Electromagnetic compatibility of technical means of moving objects), Moscow, MAI, 2004, 648 p.
3. Atabekov G.I., Kupalyan S.D., Timofeev A.B., Khukhrikov S.S. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* (Theoretical Foundations of Electrical Engineering), Moscow, Energiya, 1979, part 2 and 3, 432 p.
4. Nikol'skii V.V., Nikol'skaya T.I. *Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln* (Electrodynamics and propagation of radio waves), Moscow, FIZMATLIT, 1989, 544 p.
5. Kirillov V.Yu., Marchenko M.V., Tomilin M.M. *Elektromagnitnaya sovmestimost' bortovoi kabel'noi seti letatel'nykh apparatov* (Electromagnetic compatibility of aircraft onboard cable network), Moscow, MAI, 2014, 172 p.