

УДК 004.942;621.316.1.05

ПРОЕКТНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ РЕГУЛИРУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Ю.М. Казанцев***, И.С. Костарев**, А.Ф. Лекарев**

*Томский политехнический университет

**ОАО «НПЦ «Полус», г. Томск

E-mail: polus@online.tomsk.net

Представлена методика анализа электромагнитной совместимости силовых электронных систем космических аппаратов. Приведены результаты вычисления частотного спектра электромагнитных помех по напряженности электрического и магнитного полей и дано сравнение их с экспериментальными данными.

Ключевые слова:

Электромагнитная совместимость, методика, имитационная модель, напряженность электрического поля, напряженность магнитного поля, преобразование Фурье, дифференцирование.

Key words:

Electromagnetic compatibility, procedure, imitating model, electric intensity, magnetic intensity, Fourier transform, differentiation.

При проектировании регулирующей аппаратуры систем электропитания космических аппаратов, осуществляющей распределение и регулирование потоков энергии между первичными источниками, промежуточными накопителями и нагрузкой, большое внимание уделяется обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС). Это связано с тем, что наблюдается тенденция роста мощностей, рабочих частот, усложняется функционал и состав бортовой аппаратуры, уменьшаются ее массогабаритные размеры и увеличивается плотность компоновки, что приводит к увеличению уровня излучаемых электромагнитных помех (ЭМП).

Эффективной мерой, позволяющей улучшить характеристики ЭМС, является проведение предварительной теоретической оценки и расчетов ЭМП регулирующей аппаратуры космических аппаратов путем моделирования электромагнитных процессов.

Для расчета уровней ЭМП разработана методика проектного анализа ЭМС, обеспечивающая, в отличие от традиционных методов исследования, основанных на формировании эквивалентных схем замещения и моделей сигналов для анализа различных видов помех, расчет амплитудно-частотного спектра помех во всем заданном диапазоне частот на основе использования высокочастотных моделей, учитывающих паразитные параметры и связи элементов схемы и конструкции.

Проектный анализ ЭМС в соответствии с требованиями стандартов Европейского космического агентства включает: оценку требований технического задания по допустимым пиковым значениям напряженности электрического и магнитного полей узкополосных и широкополосных помех на расстоянии 1 м от поверхности функционирующего прибора в заданном диапазоне частот, ранжирование источников помех, расчет уровня излучаемых помех по напряженности электрического и магнитного полей.

В регулирующей аппаратуре основными источниками помех являются токовые контуры, включающие транзисторы, диоды, дроссели, входные и выходные конденсаторы.

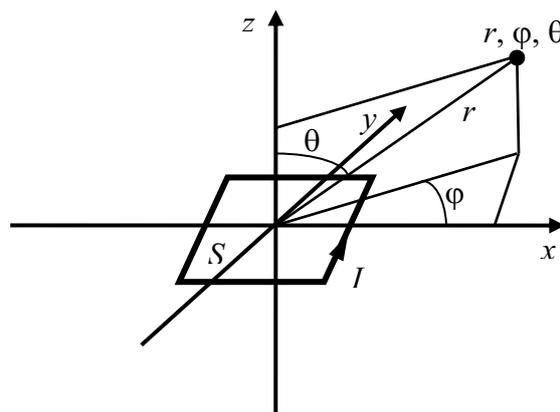


Рис. 1. Система координат для расчета излучения контура малой площади

Расчет контура площадью S , находящегося в диэлектрической среде с магнитной проницаемостью μ и диэлектрической проницаемостью ϵ , по которому течет синусоидальный ток I с длиной волны λ , в соответствии с уравнениями Максвелла для напряженности электрического E и магнитного H полей в точке со сферическими координатами r, φ, θ (рис. 1) осуществляется по формулам [1]:

$$\dot{E}_r = 0; \quad \dot{E}_\theta = 0;$$

$$\dot{E}_\varphi = \frac{2\pi^2(\mu/\epsilon)^{1/2}SI}{\lambda^3}[\lambda/2\pi r - j(\lambda/2\pi r)^2]\sin\theta;$$

$$\dot{H}_r = \frac{4\pi^2SI}{\lambda^3}[j(\lambda/2\pi r)^2 + (\lambda/2\pi r)^3]\cos\theta;$$

$$\dot{H}_\theta = -\frac{2\pi^2SI}{\lambda^3}[\lambda/2\pi r - j(\lambda/2\pi r)^2 - (\lambda/2\pi r)^3]\sin\theta;$$

$$\dot{H}_\varphi = 0.$$

Напряженности электрического и магнитного полей будем рассчитывать исходя из предположения, что E максимальна в плоскости xy ($\theta = \pm 90^\circ$), а H – на оси z ($\theta = \pm 0^\circ, \pm 180^\circ$) [1].

Тогда с учетом того, что $\lambda = c/\omega$ (где c – скорость света, ω – угловая частота)

$$E_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\pi(\mu/\varepsilon)^{1/2}SI\omega^2}{c^2r}\right)^2 + \left(\frac{(\mu/\varepsilon)^{1/2}SI\omega}{2cr^2}\right)^2},$$

$$H_{\max} = \sqrt{\left(\frac{SI}{2\pi r^3}\right)^2 + \left(\frac{SI\omega}{cr^2}\right)^2}. \quad (1)$$

Так как реальный ток элементов в контуре имеет явно выраженный несинусоидальный характер и для анализа ЭМС используются его амплитудно-частотные спектры, а также спектры напряженностей электрического и магнитного полей, то для их построения с учетом описания тока контура по результатам моделирования в виде цифрового массива данных необходимо дискретное преобразование Фурье.

Для построения спектров E и H , уравнение которых (1) содержит зависимости вида $I(t)\omega^n$, непосредственно перед процедурой разложения в ряд Фурье необходимо произвести n -кратное численное дифференцирование исходной функции тока.

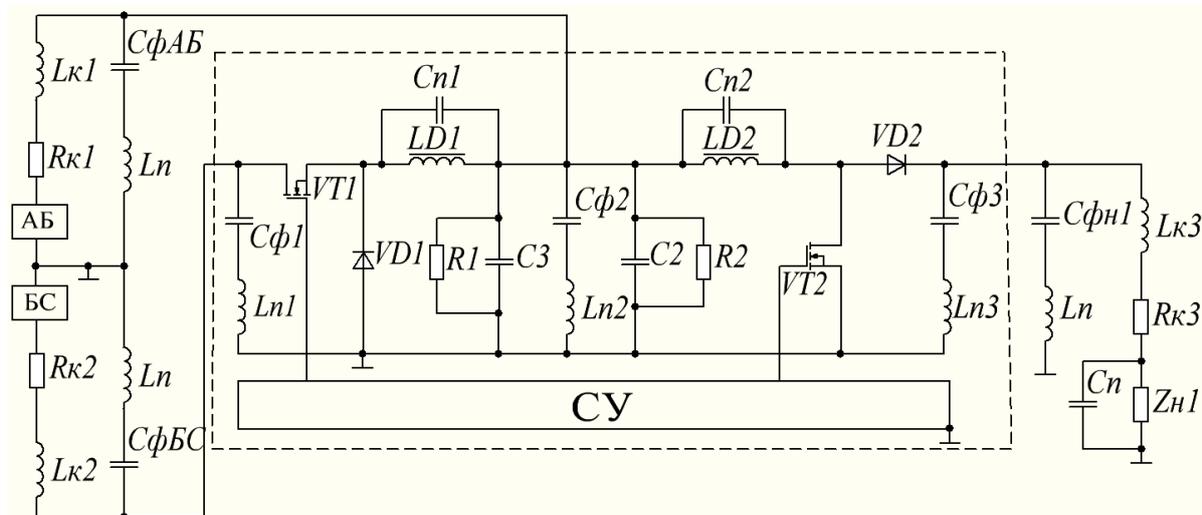


Рис. 2. Схема имитационной модели зарядно-разрядного устройства для исследования ЭМС (АБ – аккумуляторная батарея; БС – батарея солнечная; СУ – схема управления)

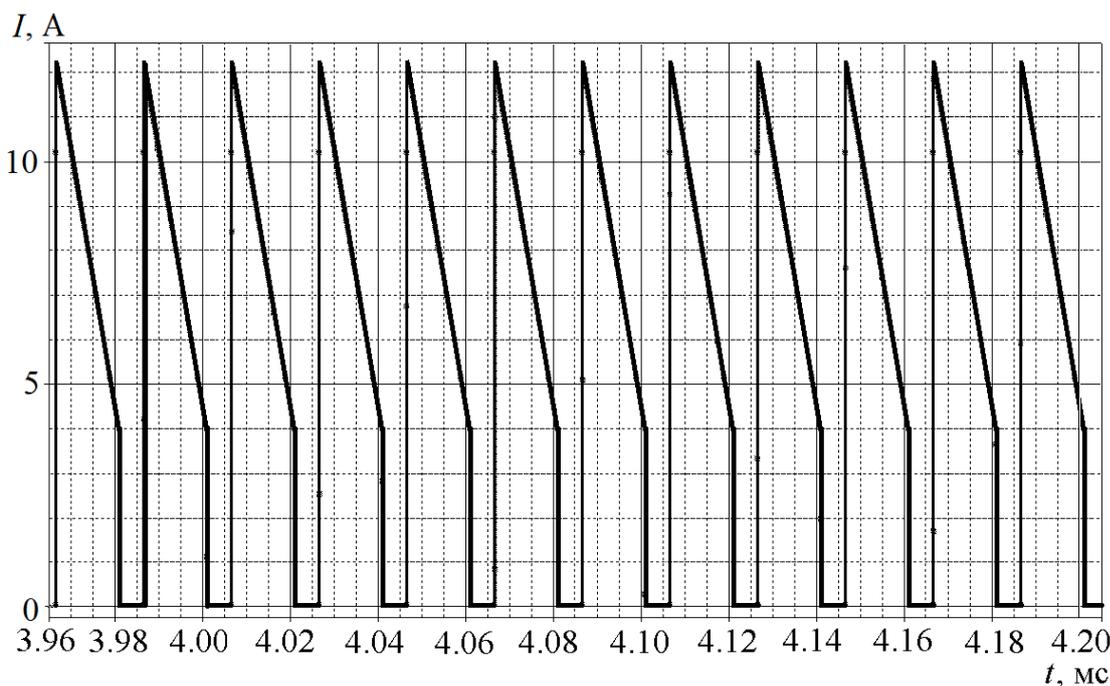


Рис. 3. Ток диодного контура

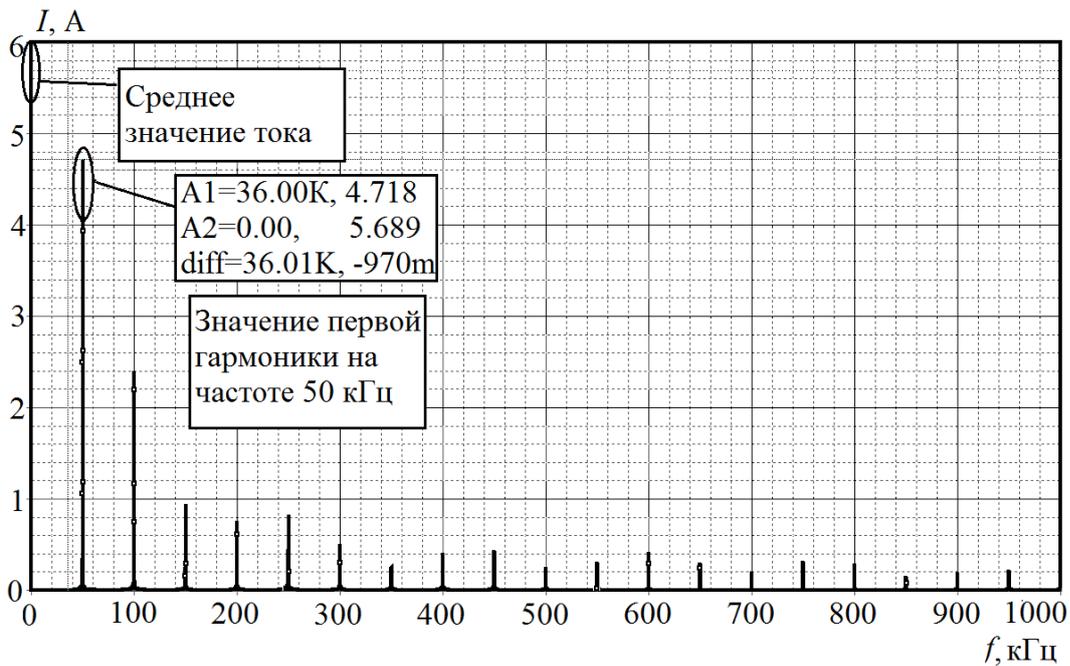


Рис. 4. Спектр тока диодного контура

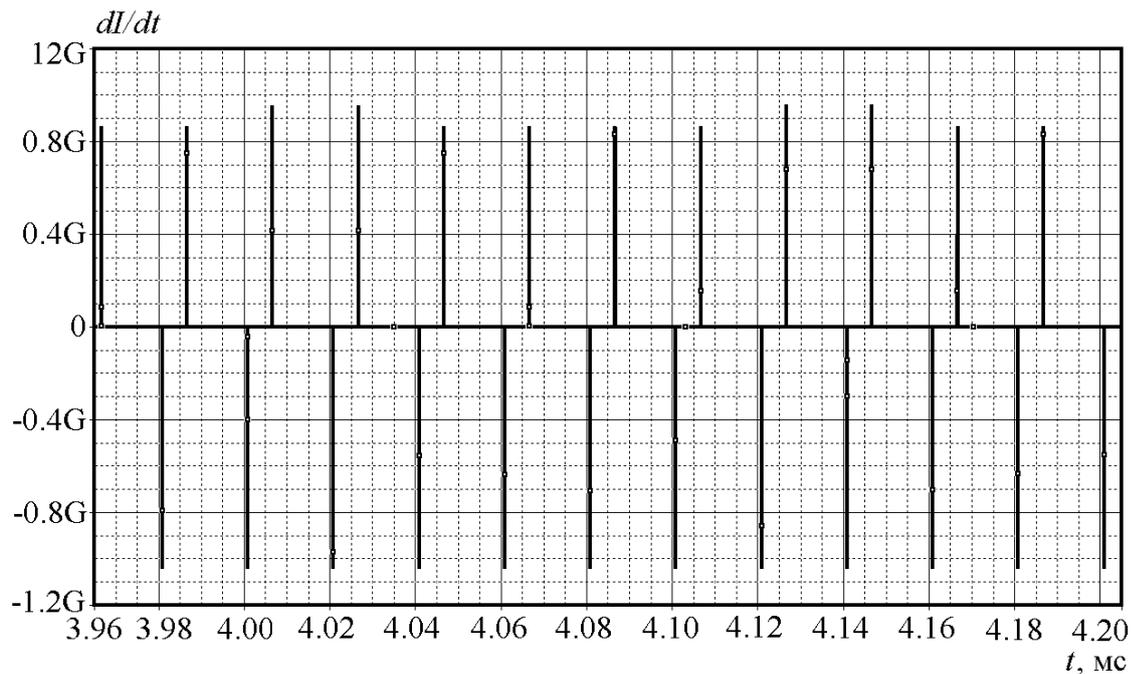


Рис. 5. Производная тока диода

Проведем расчет напряженности электрического поля диодного контура VD1-LD1-C3 по представленной на рис. 2 модели зарядно-разрядного устройства на основе пульсаций тока, полученных в программе PSpice (рис. 3).

Используя дискретное преобразование Фурье, разложим ток диодного контура в спектр (рис. 4).

В соответствии с методикой продифференцируем массив данных тока диодного контура и результат подвергнем процедуре дискретного преобразования Фурье (рис. 5).

Аналогичную процедуру проведем для второй производной тока. Построим спектры составляющей E по первой и второй производным тока с учетом полученной по результатам конструкторской проработки зарядно-разрядного устройства площади диодного контура $S=4,94 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ (рис. 6, 7).

Для проверки правильности подхода вычислим аналитически амплитуды составляющих E в выражении (1) для первой гармоники спектра на частоте 50 кГц

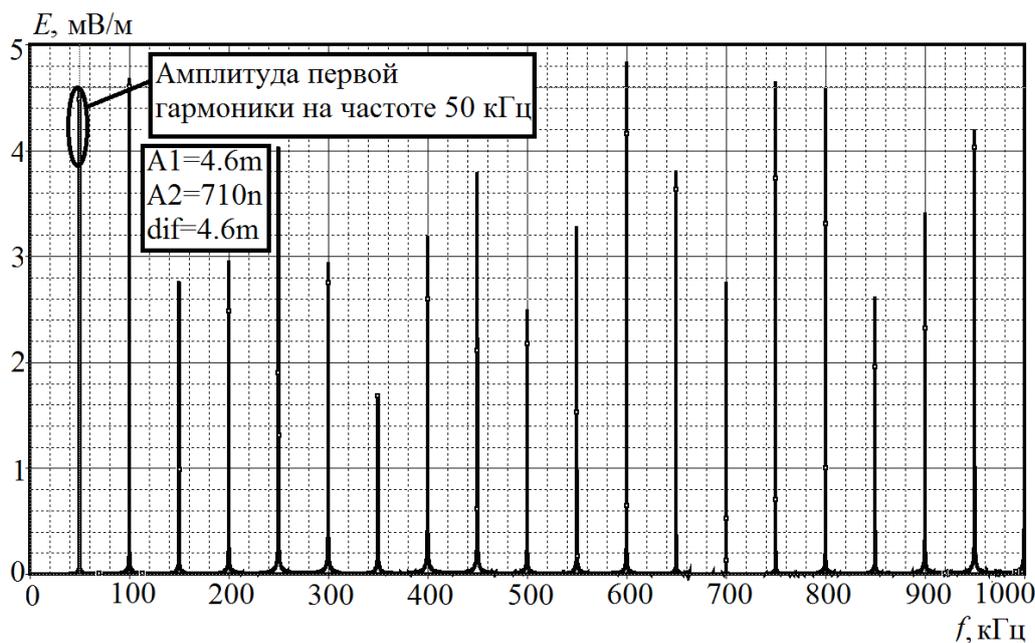


Рис. 6. Спектр составляющей E по первой производной тока

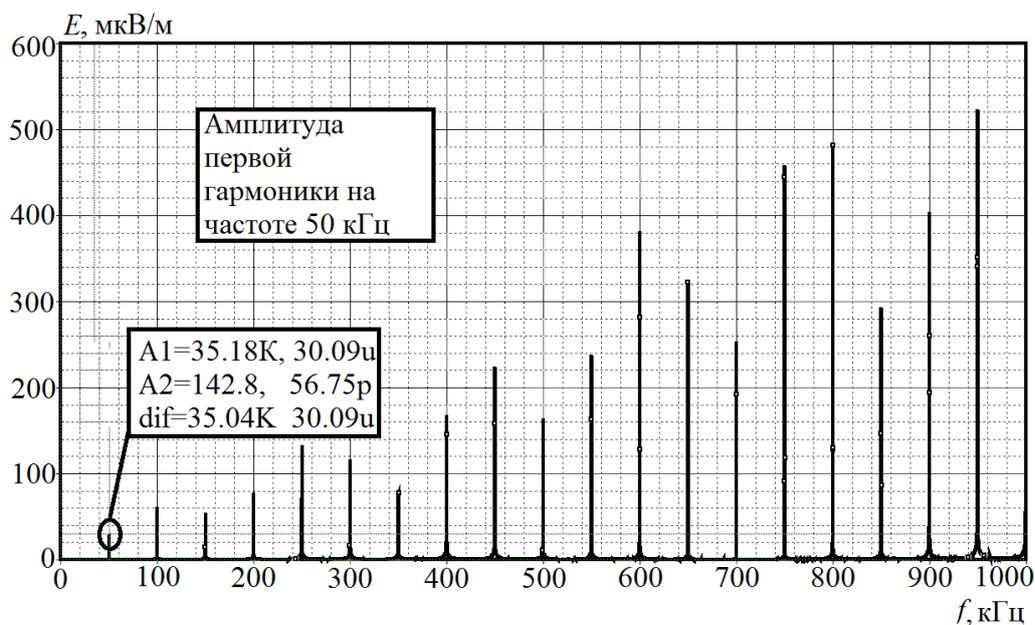


Рис. 7. Спектр составляющей E по второй производной тока

$$E_{\max 1} = \frac{(\mu/\varepsilon)^{1/2} S I_1 \omega}{2cr^2} =$$

$$= \frac{377 \cdot 4,94 \cdot 10^{-3} \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 4,7185}{2 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 1} =$$

$$= 4,601 \text{ мВ/м}, \quad (2)$$

$$E_{\max 2} = \frac{\pi(\mu/\varepsilon)^{1/2} S I_1 \omega^2}{c^2 r} =$$

$$= \frac{4\pi^3 \cdot 377 \cdot 4,94 \cdot 10^{-3} \cdot (50 \cdot 10^3)^2 \cdot 4,718}{9 \cdot 10^{16} \cdot 1} =$$

$$= 30,027 \text{ мкВ/м}. \quad (3)$$

Рассчитанные по формулам (2) и (3) значения и данные, см. рис. 6 и 7 ($E_{\max 1}=4,601$ мВ/м, $E_{\max 2}=30,027$ мкВ/м), совпадают.

Резльтирующее значение напряженности электрического поля в соответствии с (1) равно

$$E_{\max} = \sqrt{E_{\max 1}^2 + E_{\max 2}^2} = 4,601 \text{ мВ/м}.$$

Точно так же можно проверить амплитуду каждой из гармоник.

В качестве примера рассмотрим расчет напряженности электрического и магнитного полей зарядно-разрядного устройства с использованием имитационной модели (рис. 2).

Шаг расчета электромагнитных процессов при заданной ширине спектра функции выбирается в соответствии с теоремой Котельникова [2] по формуле

$$h = 1/2F,$$

где F – заданная ширина спектра функций.

В расчете результирующая напряженность поля определялась путем арифметического сложения полей, излучаемых источниками помех, работающими одновременно. На практике поля складываются с учетом их фаз, и результат будет меньше, но для оценки наихудшего случая такой подход является правомерным.

Полученные при расчете спектры E и H зарядно-разрядного устройства (рис. 2) сравнивались с экспериментальными (рис. 8, 9), измеренными в диапазоне частот от 0 до 30 МГц [3, 4] с помощью квазипикового анализатора спектра FSP 30 в ОАО «НПЦ «Полюс» [5].

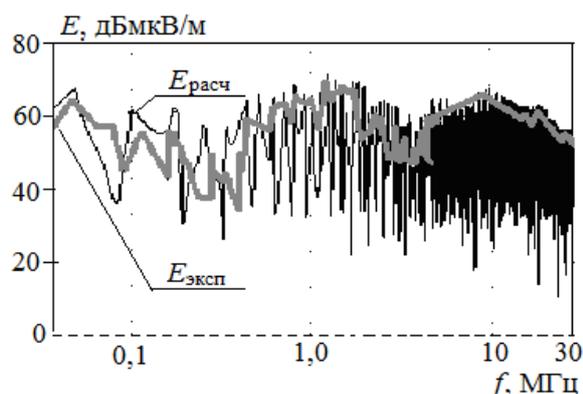


Рис. 8. Значения напряженности электрической составляющей излучаемого электромагнитного поля: $E_{\text{эксп}}$ – экспериментальные; $E_{\text{расч}}$ – расчетные данные

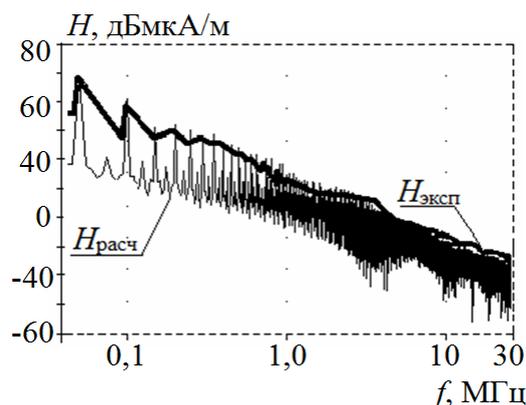


Рис. 9. Значения напряженности электрической составляющей излучаемого электромагнитного поля: $H_{\text{эксп}}$ – экспериментальные; $H_{\text{расч}}$ – расчетные данные

Из рисунков видно, что спектры электрической и магнитной составляющих поля, полученные экспериментальным путем и с помощью моделирования, совпадают в диапазоне частот от 0 до 30 МГц с точностью до 8 %, что говорит о корректности расчетов и правомерности допущений.

Выводы

Методика проектного анализа электромагнитной совместимости регулирующей аппаратуры автономных систем электропитания позволяет рассчитать амплитудно-частотный спектр излучаемых помех во всем заданном диапазоне частот по вычисленному на имитационной модели току и полученной по результатам конструкторской проработки устройства площади контура, что дает возможность управлять уровнем помех на стадиях конструкторской проработки аппаратуры. Адекватность моделей и методики анализа в целом подтверждается совпадением расчетных и экспериментальных данных, полученных при испытаниях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барнс Дж. Электронное конструирование. Методы борьбы с помехами: пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 238 с.
2. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Советское радио, 1971. – 354 с.
3. ГОСТ Р 51319-99. Совместимость технических средств электромагнитная. Приборы для измерения промышленных радиопомех. Технические требования и методы испытаний. – М.: Госстандарт РФ, 2000. – 65 с.
4. ГОСТ Р 51320-99. Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные. Методы испыта-

ний технических средств – источников промышленных радиопомех. Технические требования и методы испытаний. – М.: Госстандарт РФ, 2000. – 27 с.

5. Шкоркин В.В. Обеспечение электромагнитной совместимости бортовых источников вторичного электропитания подавлением сетевых импульсных помех и рациональной компоновкой силовых элементов: автореф. дис. ... к.т.н. – Томск, 2010. – 129 с.

Поступила 30.06.2010 г.