

## **Анализ нормируемых параметров электромагнитной совместимости блоков бортовой аппаратуры малых космических аппаратов**

***П.Ю. Вацков***

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
г. Москва, Россия*

*p.vatskov@gmail.com*

Малые космические аппараты предназначены для исследований Земли, Луны, Марса, а также для организации связи. Блоки, входящие в состав малых космических аппаратов, относятся к устройствам вычислительной техники.

Проведен анализ принятого в настоящее время подхода к составлению раздела технических заданий, регламентирующего испытания на электромагнитную совместимость (ЭМС) составных частей малых космических аппаратов. Рассмотрено два аспекта: формулирование требований ЭМС в техническом задании и нормирование численных значений параметров ЭМС. Показано, что принятая в рассмотренных проектах технического задания терминология отличается от требований действующих стандартов. Предложено при установке норм для электронных блоков в составе малых космических аппаратов нормировать параметры ЭМС модулей, из которых состоит блок, как отдельную техническую характеристику блока.

Методы оперативного контроля стимулируют разработчиков эффективно испытывать модули и своевременно вносить коррективы в их конструкцию.

*Ключевые слова:* электромагнитная совместимость; малые космические аппараты; нормирование; испытания; эмиссия; устойчивость.

*Для цитирования:* Вацков П.Ю. Анализ нормируемых параметров электромагнитной совместимости блоков бортовой аппаратуры малых космических аппаратов // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т.22. – №3. – С. 292–298.

# **Analysis of Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Small Space Vehicles' Equipment**

*P.Yu. Vatskov*

*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

*p.vatskov@gmail.com*

Small space vehicles are intended for investigations of the Earth, the Moon, the Mars and, also, for organization of communication.

The up-to-date approach to making up a section of specifications has been considered. This approach regulates the tests on electromagnetic compatibility (EMC) of the components for small space vehicles. Two aspects have been considered: the formulation of the EMC requirements in the specification and normalization of numerical values of the EMC parameters. It has been shown that the terminology, adopted in the projects considered, differs from the requirements of the effective standards. It has been proposed while establishing the norms for electronic blocks as a part of small space vehicles to normalize the EMC modules, composing the block, as a separate technical characteristic of the block.

The operative control methods stimulate developers to efficiently test the modules and in due time to make corrections in their construction.

*Keywords:* electromagnetic compatibility; small space vehicles; standardization; test; emission; susceptibility.

*For citation:* Vatskov P.Yu. Analysis of Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Small Space Vehicles' Equipment // Proc. of universities. Electronics. – 2017. – Vol.22. – №3. – P. 292–298.

**Введение.** В настоящее время ведется разработка малых космических аппаратов (МКА), предназначенных для исследований Земли, Луны, Марса и для организации связи. В составе всех МКА имеются блоки, относящиеся к устройствам вычислительной техники. Они выполняют следующие функции: получение, обработку, формирование, передачу данных в бортовой вычислительный комплекс; прием, обработку команд от бортового вычислительного комплекса, формирование команд для исполнительных устройств автоматики на борту. Блоки такого предназначения в технических заданиях (ТЗ) на разработку чаще всего называют «блоком управления», «телеметрической системой», «адаптером связи». Все функции назначения этих устройств совпадают с действующим стандартом [1], в котором «совокупность подсистем и устройств, обеспечивающих сбор телеметрической информации на борту объекта, ее обработку, запоминание, представление экипажу, формирование и ввод в канал связи для передачи» называется «бортовой информационной телеметрической системой». Это определение выделяет объекты, относительно которых рассматривается тема, сформулированная в названии.

Проекты ТЗ на разработку блоков содержат требования электромагнитной совместимости (ЭМС). Относительно обеспечения ЭМС для разработчиков существует исходное фундаментальное положение, сформулированное в [2]: «необходимо осуществлять слежение за параметрами ЭМС разрабатываемого изделия в течение всего цикла конструирования таким образом, чтобы исключить возможность слишком позднего об-

наружения сюрпризов, относящихся к несоответствию требованиям ЭМС». Согласно этому положению в целях стандартизации и унификации операций контроля параметров блоков уже на ранних стадиях разработки и для обеспечения достоверности результатов определительных и исследовательских испытаний параметров ЭМС проведен анализ проектов ТЗ, в ходе которого решались следующие задачи:

- выявление, устранение в нормировании параметров ЭМС противоречий, препятствующих однозначному толкованию требований и результатов исследовательских и лабораторно-отрабочных испытаний блоков;
- установление единообразия и соответствия применяемых в ТЗ терминов и определений для нормируемых параметров ЭМС российским и международным стандартам, содержащим единые термины и определения в области ЭМС;
- установление степени адекватности, взаимного соответствия и непротиворечивости соотношений численных значений норм взаимосвязанных параметров ЭМС внутри блоков с учетом их конструктивных особенностей.

**Формулирование требований ЭМС в технических заданиях.** В ходе анализа рассмотрены более десяти проектов ТЗ на разработку блоков бортовой аппаратуры (БА) космических аппаратов. В проектах используются более двадцати различных терминов, которые отсутствуют в стандарте [3]. Например, вместо стандартного термина «норма электромагнитной эмиссии» применяются «допустимые уровни помех», «уровень создаваемой помехи», «допустимое пиковое значение напряженности электрического поля помех». «Норма» часто заменяется отличающимся от него по смыслу термином «уровень». «Устойчивость к электромагнитной помехе» в большинстве случаев заменяется противоположным по значению термином «восприимчивость». Вместо термина «норма устойчивости» употребляются «уровень воздействия», «уровень напряженности испытательного поля» и «воздействие электрическим полем с пиковым значением напряженности  $E$ ».

В результате исполнитель опытно-конструкторской работы вынужден разрабатывать разные методы контроля параметров ЭМС не только по применяемым терминам, но и по содержанию методов.

Другой недостаток нормирования в том, что требования к параметрам ЭМС задаются в различных разделах ТЗ. Лишь в нескольких проектах ТЗ подраздел «Требования электромагнитной совместимости» входил в раздел «Требования радиоэлектронной защиты», как того требует стандарт. В остальных случаях подраздел «Требования электромагнитной совместимости» или содержался в разделе «Специальные требования», или входил в тактико-технические требования в виде части подраздела «Электротехнические требования», или составлял отдельную часть раздела «Тактико-технические требования».

**Нормирование численных значений параметров ЭМС.** Как показали анализ и результаты, задаваемые в проектах ТЗ нормы параметров ЭМС не учитывают существенных свойств блоков нового поколения, разрабатываемых на современной конструкторской и технологической основе.

1. Особенность нормирования требований ЭМС отдельных блоков космического аппарата в том, что необходимо устанавливать параметры ЭМС каждого блока относительно других блоков того же уровня иерархии. При этом нормы электромагнитной эмиссии и нормы помехоустойчивости нужно устанавливать исходя из конструкции блока и уровня электромагнитной совместимости в пространстве между блоками космического аппарата. Перечень заданных норм может содержать уровень ЭМС в меж-

блочном пространстве и норму эмиссии блоком электромагнитных помех в межблочное пространство.

2. Модульный принцип положен в основу конструкции блоков МКА в требованиях ТЗ. Блоки содержат от 5 до 20 (иногда больше) модулей в виде печатных плат. Расстояние между соседними модулями в среднем составляет 2,5 см. Модули выполняют самостоятельные и весьма разные функции. Их питание осуществляется от бортовой сети, как правило от общего модуля питания в составе блока.

3. Минимизация массогабаритных показателей достигается за счет малого расстояния между модулями, большой плотности упаковки, очень высокой объемной плотности токов внутри блока и допуска обратных токов на платах модулей.

4. Между модулями есть взаимное влияние – взаимодействие на близких (0,02–0,05 м) расстояниях через ближнее электромагнитное поле, создаваемое каждым модулем. На указанных расстояниях между модулями в характерном диапазоне частот нет волнового электромагнитного поля.

5. В рабочем режиме БА нет полей промышленных помех, за исключением электромагнитного поля, образуемого самой БА.

6. Согласно требованиям назначения, выполняемым функциям и способам их исполнения модули и блоки в целом совпадают со средствами вычислительной техники, средствами измерений, контроллерами и исполнительными устройствами автоматики. Основные понятия, термины, определения, нормируемые характеристики ЭМС для средств вычислительной техники установлены стандартом [4], который наиболее близок к международному стандарту [5], вследствие чего на блоки не распространяются требования ЭМС, специфические для радиоэлектронных средств.

Как правило, норма эмиссии задается на расстоянии 1 м от испытываемого объекта. Так принято в рассмотренных ТЗ и в стандарте США [6]. Такое нормирование не характеризует электромагнитную обстановку внутри блока и не позволяет оценить влияние модуля на другие модули в блоке. Напряженность поля (как электрического, так и магнитного) возрастает по мере приближения к источнику помех. Поэтому при задании норм для блока нужно задавать еще и норму эмиссии модулями электромагнитных помех и норму помехоустойчивости модулей внутри блока.

Рассмотрим соотношение норм помехоустойчивости и эмиссии полей помех, которые имеются во всех ТЗ, как иллюстрацию допускаемой неадекватности нормирования в ТЗ требований ЭМС. Как исходные, во всех ТЗ нормируются:

- предельно допустимые значения напряженности полей электромагнитного излучения, создаваемого на расстоянии 1 м от поверхности блока, не более  $10^{-3}$  В/м и не более  $10^{-3}$  А/м при частотах до  $10^9$  и  $3 \cdot 10^5$  Гц соответственно;
- минимальное значение воздействующего электромагнитного поля, при котором устройство должно выполнять функции при заданных критериях допустимого количества сбоев, не должно быть менее 1 В/м при частотах до  $3 \cdot 10^8$  Гц и менее  $10^{-1}$  А/м при частотах до  $3 \cdot 10^5$  Гц.

Рассмотрим упрощенную модель блока (рис.1), содержащего две платы модулей, расположенные внутри блока на расстоянии 0,025 м. Пусть при воздействии заданных значений электрического поля  $E = 1$  В/м и магнитного  $H = 0,1$  А/м оба модуля и, следовательно, блок в целом удовлетворяют критериям работоспособности. Допустим также, что при измерении эмиссии блока значения напряженности полей на расстоянии от поверхности  $r_1 = 1$  м оказались в два раза меньше предельной нормы, задаваемой в ТЗ, т.е.  $E(r_1) = 5 \cdot 10^{-4}$  В/м,  $H(r_1) = 5 \cdot 10^{-4}$  А/м. Таким образом, блок в целом соответствует требованиям.

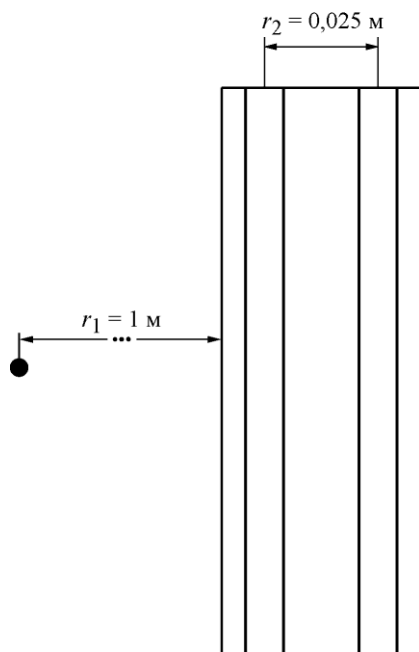


Рис. 1. Упрощенная модель электронного блока

На основе результатов измерений рассчитываются напряженности полей, создаваемых каждым модулем в месте расположения его «соседа» – на расстоянии  $r_2 = 0,025$  м. В различных монографиях, учебниках [7, 8], а иногда и в методиках испытаний предполагается: в «ближней зоне», где  $r < \lambda / 2\pi$  ( $\lambda$  – длина волны в свободном пространстве), волнового поля нет и зависимость  $E \sim r^{-3}$ . Начало дальней зоны, где  $E(r) \sim r^{-1}$  и образуются волны, находится при  $r > D^2 / 2\lambda$ , где  $D$  – характерный размер излучающих элементов. Отметим, что неравенства согласуются в большом диапазоне значений  $r, \lambda$ .

При зависимости  $E \sim r^{-3}$  отношение  $E(r_2)/E(r_1) = 6,3 \cdot 10^4$ . Таким образом, при  $r = 0,025$  м напряженность воздействующих полей на 30 дБ больше, чем установленные нормы воздействия электромагнитного поля,

при котором должна проверяться работоспособность объекта при испытаниях. При таком соотношении нормы эмиссии  $10^{-3}$  В/м на расстоянии 1 м и нормы испытательного воздействия 1 В/м при  $r = 0,025$  м между источником воздействия в блоке и реципиентом излучения не могут быть признаны корректными.

Иногда корректность применения зависимости  $E \sim r^{-3}$  для расчета напряженности поля в ближней зоне вызывает сомнения, несмотря на очевидное уменьшение объемной плотности энергии поля пропорционально  $r^{-3}$  и распространенное в литературе признание этого факта. На этапе лабораторно-отрабочных испытаний эмиссии модулей целесообразно измерять зависимость напряженности поля от расстояния до поверхности устройства.

Проиллюстрируем это положение на примере. Проведены исследования эмиссии магнитного поля макета одного из модулей. При этом для модуля применялась норма эмиссии, заданная для блока на расстоянии 1 м. Магнитное поле измерялось на расстоянии от 1 м до 20 см от объекта испытаний. Результаты показали, что объект создает помеху на одной из частот. На рис. 2 приведена зависимость значений напряженности магнитного поля от расстояния до объекта. Видно, что напряженность магнитного поля имеет вид гиперболы порядка  $-2,8$ . Далее по полученной зависимости рассчитаны значения поля для близких расстояний от объекта. Результаты представлены на рис. 3. Из графика видно, что уровень эмиссии превышает норму устойчивости объекта уже на расстоянии 16 см. При расстоянии 2,5 см, т.е. расстоянии между модулями в блоке, превышение нормы составляет приблизительно 400 раз. Отсюда следует: необходимо отдельно нормировать параметры ЭМС модулей внутри блока. Это позволит разработчикам уже при макетировании электронных устройств оперативно контролировать работу модулей, проводить испытания на ЭМС и своевременно вносить коррективы в топологию электрических схем и конструкцию модулей. Задание норм эмиссии на расстоянии 2 – 5 см от источника позволит проводить испытания вблизи рабочих мест настройщиков и испытателей модулей. Применение современных анализаторов сигналов позволит испытывать макеты разрабатываемых модулей в большинстве случаев без использования экранированной камеры.

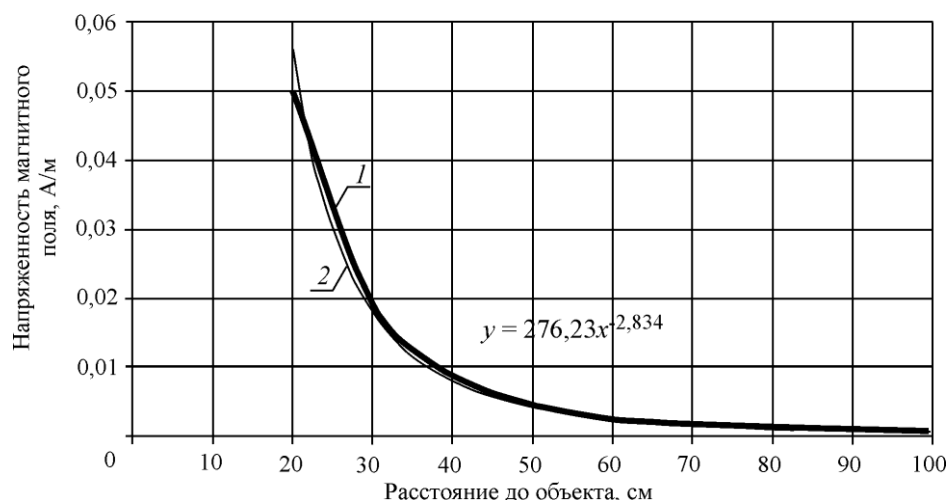


Рис.2. Зависимость напряженности магнитного поля от расстояния до объекта (кривая 1) и аппроксимация данной зависимости степенной функцией (кривая 2)

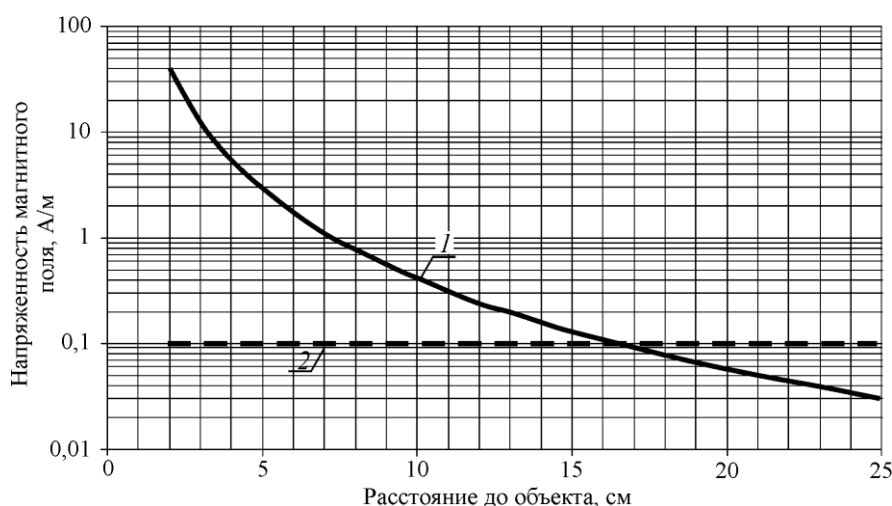


Рис.3. Зависимость напряженности магнитного поля от расстояния до объекта: кривая 1 – расчет; кривая 2 – норма устойчивости к воздействию магнитного поля

**Заключение.** Из результатов анализа проектов ТЗ и проведенных экспериментов следует:

- раздел ТЗ на разработку бортовой аппаратуры космических аппаратов, включающий требования ЭМС, следует составлять с учетом требований современных стандартов;
- целесообразно задавать дополнительные параметры ЭМС, принятые в стандартах, уровень и запас электромагнитной совместимости;
- необходимо внедрять методы оперативного контроля, основанные на измерении параметров ЭМС модулей. Для этого следует отдельно нормировать параметры ЭМС модулей внутри блока.

### Литература

1. ГОСТ 19619-74. Оборудование радиотелеметрическое. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2005. – 20 с.
2. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции. – М.: Изд. дом «Технология», 2003. – 540 с.



3. ГОСТ Р 50397-2011 (МЭК 60050-161:1990). Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2013. – 62 с.
4. ГОСТ 19542-93. Совместимость средств вычислительной техники электромагнитная. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2005. – 9 с.
5. IEC 60050-161:1990. International Electrotechnical Vocabulary. Chapter 161: Electromagnetic compatibility.
6. MIL-STD-461F. Department of defence interface standard: Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment. – URL: <http://snebulos.mit.edu/projects/reference/MIL-STD/MIL-STD-461F.pdf> (дата обращения: 08.09.2016).
7. Уайт Д.Р. ЭМС РЭС и непреднамеренные помехи. Вып. 3: Измерение электромагнитных помех и измерительная аппаратура. – М.: Советское радио, 1979. – 466 с.
8. Баскаков С.И. Основы электродинамики. – М.: Советское радио, 1973. – 248 с.

Поступила 19.09.2016 г.; принята к публикации 21.03.2017 г.

**Вацков Павел Юрьевич** – аспирант кафедры микроэлектронных радиотехнических устройств и систем МИЭТ (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), [p.vatskov@gmail.com](mailto:p.vatskov@gmail.com)

### References

1. GOST 19619-74. *Oborudovanie radiotelemetricheskoe. Terminy i opredeleniya* [State Standard 19619-74. Radiotelemetry equipment. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform, 2005. 20 p. (In Russian).
2. Williams T. *EMC for Product Designers*. Kidington. Elsevier Science Ltd, 2001. (Russ. ed.: Uill'yams T. EMS dlya razrabotchikov produktsii. Moscow, Izd. dom «Tekhnologiya», 2003. 540 p.).
3. GOST R 50397-2011 (MEHK 60050-161:1990). *Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv ehlektromagnitnaya. Terminy i opredeleniya* [State Standard R 50397-2011 (IEC 60050-161:1990). International electrotechnical vocabulary – Chapter 161: Electromagnetic compatibility (MOD)]. Moscow, Standartinform, 2013. 62 p. (In Russian).
4. GOST 19542-93. *Sovmestimost' sredstv vychislitel'noj tekhniki ehlektromagnitnaya. Terminy i opredeleniya* [State standard 19542-93. Electromagnetic compatibility of computer equipment. Terms and definitions.]. Moscow, Standartinform, 2005. 9 p. (In Russian).
5. IEC 60050-161:1990. *International Electrotechnical Vocabulary*. Chapter 161: Electromagnetic compatibility.
6. MIL-STD-461F. *Department of defence interface standard: Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment*. Available at: <http://snebulos.mit.edu/projects/reference/MIL-STD/MIL-STD-461F.pdf> (accessed: 08.09.2016).
7. White D.R. *EMC Handbook. Part 3. E.M.I. Control Methodology and Procedures*. Don White Consultants, 1979. (Russ. ed.: Uajt D.R. EMS REHS i neprednamerennye pomekhi. Vyp. 3: Izmerenie ehlektromagnitnykh pomekh i izmeritel'naya apparatura. Moscow, Sovetskoe radio, 1979. 466 p.).
8. Baskakov S.I. *Osnovy ehlektrostatiki* [Electrostatics bases]. Moscow, Sovetskoe radio, 1973. 248 p. (In Russian).

Submitted 19.09.2016; accepted 21.03.2017.