

Расчетная оценка электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств космических систем и комплексов

Е.Э. Кривобоков

АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева»
121309, Россия, г. Москва,
ул. Новозаводская, 18

Аннотация – В настоящей статье представлены методики комплексной расчетно-аналитической оценки обеспечения электромагнитной совместимости технического средства (электротехнических, электронных и радиоэлектронных средств ракет-носителей и космических аппаратов). Данные методики позволяют провести комплексную расчетно-аналитическую оценку обеспечения электромагнитной совместимости технического средства ракетно-космической техники, которая по своей сути позволяет оценить взаимовлияние технических средств ракетно-космической техники уже на этапе проектирования ее объектов. Анализ результатов оценки обеспечения электромагнитной совместимости технических средств ракетно-космической техники позволяет выработать организационно-технические мероприятия, направленные на обеспечение электромагнитной совместимости технических средств ракетно-космической техники на всех стадиях жизненного цикла ее объектов. Для проведения оценки обеспечения электромагнитной совместимости технических средств ракетно-космической техники был выбран комплексный подход в связи с большой размерностью исходных данных и разнообразием возможных вариантов проникновения помех.

Ключевые слова – электромагнитная совместимость; антенное устройство; кондуктивная помеха; радиоэлектронное средство; ракета-носитель; космический аппарат; ракетно-космическая техника.

Введение

Постановка проблемы. При создании ракетно-космической техники (РКТ) необходимо учитывать не только характеристики отдельно взятого технического средства (ТС), но и особенности взаимодействий нескольких ТС, так как функционирование любого ТС сопровождается возникновением нежелательных (помеховых) электромагнитных излучений (ЭМИ) различной природы и интенсивности.

Решение задачи обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) ТС РКТ имеет важное значение, так как от функционирования ТС РКТ зависит успех всей пусковой кампании. В связи с этим проектирование, изготовление и эксплуатацию ТС РКТ необходимо проводить с учетом обеспечения ЭМС ТС РКТ с требуемыми запасами.

Цель: проведение оценки взаимовлияния ТС РКТ на этапе проектирования объектов РКТ путем проведения комплексной расчетно-аналитической оценки обеспечения ЭМС ТС РКТ. По результатам оценки обеспечения ЭМС ТС РКТ при необходимости выработать организационно-технические мероприятия, направленные на обеспечение ЭМС ТС РКТ на всех стадиях жизненного цикла изделий РКТ [1–17]. Комплексный подход к оценке обеспечения ЭМС ТС РКТ определяет большой массив исходных данных, а также возможные пути проникновения помех.

Результаты. В данной статье рассмотрены методики комплексной расчетно-аналитической оценки обеспечения ЭМС ТС (электротехнических, электронных и радиоэлектронных средств (РЭС) ракет-носителей (РН) и космических аппаратов (КА):

- радиочастотный анализ обеспечения ЭМС РЭС РН и КА;
- энергетический анализ обеспечения ЭМС РЭС РН и КА;
- расчет напряженности электрического поля, создаваемого антенными устройствами (АУ) радиопередающих устройств РЭС РН и КА;
- расчет напряжения кондуктивных помех, создаваемых ТС РН и КА.

По данным методикам возможно провести оценку обеспечения ЭМС ТС РН, КА.

Практическая значимость. Проведение комплексной расчетно-аналитической оценки обеспечения ЭМС ТС РКТ позволяет еще на этапе проектирования определить слабые места в расположении ТС на бортах ракет-носителей и космических аппаратов различных конструкций.

1. Радиочастотный анализ обеспечения ЭМС РЭС

При размещении на изделии РКТ нескольких радиоприемных и радиопередающих АУ РЭС возможен сценарий появления нежелательных

радиоизлучений, возникающих в результате любых нелинейных процессов в радиопередающем устройстве, кроме процесса модуляции.

Интермодуляция возникает в том случае, когда на входе радиоприемного РЭС кроме полезного сигнала действуют по крайней мере две электромагнитные помехи (ЭМП).

Радиочастотный анализ обеспечения ЭМС РЭС позволяет оценить влияние излучений (основного, неосновного) радиопередающего (совокупности радиопередающих) РЭС на радиоприемное (совокупности радиоприемных) РЭС.

Интермодуляционные продукты представляют серьезную проблему, так как они могут совпасть с полосами частот приема. Опасность представляют интермодуляции нечетных порядков, так как они располагаются ближе всего к несущим частотам. Теоретически существует возможность возникновения интермодуляционных помех четвертого и более высоких порядков. Как показывает приведенный ниже расчет, уровень мощности помех данного вида достаточно мал, чтобы привести к ухудшению выполнения целевых задач радиоприемных устройств РЭС.

Учитывая возможные сценарии возникновения ЭМП, радиочастотный анализ обеспечения ЭМС РЭС целесообразно проводить в несколько этапов.

На первом этапе необходимо оценить:

- частотные совпадения рабочих частот радиопередающих и радиоприемных устройств РЭС;
- частотные разносы между рабочими частотами, побочными излучениями радиопередающих РЭС и основными, зеркальными и другими побочными каналами радиоприемных устройств РЭС.

На втором этапе проводится расчет уровня мощности интермодуляционных излучений (помех) на входе радиоприемных РЭС в интересующих диапазонах радиочастот.

Данный тип расчета основан на вычислительных методах электродинамики, теории антенн и распространения радиоволн. На основании результатов теоретических и практических исследований необходимо дать оценку об обеспечении или необеспечении ЭМС РЭС. В случае необеспечения ЭМС РЭС также необходимо разработать план организационно-технических мероприятий по обеспечению ЭМС РЭС.

При необходимости теоретические исследования могут быть дополнены результатами экспериментальных измерений величин, характеризующих обеспечение ЭМС РЭС (напряженность поля, ширина полосы излучений, нестабильность рабочих частот, уровень побочных излучений и т. д.).

Каждая из интермодуляционных составляющих характеризуется порядком:

$$P = m \pm n, \quad (1)$$

где m и n – целые положительные, отрицательные или равные нулю числа.

В супергетеродинных радиоприемных устройствах РЭС при переходе от усилителя радиочастоты к усилителю промежуточной частоты сигнала осуществляется преобразование сигнала в сигнал.

Изменение частоты осуществляется с помощью смесителя, на вход которого подаются принятый сигнал с частотой f_c и сигнал гетеродина с частотой f_{Γ} , а с выхода снимается сигнал разностной частоты:

$$f_{\Pi} = f_c - f_{\Gamma} \quad (2)$$

В других случаях требуется получить сигнал не разностной, а суммарной частоты:

$$f_{\Pi} = f_c + f_{\Gamma} \quad (3)$$

В более общей форме операцию преобразования частоты можно представить в следующем виде:

$$f_{\Pi} = nf_1 \pm mf_2. \quad (4)$$

Результат проведения частотного анализа обеспечения ЭМС РЭС удобно представить в табличном виде.

2. Энергетическая оценка

Для оценки возможного влияния радиопередающего устройства РЭС рассчитываются мощности помех $P_{ном}$, дБВт, на входе рассматриваемого радиоприемного устройства РЭС. Расчетная мощность помех сравнивается с допустимым уровнем помех $S_{реал}$, дБВт, на входе рассматриваемого радиоприемного устройства РЭС.

ЭМС РЭС обеспечивается в том случае, когда мощность помех $P_{ном}$, дБВт, на входе радиоприемного устройства РЭС меньше допустимого уровня помех на величину коэффициентом запаса $K_{запас}$, дБВт.

Должно выполняться следующее неравенство:

$$S_{реал} \geq P_{ном} = 6 \text{ дБВт}. \quad (5)$$

Мощность помехи $P_{ном}$ на входе радиоприемного устройства РЭС рассчитывается по формуле

$$P_{ном} = P_{\text{ПРД}} + G_{\text{ПРД}} - L_{\text{АФУПРД}} + G_{\text{ПРМ}} - L_{\text{АФУПРМ}} - L_{\Pi} - L, \quad (6)$$

где $P_{\text{ПРД}}$ – мощность излучения радиопередающего устройства РЭС на частоте помехи, дБВт; $G_{\text{ПРД}}$ – коэффициент усиления АУ радиопередающего устройства РЭС в направлении АУ радиоприемного устройства РЭС, дБ; $L_{\text{АФУПРД}}$ –

затухание в АФУ радиопередающего устройства РЭС, дБ; $G_{ПРМ}$ – коэффициент АФУ радиоприемного устройства РЭС в направлении АФУ радиопередающего устройства РЭС, дБ; $L_{АФУПРМ}$ – затухание в АФУ радиоприемного устройства РЭС дБ; $L_{П}$ – потери за счет поляризации, дБ; L – потери в свободном пространстве, дБ.

Потери в свободном пространстве определяются по формуле

$$L = 20 \lg \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right), \quad (7)$$

где λ – длина волны помехи, м; R – расстояние между АУ радиоприемного устройства и радиопередающего устройства РЭС, м.

3. Расчет значений уровней напряженностей электрических полей, создаваемых АУ радиопередающих устройств РЭС

В данном разделе приведена методика расчета значений напряженностей электрических полей (зависимость уровня напряженности электрического поля от расстояния), создаваемых АУ радиопередающих устройств РЭС. Целью проведения расчета является определение устойчивости ТС к воздействию напряженности электрического поля, создаваемого АУ радиопередающих устройств РЭС.

Распространение электромагнитных волн (ЭМВ) в реальной среде характеризуется множественными физическими явлениями (отражения от металлических конструкций, затухания в среде распространения и т. д.). С целью сокращения трудоемкости на проведение расчетов и получения результатов, которые будут удовлетворять практическому применению, в расчетах будем использовать следующие значения: диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 1$, магнитная проницаемость $\mu = 1$, удельная проводимость $\sigma = 0$. Расчет проводится без учета влияния конструкции, среды распространения электромагнитной волны. Поглощение в среде отсутствует.

На этапе получения формулы расчета напряженности электрического поля в общем виде в качестве источника электромагнитных волн примем изотропный излучатель. После получения формулы расчета напряженности электрического поля в общем виде в формулу введем коэффициент направленного действия.

Методика расчета основана на формулах (8), (9) для расчета плотности потока мощности в заданной точке пространства:

$$P_j = \frac{P_{ПРД_i} G_{ПРД_i}}{4\pi r^2} k_{КПД_АФУ}, \quad (8)$$

$$P = \frac{1}{2} \frac{E^2}{120\pi}, \quad (9)$$

где $P_{ПРД_i}$ – мощность рассматриваемого радиопередающего устройства РЭС, Вт; $G_{ПРД_i}$ – коэффициент усиления АУ, рассматриваемого i -го радиопередающего устройства РЭС; r – расстояние от места расположения АУ радиопередающего устройства РЭС и до рассматриваемой точки пространства, м; $k_{КПД_АФУ}$ – коэффициент полезного действия АУ радиопередающего устройства РЭС.

Выполним следующие преобразования:

$$P_j = \frac{P_{ПРД_i} G_{ПРД_i}}{4\pi r^2} k_{КПД_АФУ} = \frac{1}{2} \frac{E^2}{120\pi}, \quad (10)$$

$$E_{Д} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T E_m^2 \sin^2(\omega t) dt} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{30 P_{ПРД_i} G_{ПРД_i} k_{КПД_АФУ}}{r}}. \quad (11)$$

Результаты расчета уровня напряженности электрического поля целесообразно приводить в виде графических зависимостей уровней напряженностей электрических полей от расстояний.

4. Расчет напряжения кондуктивных помех, создаваемых ТС

При расчете кондуктивных помех ТС приняты следующие ограничения и допущения: параллельная схема (рисунок) подключения источника питания (ИП) и потребителей ТС (источники помех), диэлектрическая и магнитная проницаемости линии $\epsilon = 1$ и $\mu = 1$ соответственно. Присвоим ТС индекс от 1 до m . Каждое ТС представим эквивалентной схемой, состоящей из источника электродвижущей силы (ЭДС) помехи и последовательно соединённого с ним сопротивления, моделирующим входное сопротивление.

ЭМС ТС обеспечивается, если напряжение помех $U(f)_{ном}$, дБ, создаваемое на портах питания ТС, меньше допустимого напряжения помех $U(f)_{дон}$, дБ, на величину коэффициента запаса электромагнитной совместимости $K_{запас}$, дБ:

$$U(f)_{ном} - U(f)_{дон} \leq K_{запас} \quad (12)$$

Из рассмотрения исключим источники ЭДС помехи интересующего ТС. Затем определяем эквивалентное напряжение на всех входных сопротивлениях. В результате получим формулу определения эквивалентного напряжения $E_{экив}$, В:

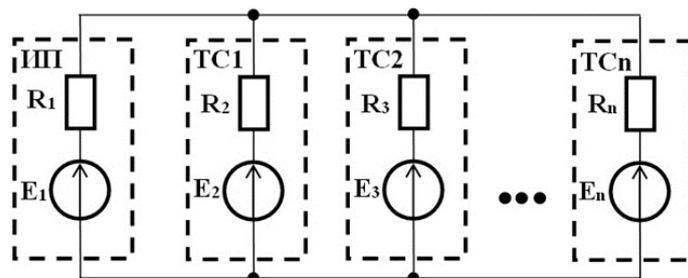


Рис. Эквивалентная электрическая схема соединения ИП и ТС

Fig. Equivalent electrical circuit for connecting the power supply source and technical equipment

$$E_{\text{экв.}} = \frac{\sum_{m=1}^k E_m Y_m}{\sum_{m=1}^k Y_m}, \quad (13)$$

где Y_m – входная проводимость m -го ТС.

Эквивалентное входное сопротивление ТС $Z_{\text{экв.}}$, Ом, определим по формуле:

$$Z_{\text{экв.}} = Z_{\text{imp.j}} + \frac{1}{\sum_{m=1}^k Y_m}, \quad (14)$$

где $Z_{\text{imp.j}}$ – импеданс провода, Ом.

При этом должно выполняться условие:

$$J \neq m, m = \text{от } 1 \text{ до } k. \quad (15)$$

Импеданс провода находится по формуле:

$$Z_{\text{imp.j}} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} J_{2n+1}(kr)}{\sigma \pi r^2 J_{2n+1}(kr)}, \quad (16)$$

где $J_{2n+1}(kr)$ и $J_1(kr)$ – функции Бесселя; k – волновое число; r – радиус провода, мм; σ – удельная проводимость проводника, см.

Волновое число определяется отношением:

$$k = \sqrt{\frac{\omega \mu_{\text{ср}} \mu_0 \sigma}{2}}, \quad (17)$$

где ω – угловая частота, рад.

Ток помехи $I_{\text{пом}}$, А, на рассматриваемом ТС определяется выражением

$$I_{\text{пом}} = \frac{E_{\text{экв.}}}{Z_{\text{экв.}} + Z_i}. \quad (18)$$

Напряжение помехи $U_{\text{пом}}$, В, на сопротивлении i -го ТС рассчитывается по формуле (16):

$$U_{\text{пом}} = Z_i I_{\text{пом}} \quad (19)$$

Заключение

Данная статья акцентирует внимание на методиках расчета обеспечения ЭМС ТС РН, ТС КА и ТС РН с ТС КА. Комплексная расчетно-аналитическая оценка обеспечения ЭМС ТС базируется на поэтапном алгоритме сокращения числа анализируемых ТС с целью сокращения трудозатрат, повышения точности расчета обеспечения ЭМС РЭС за счет увеличения номенклатуры исходных данных.

Список литературы

1. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции. М.: Издательский Дом «Технологии», 2003. 540 с.
2. Уайт Д.Р.Ж. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. М.: Советское радио, 1977. 347 с.
3. Помехозащищенность систем спутниковой связи с многолучевыми активными фазированными антенными решетками / А.Н. Дементьев [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 11 (7). С. 6–12. URL: <https://vre.instel.ru/jour/article/view/565>
4. Аппроксимация, линейаризация и моделирование нелинейных передающих каналов систем спутниковой связи / А.Н. Дементьев [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 11 (7). С. 18–21. URL: <https://vre.instel.ru/jour/article/view/567>
5. Физическая модель полосковой рамочной антенны, расположенной на диэлектрическом цилиндре / А.Н. Дементьев [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. 2016. № 4 (89). С. 137–142.
6. Дементьев А.Н. Разработка методов помехозащищенности радиотехнических систем путем реализации технологии индивидуального отбора и квалификации радиационно-стойкой электронной компонентной базы на этапе ее производства // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2018. Т. 21, № 3. С. 129–137. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7027>
7. Дементьев А.Н., Клюев Д.С., Соколова Ю.В. Расчет входного сопротивления полоскового вибратора, конформно расположенного на диэлектрическом цилиндре // Радиотехника и электроника. 2017. Т. 62, № 11. С. 1061–1066.
8. Дементьев А.Н., Клюев Д.С., Соколова Ю.В. Входное сопротивление полосковой рамочной антенны, конформно расположенной на диэлектрическом цилиндре // Физика и технические приложения волновых процессов: мат. XIII Межд. науч.-техн. конф. Казань, 2015. С. 90–92.

9. Дементьев А.Н. Математическое моделирование электромагнитной обстановки на борту космического аппарата // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2018. Т. 21, № 4. С. 26–36. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/6946>
10. Дементьев А.Н., Аралкин М.В., Осипов О.В. Исследование электромагнитных характеристик планарных киральных метаструктур на основе составных спиральных компонентов с учетом гетерогенной модели Бруггемана // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2020. Т. 23, № 3. С. 44–55. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.3.44-55>
11. Дементьев А.Н., Аралкин М.В., Осипов О.В. Отражение плоской электромагнитной волны от планарного слоя метаматериала на основе N-ортогональных микроспиралей // Сб. мат. XXVII Российской научной конф. проф.-преп. состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ с приглашением ведущих ученых родственных вузов и организаций. Самара: ПГУТИ, 2020. С. 110–111.
12. Приборы СВЧ- и оптического диапазона / А.Н. Дементьев [и др.]. Самара: ПГУТИ, 2018. 220 с.
13. Дементьев А.Н. Разработка методов помехозащищенности радиотехнических систем путем реализации технологии индивидуального отбора и квалификации радиационно-стойкой электронной компонентной базы на этапе ее производства // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2018. Т. 21, № 3. С. 129–137. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7027>
14. Дементьев А.Н., Аралкин М.В., Осипов О.В. Отражение плоской электромагнитной волны от планарного слоя метаматериала на основе N-заходных гаммадионов // Сб. мат. XXVII Российской научной конф. проф.-преп. состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ с приглашением ведущих ученых родственных вузов и организаций. Самара: ПГУТИ, 2020. С. 109–110.
15. Дементьев А.Н., Аралкин М.В., Осипов О.В. Математическая модель метаматериала с учетом гетерогенности, киральности и дисперсии // Сб. труд. IV научного форума телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2020. Физика и технические приложения волновых процессов: материалы XVIII Международной научно-технической конференции. Самара, 2020. С. 216–217.
16. Дементьев А.Н., Нефедов В.И., Филатов А.А. Электромагнитная совместимость и помехозащищенность систем спутниковой связи с орбитальными и внутрисистемными источниками радиопомех // Сб. труд. ОАО «Концерн радиостроения “Вега”». 2016. № 4. С. 45–49.
17. Анализ методов оценки электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств ракеты-носителя тяжелого класса типа «Ангара-А5» / А.Н. Дементьев [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. 2016. № 3 (88). С. 21–27.

References

1. Uill’jams T. *EMC for Product Developers*. Moscow: Izdatel’skij Dom «Tehnologii», 2003, 540 p. (In Russ.)
2. Uajt D.R.Zh. *Electromagnetic Compatibility of Radio Electronic Equipment and Unintentional Interference*. Moscow: Sovetskoe radio, 1977, 347 p. (In Russ.)
3. Demytyev A.N. et al. Interference immunity of satellite communication systems with multi-beam active phased antenna arrays. *Voprosy radioelektroniki*, 2016, no. 11 (7), pp. 6–12. URL: <https://vre.instel.ru/jour/article/view/565> (In Russ.)
4. Demytyev A.N. et al. Approximation, linearization and modeling of nonlinear transmission channels of satellite communication systems. *Voprosy radioelektroniki*, 2016, no. 11 (7), pp. 18–21. URL: <https://vre.instel.ru/jour/article/view/567> (In Russ.)
5. Demytyev A.N. et al. Physical model of a strip loop antenna located on a dielectric cylinder. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2016, no. 4 (89), pp. 137–142. (In Russ.)
6. Demytyev A.N. Development of methods for noise immunity of radio engineering systems by implementing the technology of individual selection and qualification of a radiation-resistant electronic component base at the stage of its production. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2018, vol. 21, no. 3, pp. 129–137. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7027> (In Russ.)
7. Demytyev A.N., Kljuev D.S., Sokolova Yu.V. Calculation of the input impedance of a strip vibrator conformally located on a dielectric cylinder. *Radiotekhnika i elektronika*, 2017, vol. 62, no. 11, pp. 1061–1066. (In Russ.)
8. Demytyev A.N., Kljuev D.S., Sokolova Yu.V. Input impedance of a strip loop antenna conformally located on a dielectric cylinder. *Fizika i tehicheskie prilozhenija volnovyh protsessov: mat. XIII Mezhd. nauch.-tehn. konf.*, Kazan, 2015, pp. 90–92. (In Russ.)
9. Demytyev A.N. Mathematical modeling of the electromagnetic environment on board the spacecraft. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2018, vol. 21, no. 4, pp. 26–36. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/6946> (In Russ.)
10. Demytyev A.N., Aralkin M.V., Osipov O.V. Investigation of the electromagnetic characteristics of planar chiral metastructures based on composite helical components taking into account the heterogeneous Bruggemann model. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2020, vol. 23, no. 3, pp. 44–55. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2020.23.3.44-55> (In Russ.)
11. Demytyev A.N., Aralkin M.V., Osipov O.V. Reflection of a plane electromagnetic wave from a planar layer of a metamaterial based on N-orthogonal microspirals. *Sb. mat. XXVII Rossijskoj nauchnoj konf. prof.-prep. sostava, nauchnyh sotrudnikov i aspirantov PGUTI s priglasheniem veduschih uchenyh rodstvennyh vuzov i organizatsij*, Samara, PGUTI, 2020, pp. 110–111. (In Russ.)
12. Demytyev A.N. et al. *Microwave and Optical Devices*. Samara: PGUTI, 2018, 220 p. (In Russ.)
13. Demytyev A.N. Development of methods for noise immunity of radio engineering systems by implementing the technology of individual selection and qualification of a radiation-resistant electronic component base at the stage of its production. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2018, vol. 21, no. 3, pp. 129–137. URL: <https://journals.ssau.ru/pwp/article/view/7027> (In Russ.)
14. Demytyev A.N., Aralkin M.V., Osipov O.V. Reflection of a plane electromagnetic wave from a planar layer of a metamaterial based on N-entry gammadiions. *Sb. mat. XXVII Rossijskoj nauchnoj konf. prof.-prep. sostava, nauchnyh sotrudnikov i aspirantov PGUTI s priglasheniem veduschih uchenyh rodstvennyh vuzov i organizatsij*, Samara, PGUTI, 2020, pp. 109–110. (In Russ.)
15. Demytyev A.N., Aralkin M.V., Osipov O.V. Mathematical model of a metamaterial taking into account heterogeneity, chirality and dispersion. *Sb. trud. IV nauchnogo foruma telekommunikatsii: teorija i tehnologii TTT-2020. Fizika i tehicheskie prilozhenija volnovyh protsessov: materialy XVIII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferentsii*, Samara, 2020, pp. 216–217. (In Russ.)

16. Dementyev A.N., Nefedov V.I., Filatov A.A. Electromagnetic compatibility and noise immunity of satellite communication systems with orbital and intrasystem sources of radio interference. *Sb. trud. OAO «Kontsern radiostroeniya "Vega"», 2016, no. 4, pp. 45–49. (In Russ.)*
17. Dementyev A.N. et al. Analysis of methods for assessing the electromagnetic compatibility of radio electronic equipment of a heavy-class launch vehicle of the «Angara-A5» type. *Kosmonavtika i raketostroenie, 2016, no. 3 (88), pp. 21–27. (In Russ.)*

Physics of Wave Processes and Radio Systems

2021, vol. 24, no. 2, pp. 49–54

DOI 10.18469/1810-3189.2021.24.2.49-54

Received 25 May 2021

Accepted 25 June 2021

Calculated estimation of electromagnetic compatibility of radio-electronic means of space systems and complexes

Yevgeny E. Krivobokov

Khronichev State Research and Production Space Center
18, Novozavodskaya Street,
121087, Moscow, Russia

Abstract – This article presents the methods of complex computational and analytical assessment of ensuring electromagnetic compatibility of technical means (electrical, electronic and radio-electronic means of launch vehicles and spacecraft). These methods allow us to conduct a comprehensive computational and analytical assessment of the electromagnetic compatibility of the technical means of rocket and space technology, which in its essence allows us to assess the mutual influence of the technical means of rocket and space technology already at the design stage of rocket and space technology objects. The analysis of the results of the assessment of the electromagnetic compatibility of the technical means of rocket and space technology allows us to develop organizational and technical measures aimed at ensuring the electromagnetic compatibility of the technical means of rocket and space technology at all stages of the life cycle of objects of rocket and space technology. To assess the electromagnetic compatibility of the technical means of rocket and space technology, an integrated approach was chosen due to the large dimension of the initial data and the variety of possible variants of interference penetration.

Keywords – electromagnetic compatibility; antenna device; conducted interference; radio electronic means; launch vehicle; spacecraft; rocket and space technology.

Информация об авторе

Кривобоков Евгений Эдуардович, ведущий инженер АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», г. Москва, Россия.

Область научных интересов: электромагнитная совместимость, антенны, СВЧ-устройства, физика магнитных явлений, анализ данных, компьютерное моделирование.

E-mail: kriv-evgeny@yandex.ru

Information about the Author

Yevgeny E. Krivobokov, lead engineer of Khronichev State Research and Production Space Center, Moscow, Russia.

Research interests: electromagnetic compatibility, antennas, microwave devices, physics of magnetic phenomena, data analysis, computer modeling.

E-mail: kriv-evgeny@yandex.ru