

## Методика экспериментального оценивания влияния электромагнитного излучения на автономные технические системы

А.В. Разумов<sup>a</sup>, А.Б. Махонин<sup>b</sup>, А.В. Рассадин<sup>c</sup>, А.С. Гоголевский<sup>d</sup>

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, Россия

<sup>a</sup> razumov.5555@bk.ru, <sup>b</sup> makhonin\_ab@mail.ru, <sup>c</sup> alexrass1@yandex.ru, <sup>d</sup> gogolevski@bk.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5389-7235>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2182-5429>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3021-0941>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1279-013X>

Статья поступила 10.04.2020, принята 22.04.2020

*Проведена постановка задачи экспериментальной оценки влияния электромагнитного излучения на радиоэлектронные средства автономных технических систем, которое приводит к их отказу или вызывает временно неработоспособное состояние. Разработана математическая модель, отражающая связь воздействующих факторов электромагнитного излучения и параметров радиоэлектронных средств технических систем. Все возможные нарушения работоспособности технической системы в результате воздействия электромагнитного излучения разделены на две группы, а сохранение целевой функции этой системы при воздействии электромагнитного излучения характеризуется двумя показателями: параметрами электромагнитного излучения и вероятностью сохранения работоспособности аппаратуры целевой системы и вспомогательных или обеспечивающих функционирование целевой системы элементов при и после воздействия электромагнитного излучения. Эта модель положена в основу методики оценки влияния мощного электромагнитного излучения на радиоэлектронные средства при проведении эксперимента.*

**Ключевые слова:** математическая модель; радиоэлектронные средства; технические системы; целевая система; эксперимент; электромагнитное излучение.

## Methods of experimental evaluation of the effect of electromagnetic radiation on autonomous engineering systems

A. V. Razumov<sup>a</sup>, A. B. Makhonin<sup>b</sup>, A. V. Rassadin<sup>c</sup>, A. S. Gogolevsky<sup>d</sup>

Military Space Academy under name of A. F. Mozhaisky; 13, Zhdanovskaya St., St. Petersburg, Russia

<sup>a</sup> razumov.5555@bk.ru, <sup>b</sup> makhonin\_ab@mail.ru, <sup>c</sup> alexrass1@yandex.ru, <sup>d</sup> gogolevski@bk.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5389-7235>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2182-5429>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3021-0941>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1279-013X>

Received 10.04.2020, accepted 22.04.2020

*The problem of experimental assessment of the effect of electromagnetic radiation on the electronic means of autonomous technical systems, which leads them to failure or to a temporarily inoperative state, is determined. A mathematical model that reflects the relationship between the influencing factors of electromagnetic radiation and the parameters of electronic equipment of technical systems has been developed. All possible malfunctions of the technical system's operability as a result of electromagnetic radiation are divided into two groups. The preservation of the objective function of this system under the influence of electromagnetic radiation is characterized by two indicators: electromagnetic radiation parameters and the probability of maintaining the operability of the equipment of the target system and auxiliary or ensuring the functioning of the target system elements at and after exposure to electromagnetic radiation. This model is the basis of the methodology for assessing the effect of powerful electromagnetic radiation on electronic equipment during the experiment.*

**Keywords:** mathematical model; electronic equipment; technical systems; target system; experiment; electromagnetic radiation.

**Введение.** Влияние электромагнитного излучения (ЭМИ) с определенными параметрами на автономные технические системы (ТС) может привести к нарушению их работоспособности, которая характеризуется состояниями: неработоспособное (отказ), временно работоспособное с последующей потерей целевой функции (ЦФ) и состояние, при котором происходит восстановление ЦФ через определенное время. Причинами нару-

шения работоспособности ТС во всех случаях являются наведенные токи и напряжения в электрических цепях радиоэлектронных средств (РЭС) [1–6].

**Основная часть.** Для экспериментальной оценки [7–10] влияния электромагнитного излучения на РЭС само ЭМИ будем считать воздействующей нагрузкой  $W$ . Возникшие в цепях РЭС токи и перенапряжения определим дополнительной нагрузкой  $V$  [11]. Тогда

распределение дополнительной нагрузки  $v(t)$ , происходящее в РЭС под внешней воздействующей нагрузкой  $W$ , запишем в виде:

$$v(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\omega) \chi(\omega) e^{j\omega t} d\omega,$$

где  $\Phi(\omega)$  — плотность спектральной функции воздействующей нагрузки  $W$  от источника излучения;  $\chi(\omega)$  — комплексный коэффициент передачи электрической цепи, определяемый ее параметрами (линейная, нелинейная и т. п.).

Перед проведением экспериментов необходимо определиться с параметрами и законом распределения дополнительной нагрузки  $v(t)$ .

В общем случае  $v(t)$  можно рассматривать как случайную величину, распределенную по нормальному закону, а под дополнительной нагрузкой  $W$  можно принять значение ее энергии в определенном спектре частот. Если планируется проведение измерений в цепях испытуемых РЭС, тогда будет известна амплитуда дополнительного наведенного тока или перенапряжения.

Для определения функциональной зависимости параметров  $W$  и  $v(t)$  авторами статьи разработана математическая модель, отражающая связь воздействующих факторов ЭМИ и параметров РЭС [12–16].

Введем понятия: вероятность воздействия ЭМИ ( $\dot{P}$ ), вероятность сохранения работоспособности ТС ( $P$ ) и вероятность повреждения уязвимых элементов РЭС ( $Q$ ). Влияние ЭМИ на ТС математически можно представить обобщенным показателем сохранения целевой функции ТС ( $P_{\text{ЦФ}}$ ) при воздействии ЭМИ в виде:

$$P_{\text{ЦФ}} = 1 - Q_{\text{УЭ}},$$

где  $Q_{\text{УЭ}}$  — вероятность отказа уязвимых элементов, изменение параметров которых влияет на процесс целевого функционирования ТС при и после воздействия ЭМИ.

Вероятность всех возможных нарушений работоспособности ТС в результате воздействия ЭМИ можно разделить на две группы:

а) вероятность прямого воздействия факторов ЭМИ на целевую систему (ЦС) ТС, которое приводит к выходу из строя ЦС —  $\dot{P}_{\text{ПВ}}$ ;

б) вероятность косвенного воздействия ЭМИ на ТС, которое приводит к выходу из строя вспомогательных или обеспечивающих функционирование ЦС элемен-

тов, при котором невозможно нормальное функционирование целевой системы —  $\dot{P}_{\text{КВ}}$ .

Суммарную вероятность отказа критической совокупности уязвимых элементов на основании гипотезы о независимости повреждений каждой группы можно представить в виде:

$$Q_{\text{УЭ}} = \dot{P}_{\text{ПВ}} + \dot{P}_{\text{КВ}} - \dot{P}_{\text{ПВ}} \cdot \dot{P}_{\text{КВ}},$$

а обобщенный показатель сохранения целевой функции ТС при воздействии ЭМИ ( $P_{\text{ЦФ}}$ ) принимает вид:

$$P_{\text{ЦФ}} = P_{\text{ПВ}} \cdot P_{\text{КВ}},$$

где  $P_{\text{ПВ}}$  — вероятность сохранения работоспособности аппаратуры целевой системы;  $P_{\text{КВ}}$  — вероятность сохранения работоспособности вспомогательных или обеспечивающих функционирование ЦС элементов ( $P_{\text{КВ}} = 1 - Q_{\text{КВ}}$ );  $Q_{\text{КВ}}$  — отказ вспомогательных или обеспечивающих функционирование ЦС элементов.

Из вышеизложенного следует, что сохранение целевой функции ТС при воздействии ЭМИ характеризуется двумя показателями:

- параметрами электромагнитного излучения на ТС;
- вероятностью сохранения работоспособности аппаратуры целевой системы и вспомогательных или обеспечивающих функционирование ЦС элементов ТС при и после воздействия ЭМИ.

Рассмотрим совокупность этих показателей.

Первый показатель — параметры влияния ЭМИ на ТС, которые характеризуются:

- вероятностью реализации параметров электромагнитного воздействия ЭМИ на ТС с заданными значениями ( $P_{\text{ЭМВ}}$ );

– вероятностью наличия в воздействии ЭМИ на ТС критических нагрузок ( $P_{\text{КР}} = 1 - P_{\text{ЭМВ}}$ ). Например, во входных элементах будут достигаться максимальные значения энергии и широкий частотный спектр входного электромагнитного воздействия.

Второй показатель — вероятность сохранения работоспособности аппаратуры целевой системы КС ( $P_{\text{ПВ}}$ ) и вспомогательных или обеспечивающих функционирование ЦС элементов ( $P_{\text{КВ}}$ ) при и после воздействия ЭМИ с определенными параметрами, которые характеризуются частными показателями сохранения работоспособности ТС:

- параметрами воздействующей нагрузки  $W$  и значениями наведенных тока и перенапряжения,

- коэффициентом запаса работоспособности ТС (дублирование, резервирование электрических узлов, цепей и т. п.),
- экранирующими свойствами ТС и его пространственной ориентацией относительно оси воздействующей нагрузки.

С учетом вероятностного характера параметров ЭМИ, сохранения работоспособности аппаратуры целевой системы и вспомогательных или обеспечивающих функционирование ТС элементов при и после воздействия ЭМИ нарушение работоспособности ТС в результате воздействия ЭМИ также будет иметь вероятностный характер ( $P_{\text{НР}}$ ).

Тогда математическая модель наруше-

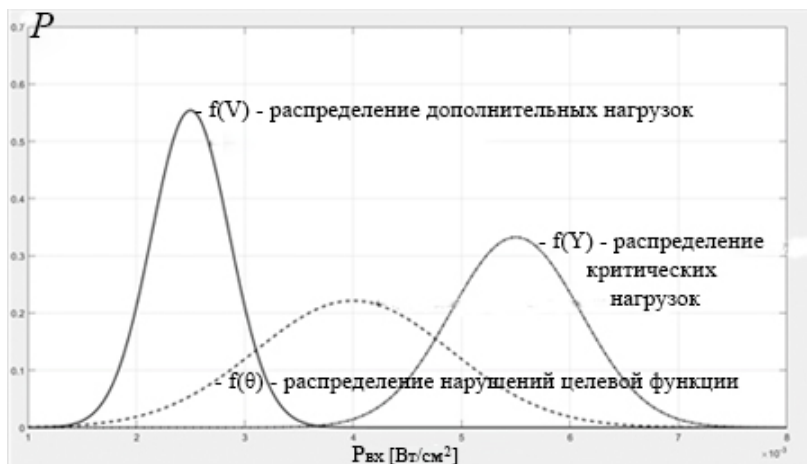


Рис. Пример оценки нарушения целевой функции ТС при распределении дополнительных и критических нагрузок в цепях РЭС

ния работоспособности ТС при воздействии ЭМИ приобретает вид:

$$P_{НР} = P_B \cdot P_{КР} \cdot Q_{УЭ},$$

где  $P_B$  — вероятность реализации воздействия ЭМИ на ТС (при испытаниях принимается равным 1).

Эта модель дает возможность оценивать вероятность сохранения или нарушения целевой функции ТС при воздействии ЭМИ при проведении экспериментов.

Для проверки модели на практике ниже представлена методика проведения эксперимента по оценке нарушения работоспособности ТС при воздействии ЭМИ.

Целью проведения такого эксперимента является определение вероятности отказа уязвимых элементов радиоэлектронных средств ( $Q_{УЭ}$ ) при электромагнитном воздействии ЭМИ с задаваемыми значениями ( $W_{Зад}$ ) для проверки условия  $Q_{УЭ} \geq Q_{КР}$ .

При планировании и проведении эксперимента используется метод сравнительного анализа (см. рисунок), сущность которого заключается в сравнении параметров плотности распределения дополнительных нагрузок  $V$  в цепях радиоэлектронных средств аппаратуры ТС с параметрами плотности распределения предельных значений (тока или перенапряжения)  $Y$  в электрических цепях РЭС при задаваемых значениях внешнего воздействия  $W$ .

Перед проведением эксперимента задаются условием, что распределение параметров дополнительных  $\varphi(V)$  и предельных  $\varphi(Y)$  токов (перенапряжений) явля-

ется нормальным [17–20]. В этом случае распределение случайной величины  $\theta$ , определяемой разностью значений предельных и дополнительных токов (перенапряжений) ( $\theta = Y - V$ ), также является нормальным с математическим ожиданием, определяемой разностью ( $m_Y - m_V$ ) и дисперсией, определяемой как сумма ( $\sigma_V^2 + \sigma_Y^2$ ), где  $m_V$ ,  $m_Y$ ,  $\sigma_V$ ,  $\sigma_Y$  — математическое ожидание и стандартное отклонение (дисперсия) значений предельных и действующих токов (перенапряжений) соответственно.

Тогда отказ работоспособности ТС будет определяться выражением:

$$\varphi(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_V^2 + \sigma_Y^2)}} \exp \left( -\frac{(\theta - m_Y + m_V)^2}{2(\sigma_V^2 + \sigma_Y^2)} \right).$$

**Заключение.** Таким образом, целью экспериментов становится измерение комплекса параметров ЭМИ (плотности потока мощности, частотного спектра и т. п.), определение значений параметров действующих токов (перенапряжений) в заранее определенных электрических цепях испытуемого образца (аппаратуры, узла и т. п.) ТС, расчет предельно допустимого значения тока (перенапряжения) для конкретного образца и определение наиболее критичных агрегатов, узлов и цепей ТС, определяющих его отказ.

#### Литература

1. Першин В.Т. Основы современной радиоэлектроники. Ростов-н/Д.: Феникс, 2009. 544 с.
2. Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба. М.: Вузовская книга, 2013. 360 с.
3. Радзиевский В.Г., Трифонов П.А. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. М.: Радиотехника, 2009. 288 с.
4. Головицына М.В. Проектирование радиоэлектронных средств на основе современных информационных технологий. М.: Интернет-ун-т информ. технологий, Бинوم. Лаборатория знаний, 2011. 504 с.
5. Давыдов А.С. Квантовая механика. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 704 с.
6. Кураев А.А., Попкова Т.Л., Синицын А.К. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Новое знание, Инфра-М, 2013. 424 с.
7. Болдин А.П., Максимов В.А. Основы научных исследований. М.: Академия, 2012. 336 с.
8. Халафян А.А. Промышленная статистика. Контроль качества, анализ процессов, планирование экспериментов в пакете STATISTICA. М.: Либроком, 2013. 384 с.
9. Власов К.П., Власов П.К., Киселева А.А. Методы исследований и организация экспериментов. М.: Гуманитарный центр, 2002. 258 с.
10. Афанасьева Н.Ю. Вычислительные и экспериментальные методы научного эксперимента. М.: КноРус, 2016. 336 с.
11. Балюк Н.В., Кечиев Л.Н., Степанов П.В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты. М.: ООО «Группа ИДТ», 2008. 478 с.
12. Радаев Н.Н. Методы оценки соответствия технических систем представляемым требованиям при малом объеме испытаний: моногр. Академия Петра Великого. 1997. 390 с.
13. Горбунова А.А. Электромагнитные излучения технических средств: идентификация параметров источников побочных электромагнитных излучений технического

средства по измерениям в ближней зоне. М.: URSS, ЛЕНАНД, 2016. 138 с.

14. Зарубежные радиоэлектронные средства. Кн. 4: Элементарная база / под ред. Ю.М. Перунова. В 4-х кн. М.: Радиотехника, 2010. 400 с.
15. Хургин Я.И., Яковлев В.П. Методы теории целых функций в радиофизике, теории связи и оптике. М.: ЛЕНАНД, 2020. 224 с.
16. Волощенко П.Ю. Теория энергетических процессов СВЧ в электронной волновой цепи: моногр. Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2017. 100 с.
17. Ившин В.В., Лумельский Я.П. Статистические задачи оценивания в модели «нагрузка – прочность». Пермь: Пермский ун-т, 1995. 128 с.
18. Тескин О.И., Костюкова Т.М. Интервальное оценивание показателя надежности при использовании модели «нагрузка – прочность» // Статистические методы оценивания и проверки гипотез: межвуз. сб. науч. тр. Пермь: Пермский ун-т, 1988. С. 56–62.
19. Журавлева Л.В. Электрорадиоизмерения. М.: Академия, 2004. 144 с.
20. Боридько С.И., Дементьев Н.В., Тихонов Б.Н., Ходжаев И.А. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах. М.: Горячая Линия Телеком, 2007. 376 с.

#### References

1. Pershin V.T. Fundamentals of modern radio electronics. Rostov-n/D.: Feniks, 2009. 544 p.
2. Kupriyanov A.I. Electronic warfare. M.: Vuzovskaya kniga, 2013. 360 p.
3. Radzievskij V.G., Trifonov P.A. Processing ultra-wideband signals and interference. M.: Radiotekhnika, 2009. 288 p.
4. Golovicyna M.V. Design of electronic equipment based on modern information technology. M.: Internet-un-t inform. tekhnologij, Binom. Laboratoriya znaniy, 2011. 504 p.

5. Davydov A.S. Quantum mechanics. SPb.: BHV-Peterburg, 2011. 704 p.
6. Kuraev A.A., Popkova T.L., Sinicyn A.K. Electrodynamics and radio wave propagation. M.: Novoe znanie, Infra-M, 2013. 424 p.
7. Boldin A.P., Maksimov V.A. Fundamentals of scientific research. M.: Akademiya, 2012. 336 p.
8. Halafyan A.A. Industrial statistics. Quality control, process analysis, experiment planning in the STATISTICA package. M.: Librokom, 2013. 384 p.
9. Vlasov K.P., Vlasov P.K., Kiseleva A.A. Research methods and organization of experiments. M.: Gumanitarnyj centr, 2002. 258 p.
10. Afanas'eva N.YU. Computational and experimental methods of scientific experiment. M.: KnoRus, 2016. 336 p.
11. Balyuk N.V., Kechiev L.N., Stepanov P.V. Powerful electromagnetic pulse: impact on electronic means and methods of protection. M.: OOO «Gruppa IDT», 2008. 478 p.
12. Radaev N.N. Methods for assessing the compliance of technical systems with the requirements presented with a small amount of testing: monogr. Akademiya Petra Velikogo. 1997. 390 p.
13. Gorbunova A.A. Electromagnetic emissions of technical means: identification of parameters of sources of spurious electromagnetic emissions of a technical means from measurements in the near zone. M.: URSS, LENAND, 2016. 138 p.
14. Foreign electronic equipment. Book 4: Elemental Base / pod red. YU.M. Perunova. V 4-h kn. M.: Radiotekhnika, 2010. 400 p.
15. Hurgin YA.I., YAKovlev V.P. Methods of the theory of entire functions in radiophysics, communication theory and optics. M.: LENAND, 2020. 224 p.
16. Voloshchenko P.YU. The theory of microwave energy processes in the electronic wave circuit: monogr. Rostov n/D: Izd-vo YUFU, 2017. 100 p.
17. Ivshin V.V., Lumel'skij YA.P. Statistical estimation tasks in the load-strength model. Perm': Permskij un-t, 1995.
18. Teskin O.I., Kostyukova T.M. Interval assessment of the reliability indicator using the load-strength model: mezhvuz. sb. nauch. tr. Perm': Permskij un-t, 1988. P. 56–62.
19. ZHuravleva L.V. Electroradio measurements. M.: Akademiya, 2004. 144 p.
20. Borid'ko S.I., Dement'ev N.V., Tihonov B.N., Hodzhaev I.A. Metrology and electro-radio measurements in telecommunication systems. M.: Goryachaya Liniya Telekom, 2007. 376 p.