



УДК 623.4.011
ГРНТИ 78.21.53

ВЫБОР ПОКАЗАТЕЛЯ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ БОЕПРИПАСОВ

*А.А. ВОЛКОВ, кандидат технических наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

В качестве показателя эффективности электромагнитных боеприпасов предложено использовать средний относительный ущерб, наносимый радиоэлектронному объекту в результате электромагнитного поражения его элементов. Разработана методика оценки эффективности электромагнитных боеприпасов. Определены основные закономерности электромагнитного поражения наземных радиоэлектронных объектов.

Ключевые слова: электромагнитный боеприпас, радиоэлектронное средство, электромагнитное поражение, оценка эффективности, нелетальное оружие.

CHOICE OF THE INDICATOR AND EVALUATION OF THE ELECTROMAGNETIC AMMUNITION EFFICIENCY

*A.A. VOLKOV, Candidate of Technical Sciences
MESCAF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

As an indicator of the effectiveness of electromagnetic ammunition, it is proposed to use the average relative damage inflicted on a radio-electronic object as a result of electromagnetic damage to its elements. A method for evaluating the effectiveness of electromagnetic ammunition has been developed. The basic laws of electromagnetic damage to ground-based electronic objects are determined.

Keywords: electromagnetic ammunition, radioelectronic equipment, electromagnetic damage, performance evaluation, non-lethal weapons.

Введение. Анализ вооруженных конфликтов XXI века показал, что они, как правило, сопровождаются интенсивным использованием огневых средств поражения, приводящим к значительным разрушениям гражданской инфраструктуры, гибели мирного населения и нанесению урона окружающей среде. По этим причинам применение традиционных средств поражения нашими подразделениями при проведении контртеррористических или миротворческих операций в ряде случаев может оказаться неприемлемым. Указанные обстоятельства требуют разработки и применения различных видов оружия нелетального действия [1], позволяющих существенно снизить эффективность противника без сопутствующих жертв и разрушений, и дополняющих традиционные средства поражения в общей системе вооружения.

Актуальность. Одним из видов оружия нелетального действия является электромагнитное оружие (ЭМО) радиочастотного диапазона (в том числе сверхвысокочастотное оружие) [1], наибольший эффект от использования которого предполагается получить за счет воздействия импульсным электромагнитным полем (ЭМП) на радиоэлектронные системы противника. В результате такого воздействия могут быть получены снижение качества функционирования, временная потеря работоспособности или необратимый выход из строя радиоэлектронной аппаратуры. Образцы ЭМО часто рассматривают как инструмент для решения задач радиоэлектронной борьбы и называют средствами функционального поражения [2, 3]. Особый интерес в классе ЭМО представляют электромагнитные боеприпасы (ЭМБ) [3], под которыми понимаются различные воздушные носители с полезной нагрузкой, состоящей из мощного генератора ЭМП,



антенны и источника электропитания. Носителями могут быть авиационные и тактические ракеты, авиационные бомбы, артиллерийские снаряды, морские торпеды, беспилотные летательные аппараты [2–4]. В отличие от стационарных и мобильных средств ЭМО, применяемых со своей территории, использование ЭМБ для поражения объектов противника снимает проблему электромагнитной совместимости со своими радиоэлектронными средствами (РЭС) [3], что является их важнейшим преимуществом.

Задачей ЭМБ, как и ЭМО в целом, является выведение из строя радиоэлектронной аппаратуры противника путём воздействия на неё мощным электромагнитным излучением. Эта задача решается в целях снижения эффективности функционирования систем и средств управления войсками и оружием противника и, тем самым, повышения эффективности своих войск [3, 5]. Объектами поражения ЭМБ могут быть как одиночные РЭС различного назначения (в том числе, не имеющие в своём составе штатных приёмников электромагнитных волн), так и их группы. Признаком, по которому можно отнести РЭС к классу объектов поражения ЭМО, является наличие в его структуре полупроводниковой элементной базы. К основным объектам ЭМБ относятся военные средства радиолокации, навигации, связи, обработки информации, видеонаблюдения, охранные датчики, робототехнические системы и др. В зависимости от решаемых задач объектами ЭМБ могут стать РЭС гражданской инфраструктуры противника, например, теле- и радиостанции, системы управления электростанциями (подстанциями) и железнодорожным транспортом и др.

При разработке ЭМБ, как и любых других технических устройств, ключевой задачей является оценка степени их соответствия своему назначению, то есть оценка их эффективности в определённых условиях. На основе результатов оценки эффективности обосновываются требования к характеристикам разрабатываемых устройств. Вопросы оценки эффективности ЭМБ рассматривались ранее в работах [3, 6, 7]. В этих работах при оценке показателей эффективности (радиуса или дальности поражения) уровни электромагнитного поражения (ЭП) РЭС считались детерминированными. Однако экспериментальные исследования воздействия импульсного ЭМП на полупроводниковые приборы [8–11] свидетельствуют о случайном характере процесса их поражения. Следовательно, уровни ЭП, как отдельных полупроводниковых приборов, так и РЭС в целом, случайны. Поэтому при оценке эффективности ЭМБ необходимо учитывать случайный разброс уровней ЭП РЭС и использовать соответствующие показатели эффективности.

Цель статьи – выбор показателя и разработка методики оценки эффективности ЭМБ, учитывающих случайный разброс уровней ЭП РЭС.

Выбор показателя эффективности ЭМБ. Схема способа применения ЭМБ при поражении наземного радиоэлектронного объекта (РЭОб), состоящего из группы РЭС, показана на рисунке 1. Принцип его действия основан на создании мощного ЭМП в некоторой области пространства при срабатывании генераторного прибора. На земле при этом образуется зона поражения, внутри которой ЭМП способно выводить из строя РЭС различного назначения.

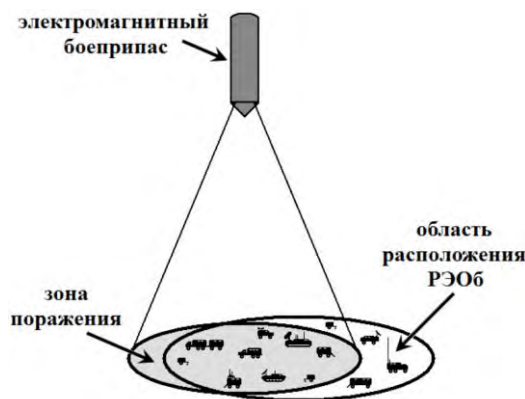


Рисунок 1 – Схема способа применения ЭМБ при поражении наземного РЭОб



Результат поражения как одиночного РЭС, так и группы РЭС, составляющих РЭОб, в общем виде можно охарактеризовать наносимым ущербом. Признаки ЭП практически любого РЭС противника неочевидны [2], поэтому контролировать наносимый ущерб невозможно. В теории огневого поражения ненаблюдаемых целей [12] в подобных случаях о состоянии групповых объектов судят по числовым характеристикам распределения случайного ущерба. Ожидаемый эффект от ЭП, как и от огневого поражения, заключается в выведении из строя РЭС, т.е. лишения его возможности выполнять свои функции на некоторое время. Поэтому подход к оценке эффективности средств огневого поражения [12] можно распространить на ЭМБ.

Важнейшей и основной из числовых характеристик случайного ущерба, наносимого РЭОб при ЭП его элементов, является его среднее значение, которое в соответствии с определением [13] равно:

$$v_{cp} = \sum_{i=1}^N v_i p_{ЭП i}, \quad (1)$$

где N – число РЭС в составе РЭОб; v_i – ущерб, наносимый i -му РЭС в результате ЭП; $p_{ЭП i}$ – вероятность ЭП i -го РЭС.

Величина v_i выражает количественную меру последствий для i -го РЭС, возникших в результате ЭП. Это может быть, например, стоимость ремонта РЭС при приведении его в работоспособное состояние. В этом случае v_{cp} показывает среднюю стоимость восстановления РЭОб.

При решении практических задач удобно пользоваться средней относительной величиной ущерба, представляющей собой отношение среднего ущерба (1) к его максимальному значению

$$v_{max} = \sum_{i=1}^N v_i :$$

$$\zeta_{cp} = \frac{v_{cp}}{v_{max}} = \frac{\sum_{i=1}^N v_i p_{ЭП i}}{\sum_{i=1}^N v_i} = \sum_{i=1}^N \zeta_i p_{ЭП i}, \quad (2)$$

где $\zeta_i = v_i / \sum_{i=1}^N v_i$ – значимость (вес) i -го РЭС в составе РЭОб. Этот показатель будет использоваться ниже для оценки эффективности ЭМБ.

Следует отметить, что на практике часто встречаются ситуации, когда РЭОб состоит из одинаковых РЭС. В этом случае $v_1 = v_2 = \dots = v_N$, $\zeta_i = 1/N$, а средний относительный ущерб (2) вырождается в среднее относительное число элементов РЭОб, выведенных из строя в результате действия излучения ЭМБ:

$$\zeta_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_{ЭП i}. \quad (3)$$

Показатель (3) является частным случаем показателя (2) и традиционно используется в теории огневого поражения [11].

Разработка методики оценки показателя эффективности ЭМБ. Процесс доставки ЭМБ, а также положение элементов РЭОб случайны. Эти факторы непосредственно определяют уровень поражающего ЭМП в точках расположения РЭС, а значит и вероятность выхода из строя РЭС, которая тоже является случайной. Поэтому для получения детерминированных оценок под вероятностью ЭП i -го РЭС следует понимать среднюю по ошибкам доставки ЭМБ и



координатам РЭС в границах РЭОб вероятность необратимого выхода из строя (потери работоспособности) i -го РЭС в результате воздействия на него поражающего ЭМП.

Закон распределения РЭС в пределах РЭОб, а также форма РЭОб, как правило, не известны, и решение задачи в общем виде получить не удастся. Поэтому здесь приняты следующие допущения:

– все РЭС находятся в одной плоскости и равномерно распределены в границах РЭОб, имеющего форму круга. Закон распределения координат i -го РЭС в данном случае имеет вид:

$$\omega_{\rho i}(\boldsymbol{\rho}) = 1/S_{\text{РЭОб}}, \quad (4)$$

где $\boldsymbol{\rho}$ – радиус-вектор i -го РЭС в плоской системе координат, начало которой совмещено с центром РЭОб; $S_{\text{РЭОб}} = \pi R_{\text{РЭОб}}^2$ – площадь РЭОб; $R_{\text{РЭОб}}$ – радиус РЭОб;

– из состава РЭОб можно выделить не менее одного РЭС, имеющего наибольшую среди прочих стойкость к ЭМП при любых значениях плотности мощности поражающего излучения;

– диаграмма направленности антенны ЭМБ имеет симметричную структуру относительно вертикальной оси, а уровень создаваемого излучения максимален в центре зоны поражения и монотонно спадает к её границе. В этом случае зона поражения в плоскости РЭОб тоже имеет форму круга;

– ошибки доставки ЭМБ подчиняются закону кругового рассеяния в плоскости РЭОб и приводят к смещению центра зоны поражения относительно центра РЭОб. Такой вид ошибок характеризуется промахом ξ , распределенным по закону Релея [13]:

$$\omega_{\xi}(\xi) = \left(\xi/\xi_{\sigma}^2\right) e^{-\xi^2/(2\xi_{\sigma}^2)}, \quad (5)$$

где ξ_{σ} – параметр распределения Релея, численно равный среднему квадратичному отклонению (СКО) ошибок доставки в прямоугольных координатах.

В принятых допущениях геометрия задачи в плоскости РЭОб приобретает вид, показанный на рисунке 2, а средняя вероятность ЭП i -го РЭС будет определяться формулой:

$$p_{\text{ЭП}i} = \iint p_i(\Pi(\boldsymbol{\rho}, \xi)) \omega_{\rho i}(\boldsymbol{\rho}) \omega_{\xi}(\xi) ds d\xi = \frac{1}{S_{\text{РЭОб}}} \iint p_i(\Pi(\boldsymbol{\rho}, \xi)) \omega_{\xi}(\xi) ds d\xi, \quad (6)$$

где $p_i(\Pi(\boldsymbol{\rho}, \xi)) = p\{\Pi(\boldsymbol{\rho}, \xi) \geq \Pi_i\}$ – вероятность необратимого выхода из строя i -го РЭС; $\Pi(\boldsymbol{\rho}, \xi)$ – распределение плотности мощности поражающего ЭМП по координатам РЭС при заданном промахе; Π_i – уровень поражения i -го РЭС; $p\{A\}$ – вероятность выполнения условия A .

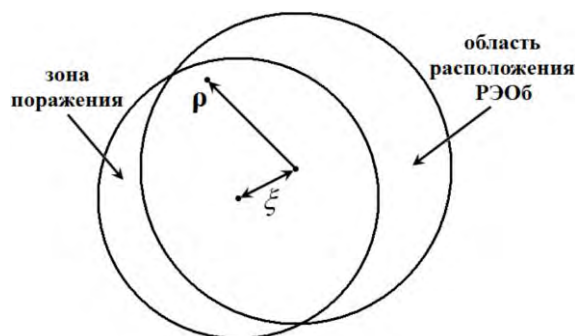


Рисунок 2 – Схема перекрытия зоны поражения с областью расположения РЭОб



В соответствии с принятой моделью антенны наименьшая плотность мощности поражающего ЭМП в зоне поражения будет на границе зоны. Следовательно, вероятность выхода из строя i -го РЭС будет удовлетворять неравенству:

$$p_i(\Pi(\rho, \xi)) \geq p_{\min}(\Pi_{\text{гр}}) \sigma(\Pi(\rho, \xi) - \Pi_{\text{гр}}), \quad (7)$$

где $p_{\min}(\Pi) = \min_i(p_i(\Pi))$ – зависимость вероятности превышения уровня поражения самого стойкого РЭС от плотности мощности ЭМП Π ; $\Pi_{\text{гр}}$ – значение плотности мощности ЭМП на границе зоны поражения; $\sigma(z)$ – функция Хевисайда (единичного скачка) переменной z .

Подстановка соотношений (7) в (6) и затем в (2) и позволяет получить оценку снизу среднего относительного ущерба РЭОб в результате ЭП его элементов:

$$\zeta_{\text{ср}} \geq \zeta_{\text{ср inf}} = p_{\min \text{ гр}} \gamma, \quad (8)$$

где $p_{\min \text{ гр}} = p_{\min}(\Pi_{\text{гр}})$; γ – средняя по ошибкам доставки относительная площадь перекрытия зоны поражения и области расположения РЭОб (показатель перекрытия площадей):

$$\gamma = \frac{1}{S_{\text{РЭОб}}} \iint \sigma(\Pi(\rho, \xi) - \Pi_{\text{гр}}) \omega_{\xi}(\xi) ds d\xi = \frac{1}{\pi R_{\text{РЭОб}}^2} \int S_{\text{пер}}(\Pi_{\text{гр}}, \xi) \omega_{\xi}(\xi) d\xi, \quad (9)$$

$S_{\text{пер}}(\Pi_{\text{гр}}, \xi)$ – площадь перекрытия зоны ЭП и области расположения РЭОб:

$$S_{\text{пер}}(\Pi_{\text{гр}}, \xi) = \int_{S_{\text{РЭОб}}} \sigma(\Pi(\rho, \xi) - \Pi_{\text{гр}}) ds. \quad (10)$$

Входящие в (8) величины $p_{\min \text{ гр}}$ и γ являются функциями плотности мощности ЭМП на границе области поражения $\Pi_{\text{гр}}$, которая определяется параметрами генератора, свойствами направленности антенны и высотой излучения. Схема для расчёта $\Pi_{\text{гр}}$ показана на рисунке 3, где обозначено: $\theta_{\text{гр}}$ – угол, указывающий направление из точки излучения на границу зоны поражения; h – высота излучения; $D_{\text{гр}} = h / \cos \theta_{\text{гр}}$ – расстояние от ЭМБ до границы зоны поражения; $R_{\text{ЭП}} = h \tan \theta_{\text{гр}}$ – радиус зоны ЭП. Величина угла $\theta_{\text{гр}}$ зависит от свойств направленности антенны и высоты излучения, а его оптимальное значение соответствует максимальному размеру зоны поражения.

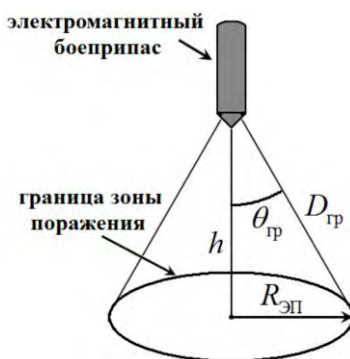


Рисунок 3 – Схема для расчёта плотности потока энергии на границе зоны поражения



Из схемы на рисунке 3 следует, что плотность мощности ЭМП на границе области поражения можно представить формулой [14]:

$$\Pi_{гр} = \frac{P_r G_a(\theta_{гр})}{4\pi D_{гр}^2} = \frac{P_r G_a(\theta_{гр}) \cos^2 \theta_{гр}}{4\pi h^2} = \frac{P_r G_a(\theta_{гр}) \sin^2 \theta_{гр}}{4\pi R_{ЭП}^2}, \quad (11)$$

где P_r – мощность генератора; $G_a(\theta) = G_{a\max} f_a(\theta)$ – зависимость коэффициента направленного действия (КНД) антенны от направления излучения θ ; $G_{a\max}$ – значение КНД в направлении максимального излучения; $f_a(\theta)$ – нормированная диаграмма направленности антенны ЭМБ.

В [15] показано, что распределение критических уровней плотности мощности, при которых происходит ЭП РЭС, асимптотически стремится к логарифмически нормальному распределению. Поэтому зависимость p_{\min} от Π можно аппроксимировать логарифмически нормальной кривой:

$$p_{\min}(\Pi) = \Phi \left(\frac{\ln(\Pi/\Pi_{\max\text{cp}}) + \ln(1 + \Upsilon_{\max}^2)}{\sqrt{\ln(1 + \Upsilon_{\max}^2)}} \right), \quad (12)$$

где $\Pi_{\max\text{cp}}$, $\Upsilon_{\max} = \Pi_{\max\text{CKO}}/\Pi_{\max\text{cp}}$, $\Pi_{\max\text{CKO}}$ – соответственно математическое ожидание, коэффициент вариации (относительный разброс) и СКО уровня поражения наиболее стойкого РЭС Π_{\max} ; $\Phi(z) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^z \exp(-\chi^2/2) d\chi$ – интеграл вероятностей переменной z [13].

Подстановка (11) в (12) позволяет выразить зависимость вероятности $p_{\min\text{гр}}$ от радиуса зоны поражения $R_{ЭП}$:

$$p_{\min\text{гр}} = p_{\min}(\Pi_{гр}) = \Phi \left(\frac{2 \ln(R_{ЭП\text{хар}}/R_{ЭП}) + \ln(1 + \Upsilon_{\min}^2)}{\sqrt{\ln(1 + \Upsilon_{\min}^2)}} \right), \quad (13)$$

где $R_{ЭП\text{хар}}$ – характеристический радиус зоны ЭП:

$$R_{ЭП\text{хар}} = \sqrt{\frac{P_r G_a(\theta_{гр})}{4\pi \Pi_{\max\text{cp}}}} \sin \theta_{гр} = \sqrt{\frac{P_r G_{a\max}}{4\pi \Pi_{\max\text{cp}}}} |f_a(\theta_{гр})| \sin \theta_{гр}. \quad (14)$$

Величина $R_{ЭП\text{хар}}$ представляет собой радиус зоны, на границе которой плотность мощности излучения ЭМБ равна среднему значению уровня ЭП самого стойкого РЭС. Вероятность выхода из строя самого стойкого РЭС на границе такой зоны составляет $p_{\min\text{гр}} = \Phi(\sqrt{\ln(1 + \Upsilon_{\min}^2)})$ и при малых разбросах уровней ЭП Υ_{\min} примерно равна 0,5.

Из (14) видно, что характеристический радиус пропорционален функции $f_a(\theta_{гр}) \sin \theta_{гр}$, аргументом которой является угол $\theta_{гр}$. Этот угол может принимать значения из интервала $0 \dots \pi/2$ рад и связан с высотой излучения. Наибольшую величину характеристического радиу-



са для заданной диаграммы направленности можно обеспечить путем выбора оптимального значения угла $\theta_{гр\text{ опт}}$ в соответствии с правилом:

$$\theta_{гр\text{ опт}} = \arg \max \left\{ |f_a(\theta_1)| \sin \theta_1, |f_a(\theta_2)| \sin \theta_2, \dots, |f_a(\theta_m)| \sin \theta_m, |f_a(\pi/2)| \right\}, \quad (15)$$

где $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$ – корни уравнения.

$$\frac{d}{d\theta} (f_a(\theta) \sin \theta) = \frac{df_a(\theta)}{d\theta} \sin \theta + f_a(\theta) \cos \theta = 0, \quad (16)$$

в интервале $0 \leq \theta \leq \pi/2$ рад; m – число корней.

Величина $S_{пер}$ представляет собой площадь перекрытия двух кругов на рисунке 2 и зависит от радиусов $R_{ЭП}$ и $R_{РЭОб}$, а также от промаха ξ . Функциональная связь $S_{пер}$ с $R_{ЭП}$ заложена через зависимость (11). Точное выражение площади перекрытия зоны поражения и области расположения РЭОб очень громоздко, а его использование для аналитического вычисления показателя γ встречает ряд математических трудностей, поэтому здесь применена кусочно-линейная аппроксимация:

$$S_{пер} = \begin{cases} \pi R_{\min}^2, & \xi \leq R_{\max} - R_{\min}, \\ \frac{\pi R_{\min}}{2} (R_{ЭП} + R_{РЭОб} - \xi), & R_{\max} - R_{\min} < \xi \leq R_{ЭП} + R_{РЭОб}, \\ 0, & \xi > R_{ЭП} + R_{РЭОб}, \end{cases} \quad (17)$$

где $R_{\min} = \min(R_{ЭП}, R_{РЭОб})$, $R_{\max} = \max(R_{ЭП}, R_{РЭОб})$. Анализ (17) показал, что в наилучшем с позиции точности аппроксимации случае (когда радиусы совпадают) при небольших промахах $\xi \leq R_{РЭОб}/2$ аппроксимирующая функция отклоняется от реальной зависимости не более чем на 10 %.

Вычисление показателя перекрытия γ по формуле (9) с учетом (5) и (17) даёт:

$$\gamma = \begin{cases} \frac{R_{ЭП}^2}{R_{РЭОб}^2} \left(1 - \frac{\sqrt{\pi} \xi_{\sigma}}{\sqrt{2} R_{ЭП}} \left(\Phi \left(\frac{R_{ЭП} + R_{РЭОб}}{\xi_{\sigma}} \right) - \Phi \left(\frac{R_{РЭОб} - R_{ЭП}}{\xi_{\sigma}} \right) \right) \right), & R_{ЭП} \leq R_{РЭОб}, \\ 1 - \frac{\sqrt{\pi} \xi_{\sigma}}{\sqrt{2} R_{РЭОб}} \left(\Phi \left(\frac{R_{ЭП} + R_{РЭОб}}{\xi_{\sigma}} \right) - \Phi \left(\frac{R_{ЭП} - R_{РЭОб}}{\xi_{\sigma}} \right) \right), & R_{ЭП} > R_{РЭОб}. \end{cases} \quad (18)$$

Таким образом, методика оценки эффективности ЭМБ реализуется следующей последовательностью действий:

- задаются исходные данные по объекту поражения: радиус РЭОб $R_{РЭОб}$, математические ожидания уровней поражения РЭС $\Pi_{i\text{ ср}}$ и их коэффициенты вариации Υ_i ($i=1, 2, \dots, N$);
- определяются характеристики наиболее стойкого РЭС: $\Pi_{\max\text{ ср}} = \max_i (\Pi_{i\text{ ср}})$, Υ_{\max} ;
- задаются исходные данные по ЭМБ: мощность генератора ЭМП P_r , максимальный КНД излучающей антенны $G_{a\text{ макс}}$ и ее диаграмма направленности $f_a(\theta)$, СКО промаха ЭБ ξ_{σ} ;
- определяется угол $\theta_{гр\text{ опт}}$ в соответствии с правилом (15);



- рассчитывается характеристический радиус зоны ЭП $R_{ЭП\ хар}$ по формуле (14) при $\theta_{гр} = \theta_{гр\ опт}$;
- по формуле (8) с учетом (13) и (18) строится график зависимости показателя ущерба $\zeta_{ср\ inf}$ от радиуса зоны поражения $R_{ЭП}$;
- по значениям ординат построенного графика оцениваются возможности ЭМБ по поражению РЭОб, а по значениям абсцисс – радиусы зон поражения;
- по формуле $h = R_{ЭП} / \text{tg } \theta_{гр\ опт}$ рассчитываются высоты излучения, соответствующие заданным радиусам зон поражения.

Результаты расчета показателя эффективности ЭМБ. На рисунках 4 и 5 показаны графики зависимостей $\zeta_{ср\ inf}(R_{ЭП}/R_{ЭП\ хар})$, соответственно, при малых по сравнению с радиусом РЭОб ($\xi_{\sigma} = 0,1R_{РЭОб}$) и сравнимых с радиусом РЭОб ($\xi_{\sigma} = R_{РЭОб}$) ошибках доставки ЭМБ. На этих графиках также показана кривая $p_{\min\ гр}(R_{ЭП}/R_{ЭП\ хар})$, ограничивающая $\zeta_{ср\ inf}$ при увеличении $R_{ЭП}/R_{ЭП\ хар}$. Коэффициент вариации уровней ЭП самого стойкого РЭС принят равным $\gamma_{\max} = 1$. Большие по сравнению с радиусом РЭОб ошибки доставки не рассматривались, поскольку ЭМБ в данном случае будут иметь низкую эффективность.

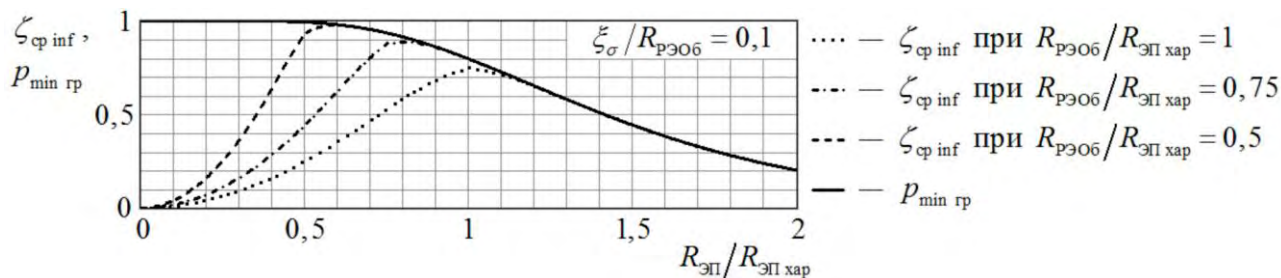


Рисунок 4 – Зависимость показателя ущерба от нормированного радиуса зоны ЭП при малых по сравнению с радиусом РЭОб ошибках доставки

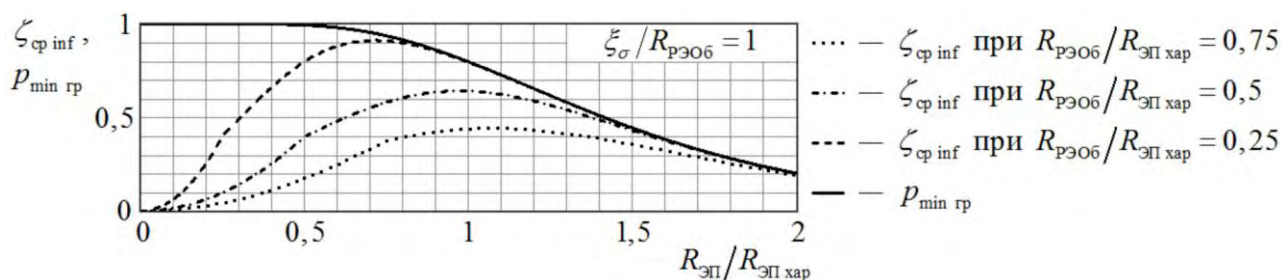


Рисунок 5 – Зависимость показателя ущерба от нормированного радиуса зоны ЭП при сравнимых с радиусом РЭОб ошибках доставки

Из графиков на рисунках 4 и 5 видно, что показатель ущерба $\zeta_{ср\ inf}$ имеет максимум по аргументу $R_{ЭП}/R_{ЭП\ хар}$, положение и величина которого зависят от нормированного радиуса РЭОб и ошибок доставки. Уровень максимума снижается при увеличении отношений $\xi_{\sigma}/R_{РЭОб}$ или (и) $R_{РЭОб}/R_{ЭП\ хар}$. Графический расчет, в частности, показал, что ущерб РЭОб не ниже 0,9 может быть обеспечен:

- при $R_{РЭОб} \leq 0,72R_{ЭП\ хар}$ и малых ошибках доставки ($\xi_{\sigma} = 0,1R_{РЭОб}$);
- при $R_{РЭОб} \leq 0,26R_{ЭП\ хар}$ и ошибках доставки, сравнимых с радиусом РЭОб ($\xi_{\sigma} = R_{РЭОб}$).



Заключение. Таким образом, в качестве показателя эффективности ЭМП выбран средний ущерб, наносимый РЭОб при электромагнитном поражении РЭС, входящих в его состав. Разработана методика оценки минимального ущерба РЭОб, в границах которого РЭС распределены равномерно и в одной плоскости, а промах ЭМБ распределен по закону Релея. Проведены расчеты показателя ЭМБ в общем виде. Установлено, что основными величинами, определяющими эффективность ЭМБ, являются характеристический радиус зоны ЭП и СКО промаха. Для повышения эффективности ЭМБ необходимо увеличивать характеристический радиус зоны поражения и снижать ошибки доставки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Средства поражения и боеприпасы / Под ред. В.В. Селиванова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 984 с.
2. Прищепенко А.Б. Взрывы и волны. Взрывные источники электромагнитного излучения радиочастотного диапазона. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 208 с.
3. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем / Под ред. А.И. Куприянова. М.: Вузовская книга, 2007. 468 с.
4. Carlo Kopp. The E-bomb – a Weapon of Electronical Mass Destruction. New York: Information Warfare: Thunder's month press. 1996. 30 p.
5. Вакин С.А., Шустов Л.И. Основы радиопротиводействия и радиотехнической разведки. М.: Советское радио, 1968. 448 с.
6. Авдеев В.Б. Достижимые характеристики электромагнитного поражения распределенных на земной поверхности радиоэлектронных целей // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2001. Т. 44. № 9. С. 4–16.
7. Панов В.В., Саркисян А.П. Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ средств функционального поражения // Зарубежная радиоэлектроника. 1993. № 10, 11, 12. С. 3–10.
8. Рикетс Л.У., Бриджес Дж. Э., Майлетта Дж. Электромагнитный импульс и методы защиты. М.: Атомиздат, 1979. 328 с.
9. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы / В.В. Антипин и др. // Зарубежная радиоэлектроника. 1995. № 1. С. 37–53.
10. Ключник А.В., Солодов А.В. Статистическая модель повреждения цифровых интегральных микросхем импульсным радиоизлучением // Радиотехника. 2010. № 2. С. 37–42.
11. Ключник А.В., Пирогов Ю.А., Солодов А.В. Статистика повреждения СВЧ диодов импульсным радиоизлучением // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2010. № 12. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec10/1/text.pdf>. (дата обращения: 7.07.2018).
12. Фендриков Н.М., Яковлев В.И. Методы расчётов боевой эффективности вооружения. М.: Воениздат, 1971. 224 с.
13. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1969. 576 с.
14. Шифрин Я.С. Антенны. Харьков: ВИРТА, 1976. 408 с.
15. Волков А.А. Вероятностные характеристики уровней электромагнитного поражения полупроводниковых приборов и радиоэлектронных средств // Успехи современной радиоэлектроники. 2017 г. № 8. С. 23–30.

REFERENCES

1. Sredstva porazheniya i boepripasy / Pod red. V.V. Selivanova. M.: Izd-vo MG TU im. N.E. Baumana, 2008. 984 p.



2. Prischepenko A.B. Vzryvy i volny. Vzryvnye istochniki `elektromagnitnogo izlucheniya radiochastotnogo diapazona. M.: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2008. 208 p.
3. Radio`elektronnaya bor'ba. Silovoe porazhenie radio`elektronnyh sistem / Pod red. A.I. Kupriyanova. M.: Vuzovskaya kniga, 2007. 468 p.
4. Carlo Kopp. The E-bomb – a Weapon of Electronical Mass Destruction. New York: Information Warfare: Thunder's month press. 1996. 30 p.
5. Vakin S.A., Shustov L.I. Osnovy radioprotivodejstviya i radiotekhnicheskoy razvedki. M.: Sovetskoe radio, 1968. 448 p.
6. Avdeev V.B. Dostizhimye harakteristiki `elektromagnitnogo porazheniya raspredelennyh na zemnoj poverhnosti radio`elektronnyh celej // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Radio`elektronika. 2001. T. 44. № 9. pp. 4–16.
7. Panov V.V., Sarkis'yan A.P. Nekotorye aspekty problemy sozdaniya SVCh sredstv funkcional'nogo porazheniya // Zarubezhnaya radio`elektronika. 1993. № 10, 11, 12. pp. 3–10.
8. Rikets L.U., Bridzhes Dzh. `E., Majletta Dzh. `Elektromagnitnyj impul's i metody zaschity. M.: Atomizdat, 1979. 328 p.
9. Vliyanie moschnyh impul'snyh mikrovolnovykh pomesh na poluprovodnikovye pribory i integral'nye mikroshemy / V.V. Antipin i dr. // Zarubezhnaya radio`elektronika. 1995. № 1. pp. 37–53.
10. Klyuchnik A.V., Solodov A.V. Statisticheskaya model' povrezhdeniya cifrovyyh integral'nyh mikroshem impul'snym radioizlucheniem // Radiotekhnika. 2010. № 2. pp. 37–42.
11. Klyuchnik A.V., Pirogov Yu.A., Solodov A.V. Statistika povrezhdeniya SVCh diodov impul'snym radioizlucheniem // Zhurnal radio`elektroniki: `elektronnyj zhurnal. 2010. № 12. [`Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://jre.cplire.ru/jre/dec10/1/text.pdf>. (data obrascheniya: 7.07.2018).
12. Fendrikov N.M., Yakovlev V.I. Metody raschetov boevoj `effektivnosti vooruzheniya. M.: Voenizdat, 1971. 224 p.
13. Ventcel' E.S. Teoriya veroyatnostej. M.: Nauka. Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury, 1969. 576 p.
14. Shifrin Ya.S. Antenny. Har'kov: VIRTA, 1976. 408 p.
15. Volkov A.A. Veroyatnostnye harakteristiki urovnej `elektromagnitnogo porazheniya poluprovodnikovyyh priborov i radio`elektronnyh sredstv // Uspehi sovremennoj radio`elektroniki. 2017 g. № 8. pp. 23–30.

© Волков А.А., 2018

Волков Алексей Анатольевич, кандидат технических наук, преподаватель 203 кафедры радиоэлектроники, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, volkov_aa@autorambler.ru.