



УДК 623.4.01
ГРНТИ 78.21.53

ОГРАНИЧЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ БОЕПРИПАСОВ

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

Установлены закономерности, ограничивающие диапазоны изменения параметров излучения электромагнитных боеприпасов в режиме формирования импульсной последовательности, обусловленные электрической прочностью атмосферы и конечным массогабаритным ресурсом полезной нагрузки носителя.

Ключевые слова: электромагнитный боеприпас, электромагнитное поражение, генератор электромагнитного поля, параметры излучения, пробой воздуха, массогабаритный ресурс.

LIMITATIONS ON THE ELECTROMAGNETIC AMMUNITION EMISSIONS PARAMETERS

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

The regularities that limit the ranges of the parameters of electromagnetic ammunition emissions parameters in the pulse sequence formation mode, due to the electric strength of atmosphere and final weight and size of the carrier resource payload.

Keywords: electromagnetic ammunition, electromagnetic damage, electromagnetic field generator, radiation parameters, air breakdown, mass and dimensional resource.

Введение. Анализ вооруженных конфликтов последних лет 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.

Одним из видов оружия нелетального действия являются электромагнитные боеприпасы (ЭМБ) [2], представляющие собой различные воздушные носители, полезной нагрузкой которых являются формирователи ЭМП. Формирователи состоят из мощного генератора, антенны и источника электропитания. В качестве носителей могут использоваться, например, авиационные бомбы или ракеты [3]. Наибольший эффект от использования ЭМБ предполагается получить за счет воздействия импульсным электромагнитным полем (ЭМП) на радиоэлектронные средства и системы противника. В результате такого воздействия могут быть получены снижение качества функционирования, временная потеря работоспособности или необратимый выход из строя радиоэлектронной аппаратуры.

Актуальность. Эффективность ЭМБ в значительной степени определяется мощностью (энергией) излучения [2]. Увеличение мощности способствует повышению эффективности рассматриваемых средств, однако встречает ряд трудностей, связанных с электрическим пробоем



воздуха при выводе электромагнитной энергии в атмосферу и с конечным массогабаритным ресурсом полезной нагрузки носителей.

Электрический пробой воздуха представляет собой естественный неустраняемый фактор, сопровождающий процесс излучения мощных полей в земной атмосфере и ограничивающий как максимальную напряжённость поля и мощность, так и временные параметры формируемого ЭМП – длительность, период повторения и время излучения импульсов [4]. Воздушные носители при этом имеют жесткие массогабаритные ограничения по размещению полезных нагрузок, что в свою очередь приводит к ограничению запаса энергии источника электропитания и мощности генератора ЭМП. Последнее обстоятельство связано с тем, что объем и масса источников электропитания находятся в прямой зависимости от запасенной энергии [5], а объем и масса генераторов ЭМП – от мощности генерируемых токов или полей [6]. Таким образом, учет указанных факторов необходим при оценке эффективности ЭМБ и обосновании требований к их параметрам излучения.

Вопросы влияния электрического пробоя воздуха на предельные параметры средств электромагнитного поражения рассмотрены в [2,7]. В [2] приводится методика расчёта пробойной напряжённости электрического поля для одиночного импульсного воздействия. Зависимости пробойного уровня от длительности импульсов и некоторые оценки предельной плотности энергии поля, излучаемого мощными генераторами в атмосферу, приведены в [7]. Эти данные позволяют оценивать предельные параметры излучения в моноимпульсном режиме генерации, однако они не могут быть использованы для таких же оценок в режиме формирования импульсной последовательности, поскольку не учитывают период повторения и количество излученных импульсов. Вместе с этим методический аппарат, учитывающий влияние массогабаритных ограничений носителей на предельные параметры излучения формирователей поля ЭМБ в известной литературе отсутствует.

В задачах электромагнитного поражения радиоэлектронных средств наиболее рациональным представляется использование импульсно-периодического режима генерации ЭМП, позволяющего увеличить пиковую мощность излучения при ограничении на энергию [8] и снизить уровни поражения полупроводниковых приборов [9]. Поэтому целью статьи является определение закономерностей, связывающих предельно допустимые параметры излучения ЭМБ в режиме формирования импульсной последовательности ЭМП (мощность, длительность, период повторения и количество импульсов), обусловленных электрической прочностью атмосферы и массогабаритными ограничениями полезной нагрузки носителя.

Ограничения на параметры излучения ЭМБ, обусловленные электрической прочностью атмосферы. Наибольшей мощностью излучения в настоящее время обладают сверхвысокочастотные (СВЧ) генераторы релятивистской вакуумной электроники – черенковские генераторы, виркаторы, релятивистские магнетроны [10]. Поэтому ниже рассматриваются формирователи ЭМП, построенные на генераторах указанного класса.

Вывод электромагнитной энергии релятивистских СВЧ генераторов в атмосферу производится, как правило, через диэлектрическое окно в корпусе прибора, разделяющее вакуумные тракты генератора (рабочую камеру или волноводы) и воздушное пространство. При излучении мощного ЭМП вблизи поверхности окна со стороны атмосферы может возникнуть безэлектродный СВЧ пробой воздуха, критерием которого является достижение электронной плотности критического уровня [11]:

$$n = n_{кр}, \quad (1)$$

где n – плотность электронов в газе; $n_{кр}$ – критическая плотность электронной плазмы.



Поведение электронной плотности однозначно определяется напряженностью электрического поля, наложенного на газ [11]. По этому критерию (1) можно сопоставить условие пробоя, выраженное в напряженностях электрического поля:

$$E_{\max} = E_{\text{пр имп}}, \quad (2)$$

где E_{\max} – наибольшее значение напряженности электрического поля в излучающем окне; $E_{\text{пр имп}}$ – импульсный пробойный уровень напряженности электрического поля.

Окна для вывода электромагнитной энергии релятивистских СВЧ генераторов представляют собой поверхностные антенны [12]. Максимальный уровень напряженности электрического поля на излучающей поверхности антенн данного типа зависит от вида распределения поля и мощности импульса, формируемого СВЧ генератором.

Амплитуда напряженности электрического поля E_s в некоторой точке с вектором координат \mathbf{r} на излучающей поверхности окна может быть представлена в виде:

$$E_s(\mathbf{r}) = E_{\max} f(\mathbf{r}), \quad (3)$$

где $f(\mathbf{r})$ – безразмерная функция вектора \mathbf{r} , характеризующая закон распределения возбуждающего поля по излучающей поверхности ($0 \leq f(\mathbf{r}) \leq 1$).

Средняя мощность импульса генератора P в излучающем окне связана с распределением (3) выражением [12]:

$$P = \frac{1}{2Z_0} \int E_s^2(\mathbf{r}) dS = \frac{E_{\max}^2}{2Z_0} \int f^2(\mathbf{r}) dS = \frac{\alpha E_{\max}^2 S}{2Z_0}, \quad (4)$$

где $\alpha = (1/S) \int f^2(\mathbf{r}) dS$ – коэффициент формы распределения ($0 \leq \alpha \leq 1$); S – площадь излучающей поверхности; $Z_0 = 120\pi$ Ом – волновое сопротивление свободного пространства.

Зависимость импульсного пробойного уровня напряженности электрического поля от временных параметров последовательности импульсов для воздуха в нормальных атмосферных условиях определена в [4] и имеет вид:

$$E_{\text{пр имп}} = E_{\text{пр ст}} \begin{cases} \left(1 - b \ln \left(1 + \frac{\ln \gamma}{N \nu_a \tau} \right) \right)^{-1}, & T - \tau \leq \Delta T_N, \\ \left(1 - b \ln \left(1 + \frac{\ln \gamma}{\nu_a \tau} + \frac{1}{\nu_a \tau} \ln \left(\frac{e^{\nu_\beta (T-\tau)} - 1}{e^{\nu_\beta (T-\tau)} + 1} \right) \right) \right)^{-1}, & T - \tau > \Delta T_N, \end{cases} \quad (5)$$

где τ , N , T – длительность, количество и период повторения импульсов; $E_{\text{пр ст}}$ – статический пробойный уровень; ν_a – частота прилипания электронов; $\nu_\beta = 2\beta \nu_a n_0 / \nu_d$ – интенсивность спада электронной плотности до уровня фона; n_0 – концентрация электронов фона; ν_d – частота отлипания электронов; β – коэффициент рекомбинации электронов и ионов; $b = 0,108$ – безразмерный коэффициент; $\gamma = n_{\text{кр}} / n_0$ – отношение критической плотности электронной



плазмы $n_{кр}$ к плотности фоновых электронов n_0 ; ΔT_N – максимальный межимпульсный интервал, при котором пробойный уровень ещё зависит от количества импульсов:

$$\Delta T_N = \frac{1}{v_\beta} \ln \left(\frac{\gamma^{(N-1)/N} + 1}{\gamma^{(N-1)/N} - 1} \right). \quad (6)$$

Подстановка (2) и (5) в (4) позволяет получить выражение предельно допустимой мощности генератора, обусловленной пробоем воздуха в излучающем окне:

$$P_{пр}(\tau, T, N) = \frac{\alpha E_{пр ст}^2 S}{2Z_0} \begin{cases} \left(1 - b \ln \left(1 + \frac{\ln \gamma}{N v_a \tau} \right) \right)^{-2}, & T - \tau \leq \Delta T_N, \\ \left(1 - b \ln \left(1 + \frac{\ln \gamma}{v_a \tau} + \frac{1}{v_a \tau} \ln \left(\frac{e^{v_\beta(T-\tau)} - 1}{e^{v_\beta(T-\tau)} + 1} \right) \right) \right)^{-2}, & T - \tau > \Delta T_N. \end{cases} \quad (7)$$

Из (7) видно, что наибольшей электрической прочностью по излучаемой мощности обладает антенна с равномерным распределением возбуждающего поля ($f(\mathbf{r}) = 1$), поскольку коэффициент формы α только в этом случае равен единице. Наличие любой неравномерности в распределении при сохранении мощности снижает электрическую прочность антенны.

Ограничения на параметры излучения ЭМБ, обусловленные конечным массогабаритным ресурсом полезной нагрузки носителя. Объем V и масса M формирователя ЭМП, очевидно, представляют собой суммы, соответственно, объемов и масс его составляющих:

$$V = V_{ин} + V_r + V_a, \quad (8)$$

$$M = M_{ин} + M_r + M_a, \quad (9)$$

где $V_{ин}$, $M_{ин}$ – объем и масса источника питания; V_r , M_r – объем и масса генератора поля; V_a , M_a – объем и масса антенны.

Объем и масса источника питания пропорциональны запасенной в нём энергии W [5]:

$$V_{ин} = W / \Omega_V, \quad (10)$$

$$M_{ин} = W / \Omega_M, \quad (11)$$

где Ω_V , Ω_M – объёмная и массовая плотности энергии источника питания.

Объем и масса релятивистского СВЧ генератора прямо зависят от его мощности [6]. При известных удельных мощностных параметрах объем и массу генератора можно представить в виде:

$$V_r = P / \Lambda_V, \quad (12)$$

$$M_r = P / \Lambda_M, \quad (13)$$



где Λ_V , Λ_M – объёмная и массовая плотности мощности генератора, определяемые главным образом конструкцией прибора.

Излучающие окна релятивистских СВЧ генераторов, в том числе переходящие в рупор, как правило, имеют непосредственную связь с рабочей камерой и совмещены с корпусом прибора. Поэтому в данном случае для антенны не требуется изыскивать дополнительный ресурс объёма и массы полезной нагрузки носителя, т.е. $V_a = 0$ и $M_a = 0$.

При формировании импульсов генератор преобразует энергию источника питания в энергию СВЧ излучения. Эффективность преобразования характеризуется коэффициентом полезного действия генератора η . Энергия, которую затрачивает источник питания на формирование последовательности N импульсов длительностью τ , равна $NP\tau/\eta$. В интервалах между импульсами источник питания находится в режиме холостого хода. При наличии токов утечки этот режим также может сопровождаться потерями энергии, равными $(N-1)Q(T-\tau)$, где Q – средняя мощность потерь в режиме холостого хода. Отсюда следует, что уравнение энергетического баланса формирователя ЭМП можно представить выражением:

$$W = NP\tau/\eta + (N-1)Q(T-\tau). \quad (14)$$

Мощность потерь удобно выражать в долях полезной мощности, расходуемой источником питания на генерацию импульса: $Q = \chi P/\eta$, где χ – коэффициент потерь в режиме холостого хода. С учетом этого уравнение энергетического баланса примет вид:

$$W = (N\tau + \chi(N-1)(T-\tau))P/\eta. \quad (15)$$

Подстановка (10), (12), (15) в (8) и (11), (13), (15) в (9) позволяет получить выражения предельно допустимой мощности генератора, обусловленной ограничениями на объём P_V и массу P_M полезной нагрузки носителя:

$$P_V(\tau, T, N) = \frac{\Lambda_V V}{1 + \frac{\Lambda_V}{\eta \Omega_V} ((N - \chi(N-1))\tau + \chi(N-1)T)}, \quad (16)$$

$$P_M(\tau, T, N) = \frac{\Lambda_M M}{1 + \frac{\Lambda_M}{\eta \Omega_M} ((N - \chi(N-1))\tau + \chi(N-1)T)}. \quad (17)$$

Допустимые значения параметров излучения ЭМП. Выражения (7), (16) и (17) представляют собой функции-ограничения на области изменения параметров излучения. Этих функции описывают поверхности в четырехмерном пространстве (P, τ, T, N) , а координаты точек на поверхностях определяют набор предельно-допустимых параметров излучения $(P_{\text{доп}}, \tau_{\text{доп}}, T_{\text{доп}}, N_{\text{доп}})$, связанных с одним из ограничивающих факторов. Границы области допустимых значений параметров излучения определяются системой неравенств:



$$\begin{cases} 0 < P \leq P_{\text{доп}}, \\ 0 < \tau \leq \tau_{\text{доп}}, \\ T_{\text{доп}} \leq T < +\infty, \\ 1 \leq N \leq N_{\text{доп}}. \end{cases} \quad (18)$$

Задачу определения предельно-допустимых параметров излучения удобно решать, задавая границы областей допустимых значений длительности, периода повторения и количества импульсов исходя их возможностей генератора. Предельно допустимая мощность при этом оценивается как минимум из трех значений (7), (16) и (17) в точке $(\tau_{\text{доп}}, T_{\text{доп}}, N_{\text{доп}})$:

$$P_{\text{доп}} = \min(P_{\text{пр}}(\tau_{\text{доп}}, T_{\text{доп}}, N_{\text{доп}}), P_V(\tau_{\text{доп}}, T_{\text{доп}}, N_{\text{доп}}), P_M(\tau_{\text{доп}}, T_{\text{доп}}, N_{\text{доп}})). \quad (19)$$

Результаты расчета предельно допустимых параметров излучения формирователя поля, размещаемого на носителе с заданными массогабаритными параметрами полезной нагрузки. Расчет проведен для формирователя, построенного по схеме, в которой в качестве источника питания выбран взрывомагнитный генератор (ВМГ), а в качестве СВЧ генератора – виркатор. Такой выбор обусловлен тем, что ВМГ имеют наивысшие удельные энергетические показатели [5], а виркаторы имеют наибольшие показатели по максимальной генерируемой мощности [10]. Кроме того, выбранная генераторная схема технически реализуема, что показано в экспериментах [13]. Оценка объемных и массовых удельных показателей мощности виркаторов проводилась по материалам [14]. На основе этих данных принято: $\Lambda_V = 3,5$ ГВт/м³, $\Lambda_M = 3,5$ МВт/кг. Коэффициент полезного действия виркатора принят равным $\eta = 0,1$ [10], а коэффициент потерь мощности – $\chi = 10^{-5}$. Удельные показатели ВМГ составляют $\Omega_V = 50$ МДж/м³ и $\Omega_M = 50$ кДж/кг [5].

Рассматривалась полезная нагрузка цилиндрической формы, как наиболее удобная для размещения на большинстве потенциальных воздушных носителей. Радиус цилиндра выбран равным $R = 30$ см, а длина образующей – $L = 3$ м. Такие габариты обеспечивают объем $V = \pi R^2 L = 0,848$ м³. Грузоподъемность носителя выбрана равной $M = 1000$ кг.

Для расположения излучающего окна виркатора выбрано основание цилиндра, что соответствует конструкции ЭМБ, предложенной в работе [3]. Излучающая поверхность антенны в этом случае имеет форму круга, а ее площадь равна $S = \pi R^2 = 0,283$ м². При проведении расчета считалось, что возбуждающее поле по излучающей поверхности распределено по симметричному квадратично-спадающему закону $f(\rho) = 1 - \rho^2/R^2$, где ρ – расстояние от центра круга до точки на излучающей поверхности. Коэффициент формы в данном случае равен $\alpha = 0,5$. Частота СВЧ излучения выбрана равной 10 ГГц. Для этой частоты статический пробойный уровень равен $E_{\text{ст}} = 32$ кВ/см [15]. Рассматривались нормальные атмосферные условия [16]: $\nu_a = 7,6 \cdot 10^7$ с⁻¹; $\nu_\beta = 2 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹; $n_{\text{кр}} = 10^{12}$ см⁻³; $n_0 = 10^3$ см⁻³.

На рисунках 1, 2 и 3 показаны графики зависимостей функций-ограничений $P_{\text{пр}}(\tau, T, N)$, $P_V(\tau, T, N)$ и $P_M(\tau, T, N)$ от длительности излучаемых импульсов, соответственно, при $T = 1$ мс, $T = 10$ мс и $T = 100$ мс. Во всех случаях время излучения составляет $NT = 1$ с. Диапазон длительностей импульсов, в котором проводился расчет, соответствует реальным значениям длительностей импульсов виркаторов.

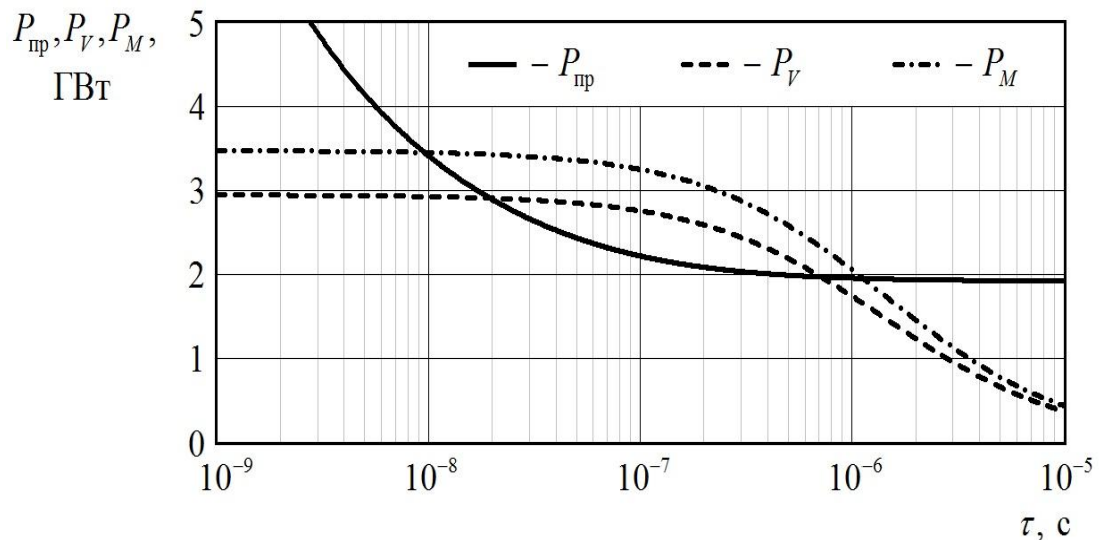


Рисунок 1 – Зависимости функций-ограничений от длительности импульсов при $T = 1$ мс и $N = 1000$

Из представленных графиков видно, что при увеличении длительности импульсов предельно-допустимая мощность ЭМБ уменьшается. Наибольшая мощность излучения во всех рассматриваемых случаях составляет 2,95 ГВт и может быть получена в диапазоне единиц нс. В зависимости от длительности и периода повторения импульсов предельно допустимую мощность ЭМБ определяют разные факторы. При $T = 1$ мс в диапазонах 1...20 нс и 700 нс...10 мкс ограничивающим фактором является объем полезной нагрузки, а в диапазоне 20...700 нс – электрический пробой воздуха в апертуре антенны. Похожая картина наблюдается при $T = 10$ мс, однако область, соответствующая пробоем воздуха расширяется, а границы диапазонов находятся в точках 25 и 7,5 мкс. При $T = 100$ мс диапазоны граничат в точке 30 нс. Во всех случаях ограничение на массу полезной нагрузки не влияет на предельно допустимые параметры излучения ЭМБ.

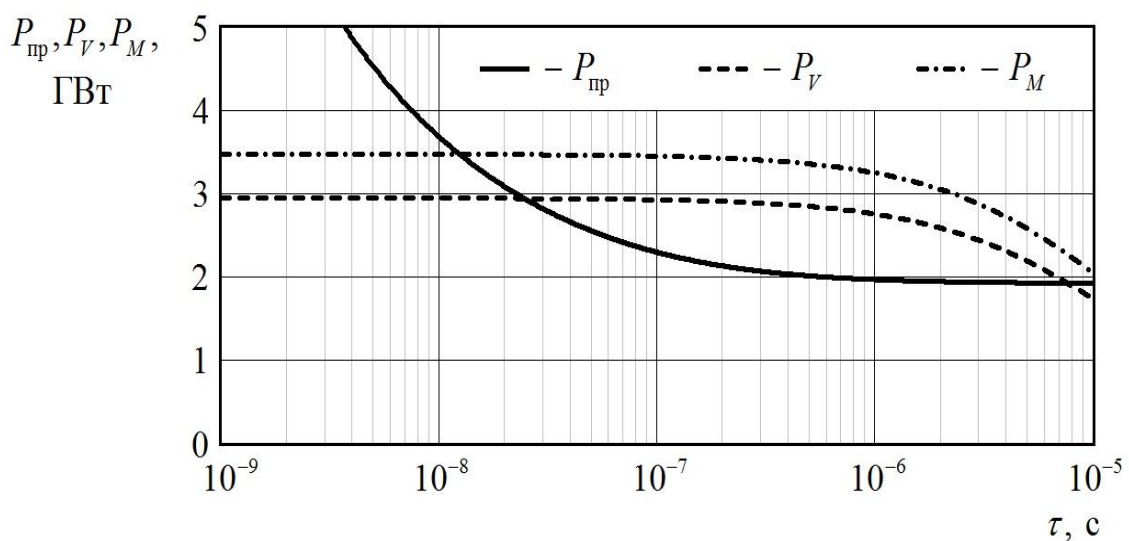


Рисунок 2 – Зависимости функций-ограничений от длительности импульсов при $T = 10$ мс и $N = 100$

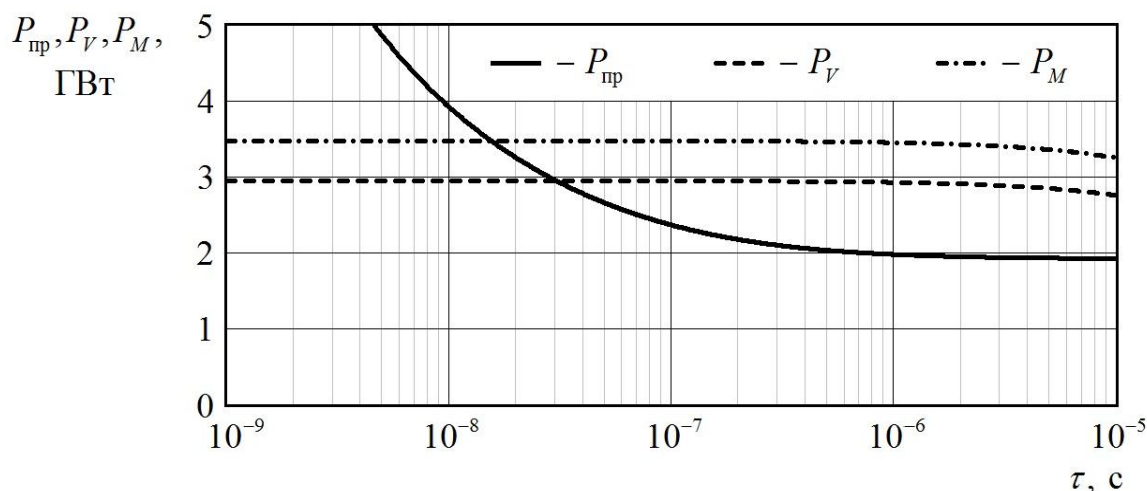


Рисунок 3 – Зависимости функций-ограничений от длительности импульсов при $T = 100$ мс и $N = 10$

Заключение. Таким образом, на основе критерия пробоя воздуха и уравнения энергетического баланса для формирователя ЭМП установлены закономерности, ограничивающие диапазоны изменения параметров излучения ЭМБ в режиме формирования импульсной последовательности. Закономерности представлены в виде аналитических выражений предельно допустимой мощности излучения как функций длительности, периода повторения и количества импульсов для каждого из ограничивающих факторов – пробоя воздуха в апертуре антенны, объема и массы полезной нагрузки носителя. Проведены расчеты предельно допустимых параметров излучения формирователя ЭМП с заданными массогабаритными характеристиками, построенного по схеме «взрывоманитный генератор-виркатор». Показано, что при увеличении длительности импульсов и (или) уменьшении периода их повторения предельно-допустимая мощность ЭМБ уменьшается, не зависимо от ограничивающего фактора. В зависимости от области изменения временных параметров излучаемой последовательности предельно допустимую мощность ЭМБ могут определять разные ограничивающие факторы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Средства поражения и боеприпасы / Под ред. В.В. Селиванова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2008. 984 с.
2. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем / Под ред. А.И. Куприянова. М.: Вузовская книга. 2007. 468 с.
3. Carlo Kopp. The E-bomb – a Weapon of Electronical mass Destruction. New York: Information Warfare: Thunder's month press. 1996. 30 p.
4. Волков А.А., Трифонов П.А. Учёт времени повторения и числа импульсов при оценке пробойных уровней поля в антенных системах сверхвысокочастотных генераторов // Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. 2014. № 1. С. 15–21.
5. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока / Под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2002. 399 с.
6. Визитенко И.И. Релятивистские магнетроны. М.: Физматлит, 2013. 360 с.
7. Fenstermacher Dan L., Frank von hippel. An Atmospheric Limit on Nuclear-powered microwave Weapons // Science & Global Security. 1991. Volume 2. P. 301–324.
8. Панов В.В., Саркисян А.П. Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ средств функционального поражения // Зарубежная радиоэлектроника. 1993. № 10, 11, 12. С. 3–10.



9. Экспериментальное исследование воздействия сверхвысокочастотных импульсов на работу персонального компьютера / Ю.Г. Юшков, П.Ю. Чумерин, С.Н. Артёменко, С.А. Новиков, Д.В. Зайцев // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 8. С. 1020–1024.

10. Диденко А.Н. СВЧ-энергетика: Теория и практика. М.: Наука. 2003. 446 с.

11. Мак-Доналд А. Сверхвысокочастотный пробой в газах. М.: Мир. 1969. 212 с.

12. Шифрин Я.С. Антенны. Харьков: ВИРТА. 1976. 408 с.

13. Генерация импульсного СВЧ-излучения с помощью энергии химических взрывчатых веществ / Е.И. Азаркевич, А.Н. Диденко, П.В. Долгополов, А.Г. Жерлицын, В.П. Исаков, А.А. Леонтьев, М.В. Лопатин, В.Б. Минцев, А.Е. Ушнурцев, Г.П. Фоменко, В.Е. Фортов, В.И. Цветков, В.Б. Шнейдер, Б.К. Ясельский // Доклады Академии наук СССР. 1991. Т. 319. № 2. С. 352–355.

14. Жерлицын А.Г., Мельников Г.В., Исаков П.Я. Экспериментальное исследование поля излучения триода с виртуальным катодом // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51. №2. С. 221–225.

15. Пробой воздуха в нарастающем СВЧ поле / В.С. Барашенков, Л.П. Грачев, И.И. Есаков, Б.Ф. Костенко, В.К. Ходатаев, М.З. Юрьев // Журнал технической физики, 2000, Т. 70, № 10. С. 34–39.

16. Зарин А.С., Кузовников А.А., Шибков В.М. Свободно локализованный СВЧ-разряд в воздухе. М.: Нефть и газ, 1996. 204 с.

REFERENCES

1. Sredstva porazheniya i boeprirasy / Pod red. V.V. Selivanova. M.: Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman. 2008. 984 p.

2. Radio`elektronnaya bor'ba. Silovoe porazhenie radio`elektronnyh sistem / Pod red. A.I. Kupriyanova. M.: Vuzovskaya kniga. 2007. 468 p.

3. Carlo Kopp. The E-bomb – a Weapon of Electronical Mass Destruction. New York: Information Warfare: Thunder's month press. 1996. 30 p.

4. Volkov A.A., Trifonov P.A. Uchet vremeni povtoreniya i chisla impul'sov pri ocenke probojnyh urovnej polya v antennyh sistemah sverhvysokochastotnyh generatorov // Vestnik VGU. Seriya: Fizika. Matematika. 2014. № 1. pp. 15–21.

5. Vzryvnye generatory moschnykh impul'sov `elektricheskogo toka / Pod red. V.E. Fortova. M.: Nauka, 2002. 399 p.

6. Vizitenko I.I. Relyativistskie magnetrony. M.: Fizmatlit, 2013. 360 p.

7. Fenstermachera Dan L., Frank von Hippelb. An Atmospheric Limit on Nuclear-powered Microwave Weapons // Science & Global Security. 1991. Volume 2. pp. 301–324.

8. 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.

9. Eksperimental'noe issledovanie vozdejstviya sverhvysokochastotnykh impul'sov na rabotu personal'nogo komp'yutera / Yu.G. Yushkov, P.Yu. Chumerin, S.N. Artemenko, S.A. Novikov, D.V. Zajcev // Radiotekhnika i `elektronika. 2001. Т. 46. № 8. pp. 1020–1024.

10. Didenko A.N. SVCh-`energetika: Teoriya i praktika. M.: Nauka. 2003. 446 p.

11. Mak-Donald A. Sverhvysokochastotnyj probroj v gazah. M.: Mir. 1969. 212 p.

12. Shifrin Ya.S. Antenny. Har'kov: VIRTA. 1976. 408 p.

13. Generaciya impul'snogo SVCh-izlucheniya s pomosh'yu `energii himicheskikh vzryvchatykh veschestv / E.I. Azarkevich, A.N. Didenko, P.V. Dolgoplov, A.G. Zherlicyn, V.P. Isakov, A.A. Leont'ev, M.V. Lopatin, V.B. Mincev, A.E. Ushnurcev, G.P. Fomenko, V.E. Fortov, V.I. Cvetkov, V.B. Shnejder, B.K. Yasel'skij // Doklady Akademii nauk SSSR. 1991. Т. 319. № 2. pp. 352–355.



14. Zherlicin A.G., Mel'nikov G.V., Isakov P.Ya. 'Eksperimental'noe issledovanie polya izlucheniya trioda s virtual'nym katodom // Radiotekhnika i `elektronika. 2006. T. 51. № 2. pp. 221–225.

15. Proboj vozduha v narastayuschem SVCh pole / V.S. Barashenkov, L.P. Grachev, I.I. Esakov, B.F. Kostenko, V.K. Hodataev, M.Z. Yur'ev // Zhurnal tehniczeskoj fiziki, 2000, T. 70, № 10. pp. 34–39.

16. Zarin A.S., Kuzovnikov A.A., Shibkov V.M. Svobodno lokalizovannyj SVCh-razryad v vozduhe. M.: Neft' i gaz, 1996. 204 p.

© Волков А.А., 2019

Волков Алексей Анатольевич, кандидат технических наук, преподаватель 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.