

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.6.8>

УДК 621.373

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ МОЩНОГО СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАДАЧЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОРАЖЕНИЯ ГРУППЫ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

А. А. Волков

**Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 А**

Статья поступила в редакцию 17 июня 2021 г.

Аннотация. Определены способы повышения эффективности формирователей электромагнитного поля на основе мощных сверхвысокочастотных генераторов при электромагнитном поражении группы радиоэлектронных средств, распределенных на земной поверхности. В качестве показателя эффективности выбран радиус зоны электромагнитного поражения самого стойкого радиоэлектронного средства. Учтены ограничения максимальной мощности генератора, обусловленные конечным запасом энергии источника электропитания и (или) электрической прочностью воздуха в излучающей антенне. Установлено, что основными способами повышения эффективности формирователей электромагнитного поля являются выбор параметров излучения генератора и характеристик направленности излучающей антенны. Определены оптимальные режимы работы сверхвысокочастотного генератора при ограниченном запасе энергии источника питания. Проведено сравнение эффективности формирователей с разными типами излучающих антенн. Показано, что наиболее предпочтительными для решения рассматриваемой задачи являются антенны с узкими тороидальными диаграммами направленности.

Ключевые слова: формирователь электромагнитного поля, сверхвысокочастотный генератор, параметры излучения, электромагнитное поражение.

Abstract. Methods for increasing the efficiency of electromagnetic field shapers based on powerful microwave generators in case of electromagnetic defeat to a group of radio-electronic means distributed on the earth's surface have been determined. As an indicator of efficiency the radius of the zone of electromagnetic defeat of the most resistant radio-electronic mean was chosen. The limitations of the maximum power of the generator due to the finite energy of the power supply and (or) the electrical strength of the air in the radiating antenna are taken into account. It was found that the main methods to improve the efficiency of the electromagnetic field formers are the choice of the radiation parameters of the generator and the directivity characteristics of the radiating antenna. The optimal modes of operation of a microwave generator with a limited energy the power source have been determined. A comparison is made of the efficiency of shapers with different types of radiating antennas. It is shown that antennas with narrow toroidal radiation patterns are the most preferable for solving the problem under consideration.

Key words: electromagnetic field shaper, microwave generator, radiation parameters, electromagnetic damage.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется вопросам деструктивного воздействия мощных импульсных электромагнитных полей (ЭМП) на радиоэлектронную аппаратуру, что обусловлено необходимостью решения ряда важных прикладных задач. Одной из таких задач является задача электромагнитного поражения (ЭП) группы радиоэлектронных средств (РЭС), распределенных по земной поверхности в одном районе. Указанная задача может быть решена при помощи формирователя ЭМП большой мощности, доставляемого в район расположения группы РЭС на воздушном носителе. Под формирователем ЭМП в настоящей работе понимается система устройств, состоящая из источника питания, генератора и антенны. Под эффективностью формирователя ЭМП в рассматриваемой задаче понимается радиус зоны, внутри которой выполнены условия поражения всех РЭС из группы.

Мощность выходного излучения формирователя определяется в основном генератором ЭМП. Анализ состояния развития указанных устройств показал, что наибольшей мощностью излучения на данный момент и в перспективе обладают приборы вакуумной релятивистской сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники – черенковские генераторы, виркаторы и релятивистские магнетроны [1]. В классе данных приборов освоен диапазон мощностей в единицы гигаватт при длительностях импульсов десятки-сотни наносекунд. Некоторые образцы черенковских генераторов [2] и виркаторов [3] позволили превзойти уровень 10 ГВт. Поэтому ниже будут рассматриваться формирователи ЭМП, построенные на основе генераторов указанного класса.

Основным способом ЭП группы РЭС является излучение мощных электромагнитных импульсов над ее центром с некоторой высоты. В [4] рассматривался способ ЭП РЭС при помощи изотропного излучателя большой мощности – электромагнитного боеприпаса. На горизонтальной плоскости изотропный излучатель создает круговую зону поражения, радиус которой достигает максимального значения при излучении на нулевой высоте. В [5] рассматривался способ, в котором поражающие импульсы излучались вертикально вниз при помощи антенны с плоской круглой апертурой.

Рассмотренные способы ЭП группы РЭС обладают низкой эффективностью из-за не оптимального для данной задачи распределения ЭМП в пространстве. Кроме того, в [4,5] не рассмотрены возможности повышения радиуса зоны ЭП в режиме излучения последовательности импульсов ЭМП.

Цель работы – поиск способов повышения эффективности формирователей ЭМП на основе мощных СВЧ генераторов в задаче ЭП группы РЭС, распределенных по земной поверхности.

1. Определение способов повышения эффективности формирователей СВЧ излучения в задаче ЭП группы РЭС

При решении задачи будет считаться, что затухание ЭМП в атмосфере пренебрежимо мало, а РЭС распределены на плоской горизонтальной поверхности. Также будет считаться, что диаграмма направленности антенны

формирователя симметрична относительно вертикали, а интенсивность создаваемого излучения максимальна в центре зоны поражения и монотонно спадает к её границе. В этом случае зона ЭП на земной поверхности будет иметь форму круга.

Схема способа применения формирователя ЭМП при ЭП группы РЭС, распределенных по земной поверхности, показана на рисунке 1, где обозначено: H – высота излучения; $R_{ЭП}$ – радиус зоны ЭП; $\theta_{гр}$ – угол между вертикалью и прямой, соединяющей точку излучения и точку на границе зоны ЭП.

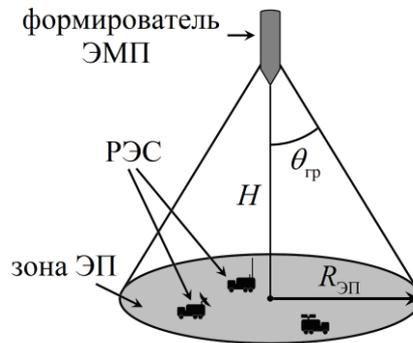


Рис. 1. Схема способа применения формирователя ЭМП при ЭП группы РЭС.

Радиус зоны ЭП для схемы на рисунке 1 равен [4]:

$$R_{ЭП} = \sqrt{\frac{P\eta_a D(\theta_{гр})}{4\pi\Pi}} \sin \theta_{гр} \quad (1)$$

где P – мощность СВЧ генератора; η_a – коэффициент полезного действия антенны $D(\theta)$ – зависимость коэффициента направленного действия (КНД) антенны формирователя от направления излучения, характеризуемого углом θ относительно вертикали:

$$D(\theta) = D_{\max} f^2(\theta) \quad (2)$$

D_{\max} – максимальное значение КНД антенны; $f(\theta)$ – нормированная амплитудная диаграмма направленности антенны; Π – плотность мощности поражения самого стойкого РЭС из группы.

При воздействии на РЭС последовательности импульсов ЭМП плотность мощности поражения можно оценить по формуле [6]:

$$P(\tau, T, N) = P_0 + \frac{1 - e^{-(T-\tau)/\tau_0}}{1 - e^{-N(T-\tau)/\tau_0}} \left(\frac{w_0}{\tau} + \frac{B_0}{\sqrt{\tau}} \right) \quad (3)$$

где τ , T , N – длительность, период повторения и количество импульсов ЭМП; P_0 , w_0 , B_0 , τ_0 – коэффициенты модели поражения РЭС, определяемые экспериментально. Плотность мощности ЭП РЭС убывает при увеличении длительности и количества импульсов и при уменьшении их периода повторения. Коэффициенты P_0 , w_0 , B_0 зависят от частоты и направления прихода ЭМП.

Из (1) с учетом (2) следует, что радиус зоны ЭП можно повысить следующими способами:

- 1) увеличив мощность генератора P ;
- 2) уменьшив уровень поражения Π ;
- 3) увеличив значение функции $\sqrt{D_{\max}} f(\theta_{\text{гр}}) \sin \theta_{\text{гр}}$.

В отсутствие каких-либо ограничений на параметры излучения τ , T , N возможности первых двух способов определяются достижимыми характеристиками генератора ЭМП. Из (1) с учетом (3) следует, что наибольший радиус зоны ЭП в этом случае будет иметь формирователь с самым мощным генератором, излучающий самые длинные импульсы с самым малым периодом повторения. Однако в реальных условиях параметры излучения всегда ограничены. Основными ограничивающими факторами являются конечный запас энергии источника питания формирователя, и электрический пробой атмосферного воздуха в антенне при излучении мощных ЭМП. Указанные факторы приводят к ограничению мощности генератора ЭМП сверху, максимальное значение которой определяется по формуле [7]:

$$P_{\max}(\tau, T, N) = \min(P_w(\tau, T, N), P_{\text{пр}}(\tau, T, N)) \quad (4)$$

где $P_w(\tau, T, N)$ – предельно допустимая мощность, обусловленная ограничением на запас энергии источника питания; $P_{\text{пр}}(\tau, T, N)$ – предельно

допустимая мощность, обусловленная электрической прочностью атмосферного воздуха в излучающей антенне. Функции-ограничения $P_w(\tau, T, N)$, $P_{пр}(\tau, T, N)$ могут быть оценены по формулам [7]:

$$P_w(\tau, T, N) = \frac{\eta_r W_{\text{ИП}0}}{N\tau + (N-1)\chi T}, \quad (5)$$

$$P_{пр}(\tau, T, N) = P_{пр\text{ ст}} \begin{cases} \left(1 - b \ln \left(1 + \frac{\ln \gamma}{N\nu_a \tau}\right)\right)^{-2}, & T \leq \Delta T_N, \\ \left(1 - b \ln \left(1 + \frac{\ln \gamma}{\nu_a \tau} + \frac{1}{\nu_a \tau} \ln \left(\frac{e^{\nu_\beta T} - 1}{e^{\nu_\beta T} + 1}\right)\right)\right)^{-2}, & T > \Delta T_N, \end{cases} \quad (6)$$

где $W_{\text{ИП}0}$ – запас энергии источника питания; η_r – КПД генератора ЭМП; χ – коэффициент потерь холостого хода источника питания; $P_{пр\text{ ст}}$ – статический пробойный уровень мощности в излучающей антенне; 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 $n_{\text{кр}}$ к плотности фоновых электронов n_0 ; ΔT_N – максимальный межимпульсный интервал, при котором пробойная мощность ещё зависит от количества импульсов:

$$\Delta T_N = \frac{1}{\nu_\beta} \ln \left(\frac{\gamma^{(N-1)/N} + 1}{\gamma^{(N-1)/N} - 1} \right). \quad (7)$$

В (5) и (6) учтено, что длительность импульсов мощных релятивистских СВЧ генераторов, как правило, на несколько порядков меньше периода их повторения:

$$\tau \ll T. \quad (8)$$

Из (5) и (6) следует, что предельно допустимая мощность генератора ЭМП убывает при увеличении длительности и количества импульсов и при

уменьшении их периода повторения. Следовательно, при наличии ограничений на параметры излучения первый и второй способы повышения эффективности ЭМБ по отдельности не могут быть осуществлены и вырождаются в один способ, суть которого состоит в выборе оптимальных значений параметров излучения, максимизирующих радиус зоны ЭП. В этом способе в границах областей реализуемых значений параметров τ , T , N для заданного СВЧ генератора должно быть найдено наибольшее значение функции трех переменных $P_{\max}(\tau, T, N)/\Pi(\tau, T, N)$.

В третьем способе возможность повысить $R_{ЭП}$ может быть реализована путем увеличения максимального КНД D_{\max} , а также путем выбора диаграммы направленности $f(\theta)$ и (или) угла $\theta_{гр}$, который связан с высотой излучения соотношением

$$H = R_{ЭП} / \operatorname{tg} \theta_{гр}, \quad (9)$$

и может принимать значения из интервала $0 \dots \pi/2$ рад.

Наибольшее значение произведения $f(\theta)\sin\theta$ равно единице, поскольку функции $f(\theta)$ и $\sin\theta$ не могут быть больше единицы. Реализовать это значение можно только при $\theta_{гр} = \pi/2$ рад. Следовательно, наибольшее значение радиуса зоны ЭП по углу $\theta_{гр}$ может быть достигнуто при сосредоточении главного максимума излучения в направлении $\theta = \pi/2$ рад, т.е. при выполнении условия $f(\pi/2) = 1$. Данному условию удовлетворяют симметричные относительно вертикальной оси диаграммы направленности, имеющие форму тора. Плоскость главного максимума их излучения параллельна земной поверхности. Такими диаграммами обладают некоторые цилиндрически симметричные антенны, например, цилиндрические поверхностные антенны [8] или цилиндрические антенные решетки [9]. Оптимальная высота излучения при использовании антенн с диаграммами направленности указанного типа, как следует из (9), равна нулю. Однако поражаемые РЭС и их антенны, как правило, приподняты над поверхностью земли, поэтому за нулевой уровень

высоты необходимо принимать средний уровень подъёма РЭС или их антенн над землёй.

На рисунке 2 показан вариант положения сектора излучения антенны формирователя ЭМП с тороидальной диаграммой направленности. Излучающая поверхность расположена на боковой поверхности вертикально спускаемого носителя. Максимум ее излучения направлен перпендикулярно вектору скорости снижения носителя.

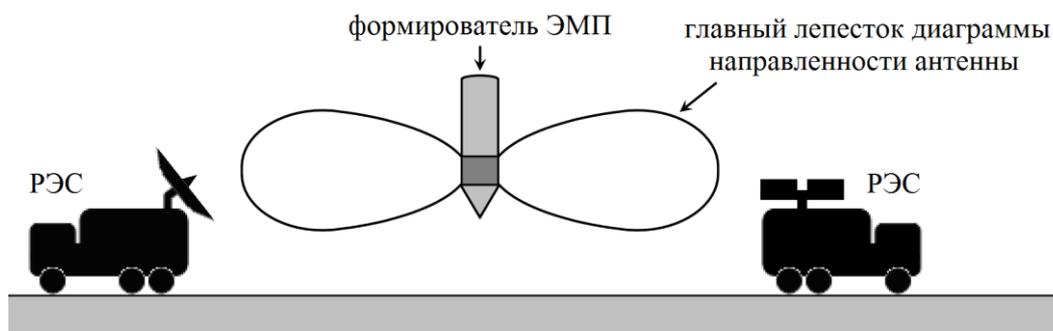


Рис. 2. Сектор излучения антенны с тороидальной диаграммой направленности.

2. Оценка оптимальных параметров излучения формирователя ЭМП при ЭП РЭС СВЧ диапазона

Наибольшую эффективность рассматриваемые формирователи ЭМП должны иметь в задачах ЭП приемных РЭС СВЧ диапазона, поскольку в этом случае частота поражающего излучения может быть относительно просто согласована с рабочей полосой приемного тракта. В этих РЭС в зависимости от конструкции приемного тракта наиболее уязвимыми элементами являются либо СВЧ транзисторы малошумящих усилителей радиочастоты, либо СВЧ смесительные диоды. В моделях поражения (3) многих диодов и транзисторов СВЧ диапазона коэффициент при степени $\tau^{-1/2}$ близок к нулю [10], поэтому ниже будет использоваться упрощенная модель, которая с учетом условия (8) имеет вид:

$$\Pi(\tau, T, N) = \Pi_0 + \frac{w_0}{\tau} \kappa_0(T, N), \quad (10)$$

где $\kappa_0(T, N)$ – безразмерная функция периода повторения и количества импульсов:

$$\kappa_0(T, N) = \frac{1 - e^{-T/\tau_0}}{1 - e^{-NT/\tau_0}}. \quad (11)$$

В общем виде установить закономерности, которым подчиняются оптимальные параметры излучения, не представляется возможным. Это обусловлено тем, что в зависимости от массогабаритных показателей и конструкции носителя, а также длительности, периода повторения и количества импульсов предельно допустимая мощность может определяться разными факторами, т.е. функции-ограничения (5) и (6) в границах областей реализуемых значений параметров излучения СВЧ генераторов могут иметь пересечения. Однако решение задачи может быть получено в некоторых интересных для практики частных случаях, одним из которых является случай, в котором предельно допустимая мощность СВЧ генератора обусловлена только ограничением на энергию источника питания ($P_w < P_{пр}$).

При выполнении указанного условия предельно допустимая мощность СВЧ генератора равна:

$$P_{\max}(\tau, T, N) = P_w(\tau, T, N) = \frac{\eta_r W_{\text{ИП0}}}{N\tau + (N-1)\chi T}. \quad (12)$$

Подстановка (10) и (12) в (1) приводит к формуле:

$$R_{\text{ЭП}} = R_{\text{ЭП } P_w} \mathcal{G}_{P_w}(\tau, T, N), \quad (13)$$

где $R_{\text{ЭП } P_w}$ – максимальное значение радиуса зоны ЭП РЭС при ограничении на запас энергии источника питания:

$$R_{\text{ЭП } P_w} = \sqrt{\frac{\eta_a \eta_r W_{\text{ИП0}} D(\theta_{\text{гр}})}{4\pi w_0}} \sin \theta_{\text{гр}}, \quad (14)$$

$\mathcal{G}_{P_w}(\tau, T, N)$ – безразмерная функция параметров излучения:

$$\mathcal{G}_{P_w}(\tau, T, N) = \sqrt{\frac{\tau_T}{(N\tau + (N-1)\chi T) \left(1 + \frac{\tau_T \kappa_0(T, N)}{\tau}\right)}}, \quad (15)$$

$\tau_T = w_0/\Pi_0$ – время тепловой релаксации в полупроводниковом кристалле. Для СВЧ диодов и транзисторов значения τ_T находятся в диапазоне от сотен наносекунд до единиц микросекунд [10].

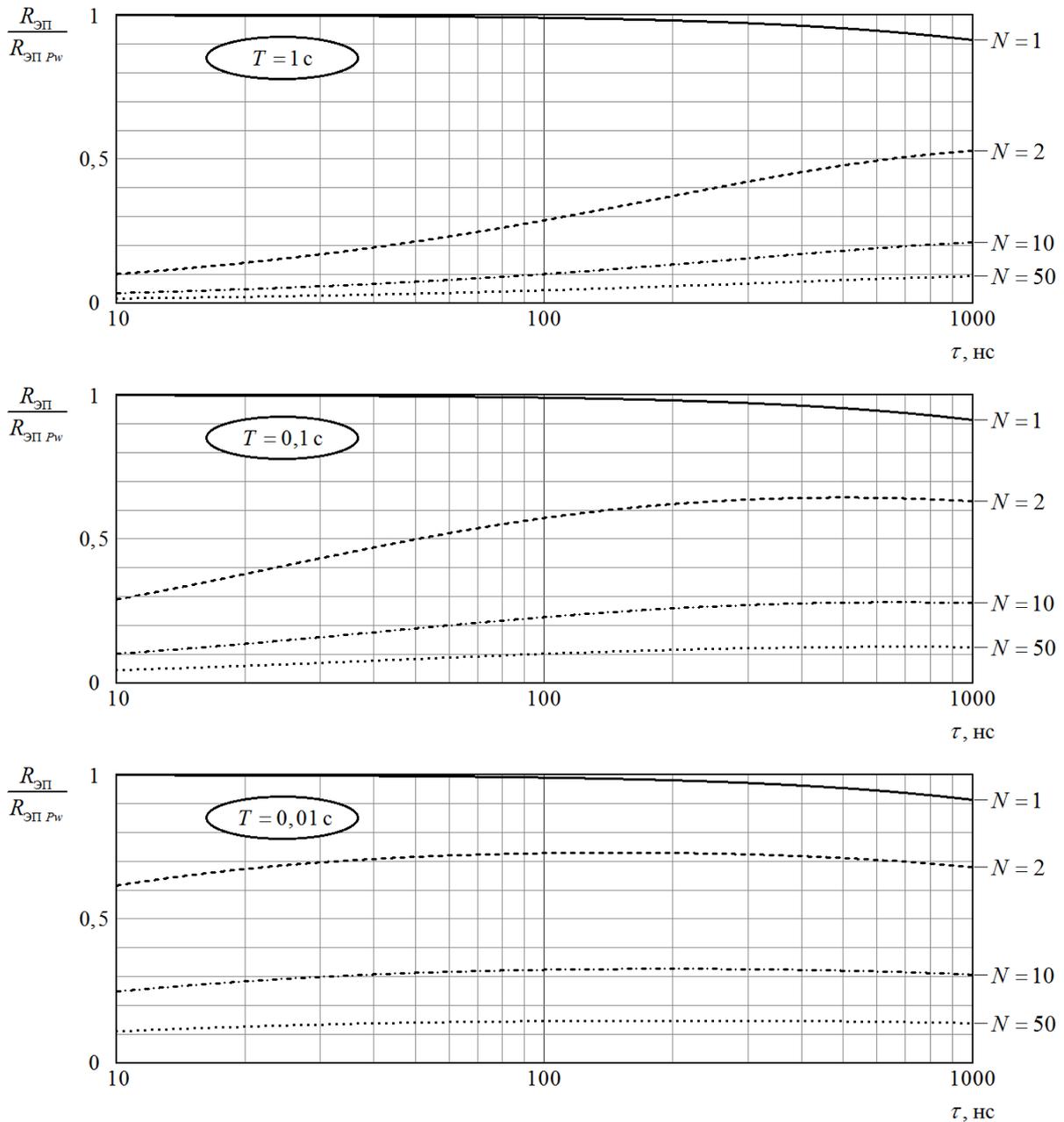


Рис. 3. Зависимости относительного радиуса зоны ЭП РЭС от длительности импульсов в различных режимах работы формирователя ЭМП.

На рисунке 3 показаны графики зависимостей относительного радиуса зоны ЭП РЭС $R_{ЭП}/R_{ЭП Pw}$ от длительности импульсов при различных значениях их периода повторения и количества в пачке. В качестве исходных данных

выбраны следующие значения постоянных величин: $\tau_T = 5$ мкс, $\tau_0 = 5$ мс, $\chi = 10^{-6}$.

Из графиков на рисунке 3 видно, что при ограничении мощности формирователя только запасом энергии источника питания наибольшее значение радиус зоны ЭП РЭС достигает в режиме одиночного импульса на нижней границе диапазона длительностей. Увеличение количества импульсов приводит к снижению радиуса зоны ЭП, что обусловлено уменьшением содержания в них энергии и увеличением влияния потерь холостого хода. Уменьшение периода повторения приводит к увеличению радиуса зоны ЭП, что обусловлено снижением потерь холостого хода в интервалах между импульсами. В режиме пачки импульсов зависимость относительного радиуса зоны ЭП от длительности импульса имеет максимум, положение которого определяется решением уравнения $\partial \mathcal{G}_{pw}(\tau, T, N) / \partial \tau = 0$ относительно τ . Это решение выражается формулой:

$$\tau_m(T, N) = \sqrt{\kappa_0(T, N) T \chi \tau_T (N - 1) / N}. \quad (16)$$

Координата максимума по оси ординат может быть определена подстановкой (16) в (15):

$$\mathcal{G}_{pw m}(T, N) = \mathcal{G}_{pw}(\tau_m, T, N) = \frac{1}{\sqrt{(N - 1) \chi T / \tau_T} + \sqrt{N \kappa_0(T, N)}}. \quad (17)$$

На рисунке 4 показаны графики зависимостей координат максимума отношения $R_{ЭП} / R_{ЭП pw}$ от количества импульсов ЭМП при различных значениях периода их повторения. Из графиков видно, что для принятых исходных данных значения величины τ_m находится в диапазоне реализуемых длительностей импульсов релятивистских СВЧ генераторов. Положение максимума относительного радиуса зоны ЭП РЭС по оси длительностей импульсов в режиме пачки слабо зависит от их количества. При уменьшении периода повторения положение максимума смещается в область более коротких длительностей, а относительный радиус зоны ЭП возрастает.

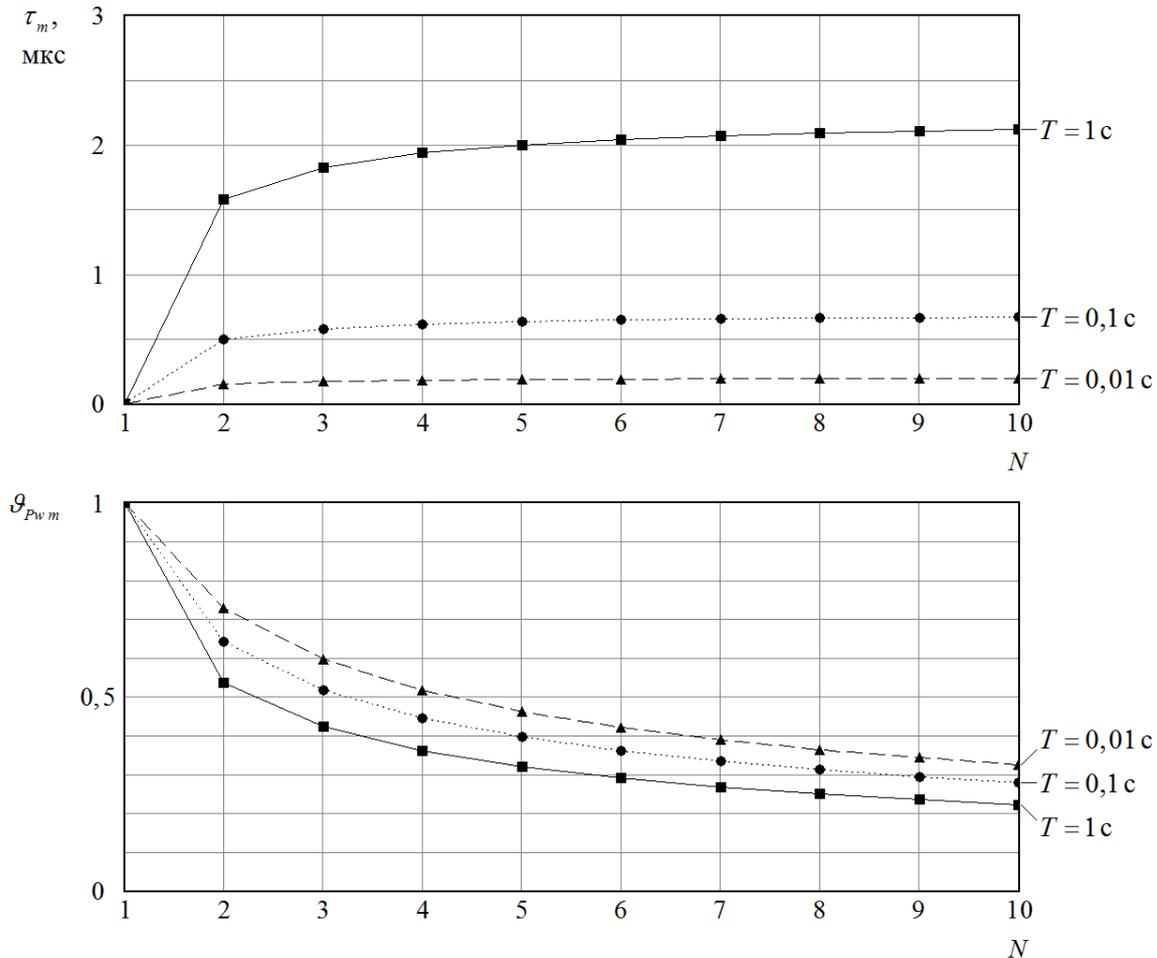


Рис. 4. Зависимости координат максимума относительного радиуса зоны ЭП РЭС от количества импульсов в пачке.

3. Оценка и сравнение возможностей формирователей ЭМП с различными типами излучателей в задаче ЭП РЭС

При заданной диаграмме направленности излучающей антенны формирователя максимизировать радиус зоны ЭП РЭС (1) по углу $\theta_{гр}$ можно путем выбора оптимальной высоты излучения. Выбор $\theta_{гр}$ должен обеспечивать максимальное значение произведения $f(\theta)\sin\theta$. Для непрерывной и дифференцируемой в интервале $0 \leq \theta \leq \pi/2$ рад функции $f(\theta)$ правило выбора оптимального значения угла $\theta_{гр}$ имеет вид:

$$\theta_{гр\text{ опт}} = \arg \max \left\{ |f(\theta_1)|\sin\theta_1, |f(\theta_2)|\sin\theta_2, \dots, |f(\theta_m)|\sin\theta_m, |f(\pi/2)| \right\}, \quad (18)$$

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

$$\frac{d}{d\theta}(f(\theta)\sin\theta) = \frac{df(\theta)}{d\theta}\sin\theta + f(\theta)\cos\theta = 0 \quad (19)$$

в интервале $0 \leq \theta \leq \pi/2$ рад; m – число корней. Оптимальная высота излучения $H_{\text{опт}}$ определяется по формуле (9) при $\theta_{\text{гр}} = \theta_{\text{гр опт}}$.

Практический интерес представляет оценка возможностей формирователей с разными типами излучающих антенн (в том числе идеализированных), рассматриваемых в качестве основных в задачах ЭП РЭС. Эти антенны удобно разделить на группы по виду формы диаграммы направленности и для каждой группы провести оценку эффективности формирователя ЭМП. В качестве базовых форм диаграмм направленности излучателей мощного ЭМП могут быть выбраны шаровая, игольчатая и тороидальная формы.

Шаровой диаграммой направленности обладают идеализированные изотропные антенны. Такая модель может быть использована, например, при приближенном описании распределения в пространстве ЭМП, создаваемого облаком случайно ориентированных дипольных излучателей.

Изотропная антенна излучает ЭМП одинаково во всех направлениях, т.е. $f(\theta) = 1$, $D_{\text{max}} = 1$. Максимальный радиус зоны ЭП в данном случае в соответствии с (1), (3) и (4) равен:

$$R_{\text{ЭП max}} = R_{\text{ЭП 0}} = \sqrt{\frac{\eta_a P_{\text{max}}(\tau_{\text{опт}}, T_{\text{опт}}, N_{\text{опт}})}{4\pi\Pi(\tau_{\text{опт}}, T_{\text{опт}}, N_{\text{опт}})}}, \quad (20)$$

где $\tau_{\text{опт}}$, $T_{\text{опт}}$, $N_{\text{опт}}$ – оптимальные параметры излучения при которых отношение $P_{\text{max}}(\tau, T, N)/\Pi(\tau, T, N)$ достигает наибольшего значения. В данном случае в соответствии с (19) $\theta_{\text{гр опт}} = \pi/2$ рад, а оптимальная высота, согласно (9) равна нулю.

Игольчатая диаграмма направленности характерна, прежде всего, для очень широкого класса излучателей – плоских апертур, а также ряда других антенн. В задаче ЭП группы РЭС, распределенных по земной поверхности, такая антенна размещается над центром группы таким образом, чтобы ее

главный лепесток был направлен вертикально вниз. Данный способ излучения может быть реализован, например, при размещении излучающей апертуры в носовой части вертикально спускаемого носителя.

Для упрощения анализа ниже будет считаться, что диаграмма направленности антенны симметрична относительно главного максимума, а доля излучаемой энергии, приходящейся на боковые лепестки, пренебрежимо мала. В этом случае удобно использовать кусочно-линейную аппроксимацию игольчатой диаграммы направленности, считая распределение излучения в пределах некоторого сектора равномерным [11]:

$$f_{\text{ан}}(\theta) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \theta \leq \Delta\theta, \\ 0, & \theta > \Delta\theta, \end{cases} \quad (21)$$

где $\sigma(\theta)$ – функция Хевисайда; $\Delta\theta < \pi/2$ рад – эквивалентная полуширина реальной диаграммы направленности $f(\theta)$.

Максимальный КНД в соответствии с определением [12] будет равен:

$$D_{\text{max}} = \frac{2}{\int_0^{\pi} f_{\text{ан}}^2(\theta) \sin \theta d\theta} = \frac{2}{1 - \cos \Delta\theta} \quad (22)$$

Поскольку $f_{\text{ан}}(\theta)$ является обобщенной функцией, уравнение (19) для определения оптимального значения угла $\theta_{\text{гр}}$ использовать нельзя. Однако при этом очевидно, что наибольшее значение произведения $f_{\text{ан}}(\theta) \sin \theta$ достигает на верхней границе диапазона $0 \leq \theta \leq \Delta\theta$, т.к. $\sin \theta$ в этом интервале монотонно возрастает. Следовательно $\theta_{\text{гр}} = \Delta\theta$. С учетом этого, а также (1), (20), (21) и (22) максимальный радиус зоны ЭП РЭС можно представить в виде:

$$R_{\text{ЭП max}} = R_{\text{ЭП 0}} \frac{\sqrt{2} \sin \Delta\theta}{\sqrt{1 - \cos \Delta\theta}}. \quad (23)$$

На рисунке 5 показан график зависимости относительного радиуса зоны ЭП РЭС $R_{\text{ЭП}}/R_{\text{ЭП 0}}$ от эквивалентной ширины диаграммы направленности $\Delta\theta$ для антенны с игольчатой диаграммой направленности. Из графика видно, что радиус зоны ЭП РЭС возрастает при уменьшении ширины диаграммы

направленности. Наибольшее значение $R_{ЭП \max}$ не превосходит $2R_{ЭП 0}$ и может быть достигнуто при стремлении $\Delta\theta$ к нулю.

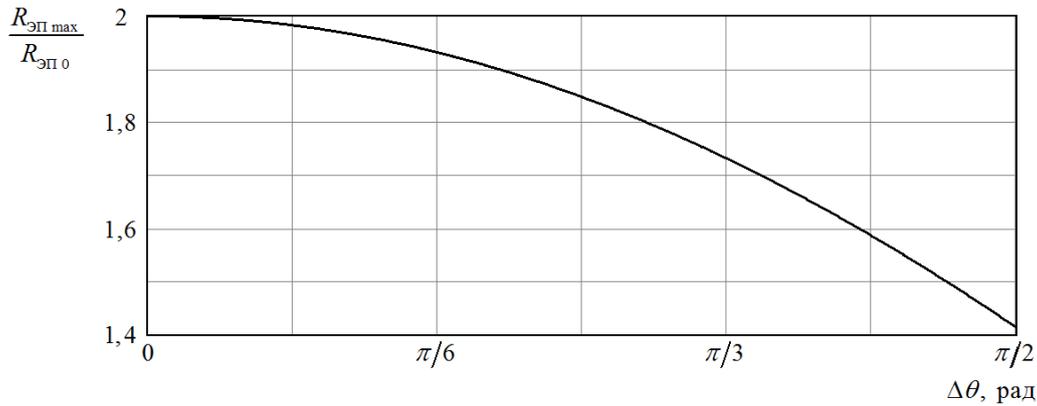


Рис. 5. Зависимость относительного максимального радиуса зоны ЭП РЭС от эквивалентной ширины игольчатой диаграммы направленности.

Максимальный радиус зоны ЭП РЭС при использовании в формирователе ЭМП антенны с игольчатой диаграммой направленности может быть достигнут на оптимальной высоте, определяемой в соответствии с (9) и учетом (23) выражением:

$$H_{\text{опт}} = \sqrt{2}R_{ЭП 0} \frac{\cos \Delta\theta}{\sqrt{1 - \cos \Delta\theta}}, \quad (24)$$

Из (24) видно, что при уменьшении ширины диаграммы направленности оптимальная высота неограниченно возрастает.

Следует отметить, что данный результат получен для идеального случая, когда вся энергия ЭМП распределена равномерно только в пределах одного лепестка. Реальные антенны всегда имеют боковые лепестки, поэтому часть энергии СВЧ генератора будет излучаться в область пространства, где объекты ЭП отсутствуют. В связи с этим значения реальной относительной эффективности формирователя с рассматриваемой антенной будут лежать ниже кривой, показанной на рисунке 5, но при этом будут превосходить единицу, т.е. $R_{ЭП 0} < R_{ЭП \max} < 2R_{ЭП 0}$. В этот диапазон попадают результаты оценки радиуса ЭП РЭС в некоторых частных случаях, имеющиеся в литературе. Так в работе [5] показано, что при излучении поражающих импульсов плоской круглой

апертурой, возбуждаемой синхронно полем, имеющим максимум в центре апертуры и монотонно спадающим к ее краям, максимальный радиус ЭП РЭС составляет примерно $1,2R_{ЭП0}$. Следовательно, реальная антенна с игольчатой диаграммой направленности имеет небольшой выигрыш перед изотропным излучателем.

Тороидальными диаграммами направленности обладают антенны с цилиндрической симметрией, главный сектор излучения которых расположен перпендикулярно их оси вращения. Для таких антенн, как было показано выше, $\theta_{гр} = \pi/2$ рад и $H_{опт} = 0$. Используя аналогичный предыдущему случаю подход, и считая диаграмму направленности не зависящей от азимутального угла, ее можно аппроксимировать кусочно-линейной функцией:

$$f_{ан}(\theta) = \begin{cases} 0, & 0 \leq \theta < \pi/2 - \Delta\theta, \\ 1, & \pi/2 - \Delta\theta \leq \theta \leq \pi/2 + \Delta\theta, \\ 0, & \pi/2 + \Delta\theta \leq \theta < \pi. \end{cases} \quad (25)$$

Вычисление максимального КНД для диаграммы (25) дает:

$$D_{max} = \frac{1}{\sin \Delta\theta}. \quad (26)$$

С учетом (26) максимальный радиус зоны ЭП РЭС будет равен:

$$R_{ЭП max} = \frac{R_{ЭП0}}{\sqrt{\sin \Delta\theta}}. \quad (27)$$

На рисунке 6 показан график зависимости относительного радиуса зоны ЭП РЭС $R_{ЭП}/R_{ЭП0}$ от эквивалентной ширины диаграммы направленности $\Delta\theta$ для антенны с тороидальной диаграммой направленности. Из графика видно, что радиус зоны ЭП РЭС неограниченно возрастает при уменьшении ширины диаграммы направленности. На этом же рисунке для сравнения показан аналогичный график для антенны с игольчатой диаграммой направленности.

При относительно широких диаграммах направленности ($\Delta\theta \geq \pi/12$ рад) антенна с тороидальной диаграммой направленности незначительно превышает по эффективности ЭП РЭС изотропный излучатель и проигрывает антенне с игольчатой диаграммой направленности. Это связано с тем, что при увеличении

ширины тороидальной диаграммы направленности все большая часть энергии генератора будет излучаться в области пространства, где поражаемые РЭС отсутствуют. Данная антенна по своим свойствам становится все ближе к изотропному излучателю.

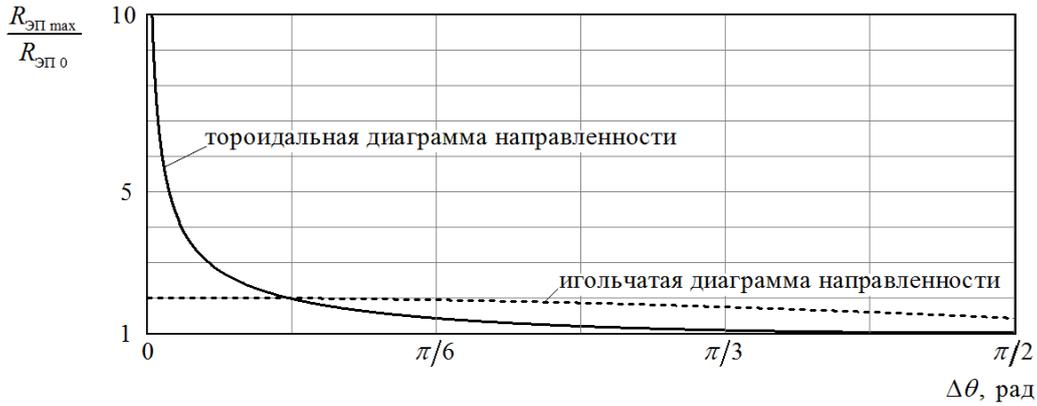


Рис. 6. Зависимости относительного максимального радиуса зоны ЭП РЭС от эквивалентной ширины диаграммы направленности различных антенн.

В области узких диаграмм направленности ($\Delta\theta \leq \pi/12$ рад) выигрыш по эффективности ЭП РЭС имеет антенна с тороидальной диаграммой направленности. При уменьшении $\Delta\theta$ для антенны с тороидальной диаграммой наблюдается резкий рост относительного радиуса зоны ЭП РЭС, в то время как для антенны с игольчатой диаграммой наблюдается насыщение эффективности. В частности, при $\Delta\theta = 0,0094$ рад ($0,54^\circ$) антенна с тороидальной диаграммой обеспечивает радиус зоны ЭП РЭС в 5 раз больший, чем антенна с игольчатой диаграммой.

Заключение

Таким образом, определены способы повышения эффективности формирователей ЭМП на основе мощных СВЧ генераторов в задаче ЭП группы РЭС, распределенных на горизонтальной плоскости. В отсутствие ограничений носителя эффективность формирователя ЭМП может быть повышена путем увеличения мощности генератора, длительности и количества излучаемых импульсов, а также уменьшения периода их повторения. В условиях ограничений носителя, обусловленных конечным запасом энергии источника

электропитания и (или) электрической прочностью воздуха в излучающей антенне, повысить эффективность формирователя ЭМП позволяет оптимизация параметров излучения (длительности, периода повторения и количества импульсов) по критерию максимума отношения предельно допустимой мощности СВЧ генератора к уровню электромагнитной стойкости поражаемых РЭС. Также показано, что эффективность формирователя ЭМП зависит от характеристик направленности его излучающей антенны. Наиболее предпочтительными для решения рассматриваемой задачи являются антенны с тороидальной диаграммой направленности и большим усилением в направлении главного максимума излучения. Проведен анализ режимов работы формирователя при ограниченном запасе энергии источника питания для типовых исходных данных. Установлено, что в этом частном случае оптимальным режимом работы генератора ЭМП является режим одиночного импульса с наименьшей реализуемой длительностью. В пачечном режиме радиус зоны ЭП РЭС имеет максимум в диапазоне реализуемых длительностей импульсов и растет при уменьшении их количества и периода следования. Проведено сравнение по эффективности ЭП РЭС формирователей ЭМП с разными типами излучающих антенн. Установлено, что антенны с широкими игольчатыми и тороидальными диаграммами направленности имеют небольшой выигрыш перед изотропным излучателем. Антенна с игольчатой диаграммой направленности превосходит по эффективности изотропный излучатель менее чем в два раза. Значительный выигрыш в радиусе зоны ЭП РЭС позволяют получить антенны с узкой тороидальной диаграммой направленности. Для формирователей с такими антеннами радиус зоны ЭП обратно пропорционален корню из ширины диаграммы направленности.

Литература

1. Диденко А.Н. *СВЧ-энергетика: Теория и практика*. Москва, Наука. 2003. 446 с.

2. Бугаев С.П., Канавец В.И., Климов А.И., Кошелев В.И., Слепков А.И., Черепенин В.А. Взаимодействие электронного потока и электромагнитного поля в многоволновом черенковском генераторе с мощностью 10^{10} ватт. *Радиотехника и электроника*. 1987. Т.32. №7. С.1488–1498.
3. Bromborsky A., Kehs R.A., Hattlin G.A., Graybell S.E., Still M.E., Clarc M.C., Bartach R., Davis H.A., Sherwood E., Thode L.E. Preliminary Results from a Reflex Diode Experiment Aurora Intense Pulsed Relativistic Electron Beam Generator. *1987 IEEE International Conference on Plasma Science*. Arlington, VA, 1987. P.39.
4. Добыкин В.Д., Куприянов А.И., Пономарёв В.Г., Шустов Л.Н. *Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем*. Москва, Вузовская книга. 2007. 468 с.
5. Авдеев В.Б. Достижимые характеристики электромагнитного поражения распределенных по земной поверхности радиоэлектронных целей. *Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника*. 2001. Т.44. №9. С.4–16.
6. Волков А.А., Трифонов П.А. Учет времени повторения и числа импульсов электромагнитного поля при оценке уровней стойкости радиоэлектронных средств в рамках тепловой модели. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика*. 2015. №4. С.5–12.
7. Волков А.А. О допустимой мощности автономного формирователя импульсного электромагнитного поля на основе мощного сверхвысокочастотного генератора. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2020. №5. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may20/6/text.pdf>. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.5.6>
8. Волков А.А. Характеристики направленности цилиндрической поверхностной антенны. *Антенны*. 2016. №7. С.28–34.

9. Воскресенский Д.И., Пономарев В.И., Филиппов В.С. *Выпуклые сканирующие антенны (основы теории и методы расчета)*. Москва, Советское радио. 1978. 304 с.
10. Усыченко В.Г., Сорокин Л.Н. *Стойкость сверхвысокочастотных радиоприемных устройств к электромагнитным воздействиям*. Москва, Радиотехника. 2017. 288 с.
11. Раков В.И. *Методы аппроксимации диаграмм направленного действия антенн радиолокационных станций*. Ленинград, ВМАКВ. 1958. 59 с.
12. Шифрин Я.С. *Антенны*. Харьков, ВИРТА. 1976. 408 с.

Для цитирования:

Волков А.А. Способы повышения эффективности формирователей мощного сверхвысокочастотного излучения в задаче электромагнитного поражения группы радиоэлектронных средств. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.6.8>