

DOI 10.30898/1684-1719.2020.5.6

УДК 621.373

## О ДОПУСТИМОЙ МОЩНОСТИ АВТОНОМНОГО ФОРМИРОВАТЕЛЯ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ МОЩНОГО СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ГЕНЕРАТОРА

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 7 мая 2020 г.

**Аннотация.** Определены факторы, ограничивающие мощность автономного формирователя электромагнитного поля, построенного по схеме «источник питания – сверхвысококачастотный генератор». Получены выражения для оценки предельно допустимой мощности, обусловленной конечным энергетическим ресурсом источника питания и электрической прочностью воздуха в антенне генератора. Определен порядок выбора параметров излучения по критерию наибольшей мощности. Дана оценка предельно допустимой мощности формирователя электромагнитного поля на основе виркатора.

**Ключевые слова:** формирователь электромагнитного поля, сверхвысококачастотный генератор, параметры излучения.

**Abstract.** The efficiency of the electromagnetic field shapers in solving a number of applied problems directly depends on the power of the emitted pulses. When using the shaper in stand-alone mode, the energy supply of the power source, as a rule, cannot be replenished and the power of the generated pulses becomes dependent on their number, duration and repetition period. At the same time, the radiated power is always limited by the electrical breakdown of the air in the antenna during the removal of electromagnetic energy into the atmosphere. Breakdown power also depends on the number, duration and pulse repetition period. The aim of the work is to assess the maximum permissible power of the electromagnetic field shapers under conditions of restrictions on the energy supply of the power source and the electric

strength of the atmosphere. The basis for solving the problem was the energy balance equation in the «power source – generator» system, the ratio between the electric field strength and power in the surface antenna, as well as the ratio between the breakdown level of the electric field strength and the parameters of the sequence of emitted pulses. The energy balance equation takes into account idle losses during pauses between pulses. As a result of solving the problem, expressions are obtained for estimating the maximum permissible power due to the final energy resource of the power source and the electric strength of the air in the antenna of the generator. The methodology for selecting the parameters of the pulse sequence according to the criterion of the highest radiated power is determined. It is established that with an increase of the duration of the pulses and (or) their number, the maximum permissible power of the shaper decreases, regardless of the limiting factor. For the repetition period, the maximum allowable power may have an optimum. The maximum permissible power of the electromagnetic field shaper based on the vircator was calculated. The coordinates of the optimum point were determined for the repetition period for different values of the pulse duration and their number in the packet. The results can be used to justify the requirements for the radiation parameters of the electromagnetic field shapers based on high-power microwave generators.

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

## 1. Введение

Формирователи импульсного электромагнитного поля (ЭМП) на основе мощных сверхвысокочастотных (СВЧ) релятивистских генераторов (виркаторов, черенковских генераторов, релятивистских магнетронов и др. [1]) могут стать основой для развития систем радиолокации, связи, радиоэлектронной борьбы, а также других технических систем, используемых в народном хозяйстве. Эффективность формирователей ЭМП при решении ряда прикладных задач, к которым, в частности, относится задача электромагнитного поражения радиоэлектронных средств [2], прямо зависит от

мощности излучаемых импульсов. Указанное обстоятельство обуславливает стремление разработчиков приблизить выходную мощность к предельно допустимому уровню.

В общем виде формирователь ЭМП представляет собой систему устройств, состоящую из источника питания, СВЧ генератора и излучающей антенны. При размещении формирователя на носителе и автономном его использовании запас энергии источника питания, как правило, не может пополняться и мощность генерируемых импульсов становится зависимой от их количества, длительности и периода повторения. Вместе с этим излучаемая мощность всегда ограничена сверху некоторым пределом, обусловленным электрическим пробоем воздуха в антенне при выводе электромагнитной энергии в атмосферу. Пробойная мощность пропорциональна квадрату пробойного уровня по напряженности электрического поля, который тоже зависит от количества, длительности и периода повторения импульсов [3].

Вопросы влияния электрического пробоя воздуха на предельные параметры источников мощного ЭМП рассматривались ранее в работах [2,4]. Их результаты получены для моноимпульсного режима генерации и поэтому не могут быть использованы для оценок предельных параметров излучения формирователей ЭМП в импульсно-периодическом режиме. Вместе с этим зависимость параметров излучения от начального запаса энергии источника питания не учитывалась.

Целью работы является оценка предельно допустимой мощности формирователя ЭМП в условиях ограничений на запас энергии источника питания и электрическую прочность атмосферы.

## **2. Оценка предельно допустимой мощности формирователя ЭМП, обусловленной конечным запасом энергии источника питания**

При формировании импульсов поля генератор преобразует энергию источника питания в энергию СВЧ излучения с некоторой эффективностью. В интервалах времени между импульсами система находится в состоянии

холостого хода. В общем случае это состояние может сопровождаться потерями энергии. Поэтому уравнение энергетического баланса при формировании импульсной последовательности, состоящей из  $N$  непересекающихся импульсов, можно представить в виде:

$$W_{\text{ИП}0} = \sum_{i=1}^N W_{\text{ИП ген } i} + \sum_{i=1}^{N-1} W_{\text{ИП ХХ } i(i+1)}, \quad (1)$$

где  $W_{\text{ИП}0}$  – запас энергии источника питания;  $W_{\text{ИП ген } i}$  – энергия источника питания, затраченная на генерацию  $i$ -го импульса;  $W_{\text{ИП ХХ } i(i+1)}$  – энергия источника питания, теряемая в состоянии холостого хода во время паузы между  $i$ -м и  $(i+1)$ -м импульсами. В общем виде величины  $W_{\text{ИП ген } i}$  и  $W_{\text{ИП ХХ } i(i+1)}$  определяются по формулам:

$$W_{\text{ИП ген } i} = - \int_{T_i}^{T_i + \tau_i} P_{\text{ИП мгн } i}(t) dt = P_{\text{ИП } i} \tau_i, \quad (2)$$

$$W_{\text{ИП ХХ } i(i+1)} = - \int_{T_i + \tau_i}^{T_{i+1}} Q_{\text{ИП мгн } i(i+1)}(t) dt = Q_{\text{ИП } i(i+1)} \Delta T_{i(i+1)}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{ИП мгн } i}(t)$ ,  $P_{\text{ИП } i}$  – мгновенная и средняя мощности источника питания в режиме генерации  $i$ -го импульса;  $Q_{\text{ИП мгн } i(i+1)}(t)$ ,  $Q_{\text{ИП } i(i+1)}$  – мгновенная и средняя мощности источника питания в состоянии холостого хода во время паузы между  $i$ -м и  $(i+1)$ -м импульсами;  $\tau_i$  – длительность  $i$ -го импульса;  $T_i$  – момент начала  $i$ -го импульса;  $\Delta T_{i(i+1)} = T_{i+1} - T_i - \tau_i$  – временной интервал между  $i$ -м и  $(i+1)$ -м импульсами.

Эффективность преобразования энергии источника питания в СВЧ излучение определяется типом, конструкцией и схемой включения генератора и характеризуется коэффициентом полезного действия (КПД):

$$P_i = \eta_i P_{\text{ИП } i}, \quad (4)$$

где  $P_i$  – средняя мощность  $i$ -го импульса СВЧ излучения;  $\eta_i$  – КПД СВЧ генератора при формировании  $i$ -го импульса.

Мощность источника питания в состоянии холостого хода удобно выражать в долях мощности, затраченной на генерацию импульса:

$$Q_{\text{ИП } i(i+1)} = \chi_{i(i+1)} P_{\text{ИП } i}, \quad (5)$$

где  $\chi_{i(i+1)}$  – коэффициент потерь холостого хода во время паузы между  $i$ -м и  $(i+1)$ -м импульсами.

Подстановка (2) – (5) в (1) дает:

$$W_{\text{ИП0}} = \sum_{i=1}^{N-1} \left( \left( \tau_i + \chi_{i(i+1)} \Delta T_{i(i+1)} \right) \frac{P_i}{\eta_i} \right) + \frac{P_N \tau_N}{\eta_N}. \quad (6)$$

Одним из наиболее интересных для практики режимов работы формирователей ЭМП является режим генерации последовательностей импульсов одинаковой мощности  $P$  и длительности  $\tau$ , следующих с постоянным периодом повторения  $T$ . В этом случае  $P_i = P$ ,  $\tau_i = \tau$ ,  $T_i = (i-1)T$ ,  $\Delta T_{i(i+1)} = \Delta T = T - \tau$ ,  $\eta_i = \eta$ ,  $\chi_{i(i+1)} = \chi$ , а уравнение энергетического баланса примет вид:

$$W_{\text{ИП0}} = \left( N\tau + (N-1)\chi(T-\tau) \right) \frac{P}{\eta}. \quad (7)$$

Из (7) следует, что при заданном количестве, длительности и периоде повторения импульсов в последовательности их мощность будет ограничена величиной:

$$P_w(\tau, T, N) = \frac{\eta W_{\text{ИП0}}}{N\tau + (N-1)\chi(T-\tau)}. \quad (8)$$

Таким образом, ограничение на запас энергии источника питания приводит к обратной зависимости предельной мощности генератора  $P_w(\tau, T, N)$  от количества, длительности и периода повторения импульсов.

Для исключения влияния на предельную мощность периода повторения необходимо обеспечить выполнение условия:

$$T - \tau \ll \frac{N\tau}{(N-1)\chi}. \quad (9)$$

Современные мощные релятивистские СВЧ генераторы способны формировать последовательности импульсов нано- и микросекундного диапазонов длительностей с частотой повторения единицы-сотни Гц. Для таких исходных данных при  $N \gg 1$  условие (9) принимает вид:

$$T \ll \frac{\tau}{\chi}. \quad (10)$$

### 3. Оценка предельно допустимой мощности формирователя ЭМП, обусловленной электрической прочностью воздуха в антенне генератора

Излучение ЭМП мощных релятивистских СВЧ генераторов в атмосферу производится в основном через диэлектрические окна в корпусах приборов, разделяющие их вакуумные тракты и воздушное пространство. При превышении напряженностью электрического поля критического значения на поверхности окна со стороны атмосферы может возникнуть пробой воздуха, что приведет к снижению эффективности излучения ЭМП. Критерий пробоя в данном случае можно представить в виде:

$$E_{\max} = E_{\text{пр}}, \quad (11)$$

где  $E_{\max}$  – максимальная напряжённость электрического поля в излучающем окне;  $E_{\text{пр}}$  – импульсный пробойный уровень атмосферного воздуха по напряженности поля.

Излучающие окна релятивистских СВЧ генераторов представляют собой, как правило, рупорно-волноводные поверхностные антенны [5]. Распределение амплитуд напряженности электрического поля по излучающей поверхности антенн данного типа можно представить в виде:

$$E_S(\mathbf{r}) = E_{\max} f(\mathbf{r}), \quad (12)$$

где  $E_S(\mathbf{r})$  – амплитуда напряженности электрического поля в точке с координатами, заданными вектором  $\mathbf{r}$ ;  $f(\mathbf{r})$  – безразмерная функция вектора  $\mathbf{r}$ , которая может меняться в пределах от нуля до единицы.

Распределение поля (12) определяет среднюю импульсную мощность СВЧ генератора [5]:

$$P = \frac{1}{2Z_0} \int E_S^2(\mathbf{r}) dS = \frac{\alpha E_{\max}^2 S}{2Z_0}, \quad (13)$$

где  $S$  – площадь поверхности излучающего окна;  $Z_0 = 120\pi$  Ом – волновое сопротивление свободного пространства;  $\alpha$  – коэффициент формы распределения поля:

$$\alpha = \frac{1}{S} \int f^2(\mathbf{r}) dS. \quad (14)$$

Оценка импульсного пробойного уровня напряженности электрического поля в нормальных атмосферных условиях

Импульсный пробойный уровень воздуха в нормальных атмосферных условиях может быть оценен по формуле [3]:

$$E_{\text{пр}} = \begin{cases} \frac{E_{\text{пр ст}}}{1 - b \ln \left( 1 + \frac{\ln \gamma}{N \nu_a \tau} \right)}, & T - \tau \leq \Delta T_N, \\ \frac{E_{\text{пр ст}}}{1 - b \ln \left( 1 + \frac{\ln \gamma}{\nu_a \tau} + \frac{1}{\nu_a \tau} \ln \left( \frac{e^{\nu_\beta (T-\tau)} - 1}{e^{\nu_\beta (T-\tau)} + 1} \right) \right)}, & T - \tau > \Delta T_N, \end{cases} \quad (15)$$

где  $E_{\text{пр ст}}$  – статический пробойный уровень;  $\nu_a$  – 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;  $\nu_d$  – частота отлипания электронов;  $\beta$  – 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  $n_0$ ;  $\Delta T_N$  – максимальный межимпульсный интервал, при котором пробойный уровень ещё зависит от количества импульсов:

$$\Delta T_N = \frac{1}{v_\beta} \ln \left( \frac{\gamma^{(N-1)/N} + 1}{\gamma^{(N-1)/N} - 1} \right). \quad (16)$$

Длительность импульсов мощных релятивистских СВЧ генераторов, как правило, существенно (на несколько порядков) меньше периода их повторения, т.е. выполняется соотношение:

$$\tau \ll T. \quad (17)$$

На рисунке 1 показан график зависимости величины  $\Delta T_N$  от количества импульсов в нормальных атмосферных условиях ( $v_\beta = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ ,  $n_{\text{кр}} = 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ,  $n_0 = 10^3 \text{ см}^{-3}$  [6]). Реализуемые мощными СВЧ генераторами импульсно-периодические режимы излучения ограничены снизу по периоду повторения величиной порядка 1 мс (частота следования 1 кГц). Из графика на рисунке 1 видно, что уже при  $N > 3$  граничный интервал между импульсами  $\Delta T_N$  составляет менее 1 мс. Следовательно, стационарное значение пробойного уровня поля в антенне мощного СВЧ генератора в импульсно-периодическом режиме устанавливается уже на четвертом импульсе.

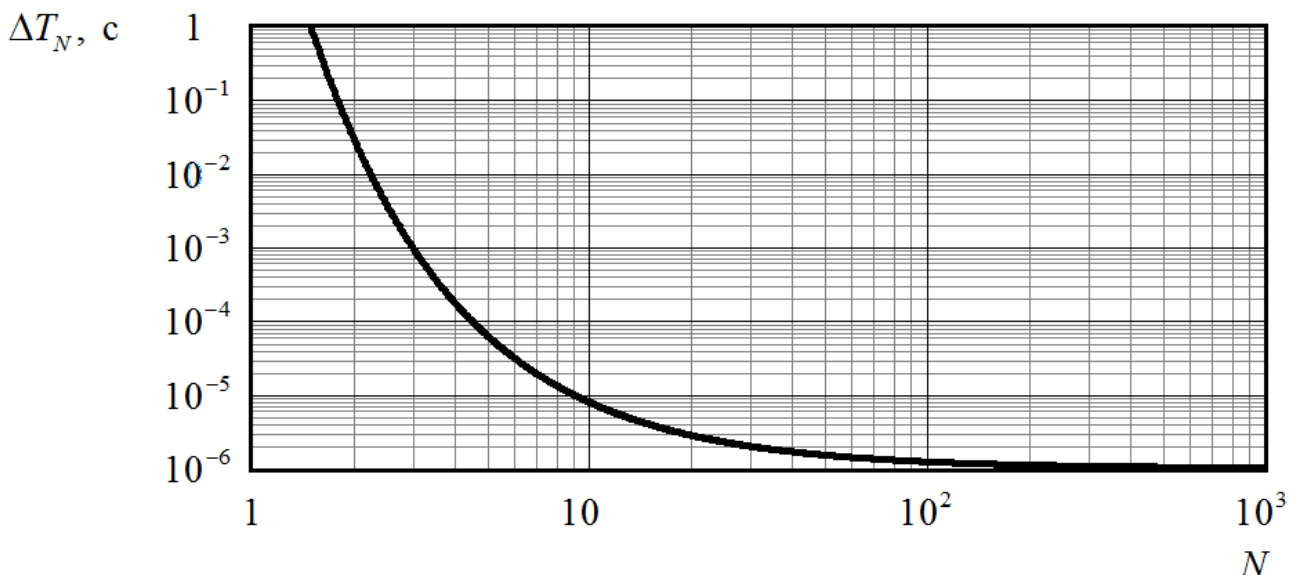


Рис. 1. Зависимость граничного интервала между импульсами от их количества

Подстановка (11) в (15) с учетом (13) и (17) позволяет получить выражение предельно допустимой пробойной мощности на излучающей поверхности окна



мощного релятивистского СВЧ генератора в режиме формирования импульсной последовательности:

$$P_{\text{пр}}(\tau, T, N) = \begin{cases} \frac{P_{\text{пр ст}}}{\left(1 - b \ln \left(1 + \frac{\ln \gamma}{N v_a \tau}\right)\right)^2}, & T \leq \Delta T_N, \\ \frac{P_{\text{пр ст}}}{\left(1 - b \ln \left(1 + \frac{\ln \gamma}{v_a \tau} + \frac{1}{v_a \tau} \ln \left(\frac{e^{v \beta T} - 1}{e^{v \beta T} + 1}\right)\right)\right)^2}, & T > \Delta T_N, \end{cases} \quad (18)$$

где  $P_{\text{пр ст}}$  – статическая пробойная мощность в излучающем окне:

$$P_{\text{пр ст}} = \frac{\alpha E_{\text{пр ст}}^2 S}{2Z_0}. \quad (19)$$

Из (18) видно, что при увеличении длительности и количества импульсов, а также при уменьшении периода их следования предельно допустимая пробойная мощность уменьшается.

#### 4. Выбор параметров излучения формирователя ЭМП по критерию наибольшей импульсной мощности

Мощность формирователя ЭМП ограничена функциями (8) и (15), поэтому ее предельно допустимое значение при заданных параметрах  $\tau$ ,  $T$  и  $N$  должно определяться по формуле:

$$P_{\text{доп}}(\tau, T, N) = \min(P_w(\tau, T, N), P_{\text{пр}}(\tau, T, N)). \quad (20)$$

Критерий наибольшей импульсной мощности подразумевает такой выбор параметров последовательности, при котором функция  $P_{\text{доп}}(\tau, T, N)$  достигает наибольшего значения в границах областей заданных значений длительности  $(\tau_{\text{min}}, \tau_{\text{max}})$ , периода повторения  $(T_{\text{min}}, T_{\text{max}})$  и количества импульсов  $(N_{\text{min}}, N_{\text{max}})$ .

Функции  $P_w(\tau, T, N)$  и  $P_{\text{пр}}(\tau, T, N)$  при возрастании  $\tau$  и (или)  $N$  монотонно убывают, следовательно,  $P_{\text{доп}}(\tau, T, N)$  тоже будет убывающей

функцией по этим переменным. Оптимальными значениями длительности и количества импульсов будут, соответственно,  $\tau_{\text{опт}} = \tau_{\text{min}}$  и  $N_{\text{опт}} = N_{\text{min}}$ . При увеличении периода повторения функция  $P_w(\tau, T, N)$  убывает, а  $P_{\text{пр}}(\tau, T, N)$  – возрастает, т.е. по переменной  $T$  на интервале  $(T_{\text{min}}, T_{\text{max}})$  указанные функции могут иметь одну точку пересечения  $T_0$ . Поэтому оптимальный период повторения при заданных  $\tau$  и  $N$  следует определять по формуле:

$$T_{\text{опт}} = \begin{cases} T_{\text{min}}, & \text{при } P_w(\tau, T, N) < P_{\text{пр}}(\tau, T, N) \forall T \in (T_{\text{min}}, T_{\text{max}}), \\ T_0, & \text{при } P_w(\tau, T_0, N) = P_{\text{пр}}(\tau, T_0, N), T_0 \in (T_{\text{min}}, T_{\text{max}}), \\ T_{\text{max}}, & \text{при } P_w(\tau, T, N) > P_{\text{пр}}(\tau, T, N) \forall T \in (T_{\text{min}}, T_{\text{max}}). \end{cases} \quad (21)$$

## 5. Результаты расчета предельно допустимой мощности формирователя ЭМП на основе виркатора

Значительный практический интерес представляют оценки предельно допустимой мощности формирователей, построенных на основе наиболее мощных среди существующих генераторных приборов. В настоящее время таковыми являются черенковские генераторы и виркаторы [1]. Анализ информационных источников, содержащих сведения о характеристиках указанных приборов [7,8], показал, что существующие образцы способны генерировать СВЧ ЭМП мощностью единицы ГВт, а некоторые образцы превосходят уровень 10 ГВт.

Черенковские генераторы и виркаторы очень близки по параметрам генерируемых ими импульсов (мощности, длительности, частоте повторения) и диапазону рабочих частот. Однако виркаторы отличаются более простой и компактной конструкцией и могут работать без внешнего фокусирующего магнитного поля [7]. Данные факторы могут стать определяющими при выборе генератора для размещения на носителе с жесткими массогабаритными ограничениями. В этой связи ниже в качестве СВЧ генератора будет рассматриваться виркатор.

Анализ характеристик существующих виркаторов гигаваттного уровня мощности показал, что их энергетическая эффективность, как правило, составляет единицы процентов [9]. На основе этих данных КПД принят равным  $\eta = 0,01$ . Длительности импульсов виркаторов лежат в диапазоне десятков-сотен наносекунд [7,9]. При этом могут быть реализованы режимы генерации пачек, состоящих из десятков-сотен импульсов [10].

В качестве источника питания рассматривался накопитель с начальной энергией 5 МДж. Коэффициент потерь холостого хода принят равным  $\chi = 10^{-5}$ .

Расчет проведен для генератора, имеющего плоскую круглую антенну радиуса  $R = 0,15$  м с симметричным распределением поля типа «косинус на пьедестале»:

$$f(\mathbf{r}) = \frac{1}{2} \left( 1 + \cos \frac{\pi r}{2R} \right), \quad (22)$$

где  $r$  – расстояние от центра апертуры до элемента излучающей поверхности. При таком распределении коэффициент формы равен  $\alpha = 0,556$ .

Для описания среды использовались исходные данные, соответствующие нормальным атмосферным условиям: [6]:  $\nu_a = 7,6 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ ;  $\nu_\beta = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ ;  $n_{\text{кр}} = 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ;  $n_0 = 10^3 \text{ см}^{-3}$ . Пробойный уровень по напряженности поля в диапазоне СВЧ составляет 32 кВ/см [11].

На рисунке 2 представлены графики зависимостей функций-ограничений  $P_w(\tau, T, N)$  и  $P_{\text{пр}}(\tau, T, N)$  от периода повторения при фиксированной длительности импульсов 10 нс и разного их количества в пачке. На рисунке 3 представлены аналогичные зависимости при длительности импульсов 100 нс.

Из представленных графиков видно, что в зависимости от периода повторения предельно допустимую мощность определяют разные факторы. Наибольшего значения предельно допустимая мощность достигает в точке пересечения кривых. При увеличении количества импульсов в пачке оптимальный период повторения и наибольшая предельно допустимая мощность уменьшаются. Причем мощность уменьшается незначительно. Так

для  $\tau = 10$  нс при  $N = 10$  координаты точки оптимума составляют  $T_{\text{опт}} = 490$  мс,  $P_{\text{доп}} = 1,13$  ГВт, а при  $N = 500$  –  $T_{\text{опт}} = 8,8$  мс,  $P_{\text{доп}} = 1,02$  ГВт. Для  $\tau = 100$  нс при тех же значениях количества импульсов в пачке координаты точки оптимума составляют, соответственно,  $T_{\text{опт}} = 812$  мс,  $P_{\text{доп}} = 0,67$  ГВт и  $T_{\text{опт}} = 5,8$  мс,  $P_{\text{доп}} = 0,63$  ГВт.

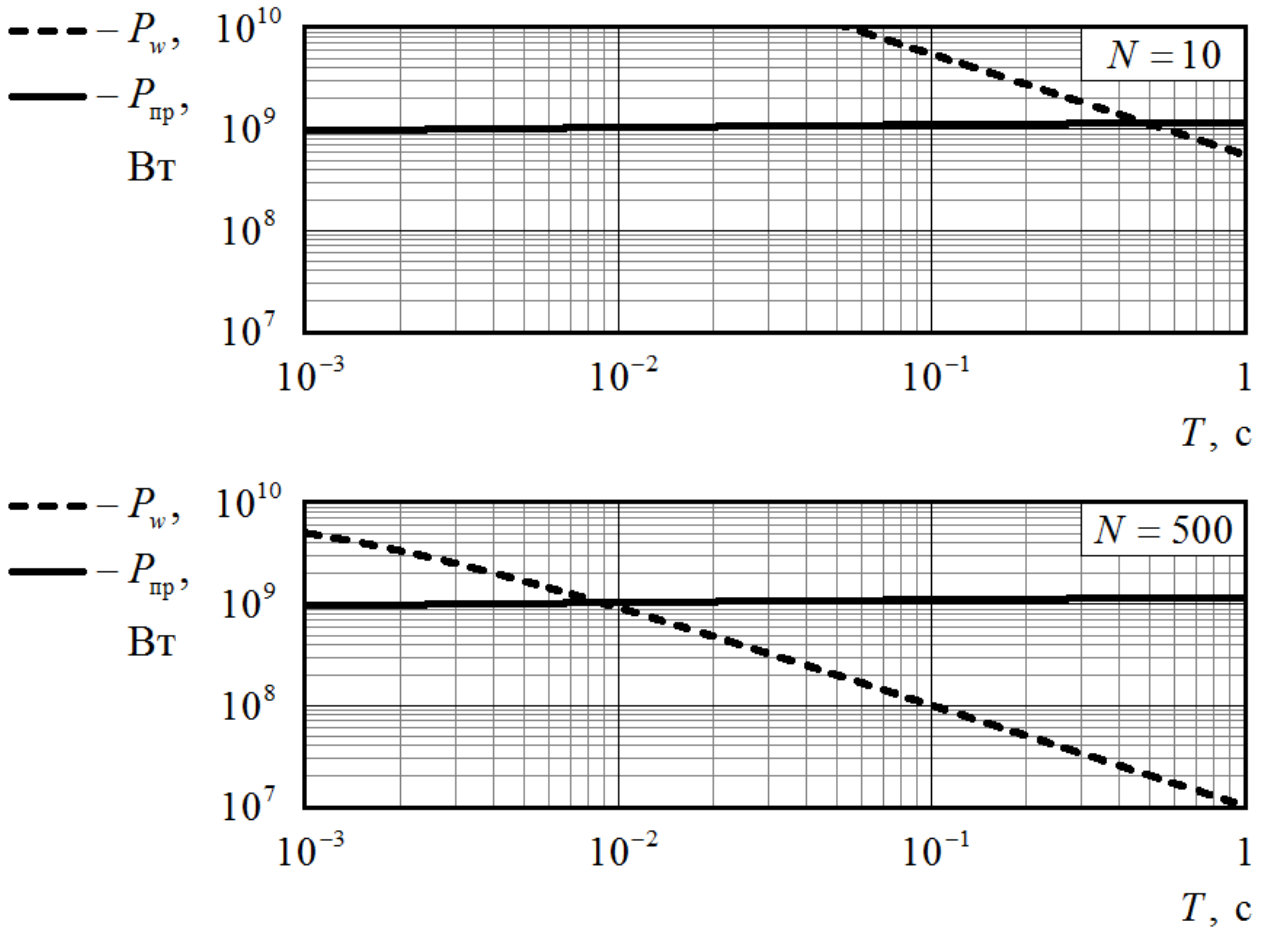


Рис. 2. Зависимости предельно допустимой мощности формирователя ЭМП от периода повторения импульсов при  $\tau = 10$  нс

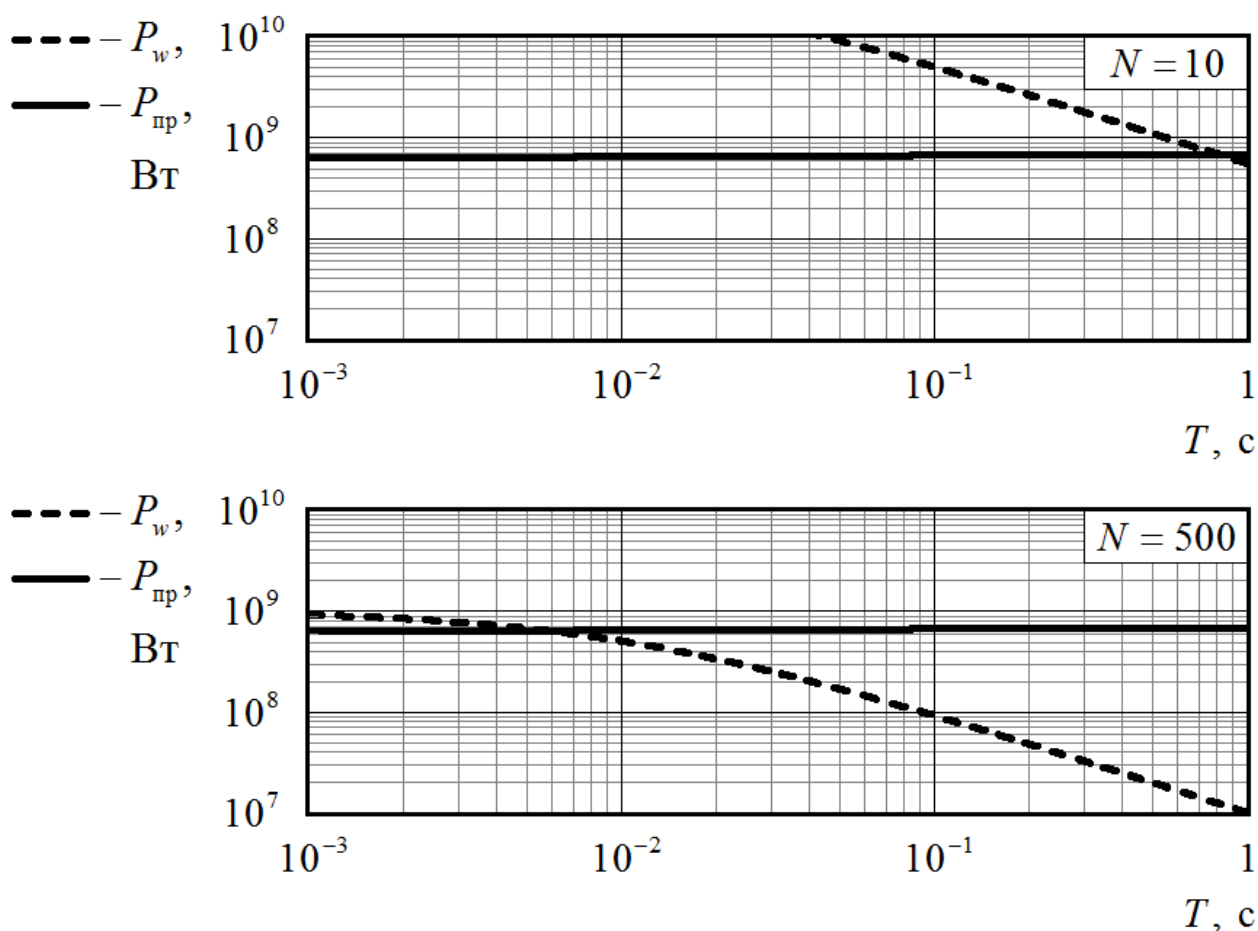


Рис. 3. Зависимости предельно допустимой мощности формирователя ЭМП от периода повторения импульсов при  $\tau = 100$  нс

## 5. Заключение

Таким образом, установлены закономерности, ограничивающие мощность формирователя ЭМП, и обусловленные конечным энергетическим ресурсом источника питания и электрической прочностью воздуха в антенне генератора. Закономерности представлены в виде аналитических выражений предельно допустимой мощности излучения как функций параметров последовательности импульсов для каждого из ограничивающих факторов. Учтены потери холостого хода в уравнении энергетического баланса формирователя ЭМП. Определена методика выбора параметров последовательности импульсов по критерию наибольшей излучаемой мощности. Установлено, что при увеличении длительности импульсов и (или) их количества предельно-допустимая мощность формирователя уменьшается, не зависимо от

ограничивающего фактора. При этом по периоду повторения предельно-допустимая мощность может иметь оптимум. Проведены расчеты предельно допустимой мощности формирователя ЭМП на основе виркатора. Показано наличие точки оптимума по периоду повторения и определены ее координаты для разных значений длительности импульсов и их количества в пачке. Полученные результаты могут быть использованы при обосновании требований к параметрам излучения формирователей ЭМП на основе мощных СВЧ генераторов.

### Литература

1. Диденко А.Н. СВЧ-энергетика: Теория и практика. М.: Наука, 2003. 446 с.
2. Добыкин В.Д., Куприянов А.И., Пономарев В.Г., Шустов Л.Н. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем. М.: Вузовская книга, 2007. 468 с.
3. Волков А.А., Трифонов П.А. Учёт времени повторения и числа импульсов при оценке пробойных уровней поля в антенных системах сверхвысокочастотных генераторов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Физика. Математика. 2014. №1. С. 15–21.
4. Fenstermachera Dan L., Frank von Hippelb. An Atmospheric Limit on Nuclear-powered Microwave Weapons // Science & Global Security. 1991. Vol. 2. P. 30–324.
5. Айзенберг Г.З. Антенны ультракоротких волн. М.: Государственное издательство литературы по вопросам связи и радио, 1957. 699 с.
6. Зарин А.С., Кузовников А.А., Шибков В.М. Свободно локализованный СВЧ-разряд в воздухе. М.: Нефть и газ, 1996. 204 с.
7. Дубинов А.Е., Селемир В.Д. Электронные приборы с виртуальным катодом // Радиотехника и электроника. 2002. Т.47. №6. С. 645–672.

8. Черепенин В.А. Релятивистские многоволновые СВЧ генераторы и их возможные применения // Успехи физических наук. 2006. Т.176. №10. С. 1124–1130.
9. Рухадзе А.А., Столбецов С.Д., Тараканов В.П. Виркаторы (обзор) // Радиотехника и электроника. 1992. Т.37. №3. С. 385–396.
10. Коровин С.Д., Пегель И.В., Полевин С.Д., Ростов В.В. Виркаторы. В кн. Вакуумная СВЧ электроника: Сборник обзоров. Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2002. С. 149–152.
11. Барашенков В.С., Грачев Л.П., Есаков И.И., Костенко Б.Ф., Ходатаев В.К., Юрьев М.З. Пробой воздуха в нарастающем СВЧ поле // Журнал технической физики. 2000. Т.70. №10. С. 34–39.

**Для цитирования:**

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>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.5.6