

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.8.9>

УДК 621.396.67

ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИМПУЛЬСА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ С ЛИНЕЙНО НАРАСТАЮЩЕЙ АМПЛИТУДОЙ В ПОВЕРХНОСТНОЙ АНТЕННЕ 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 29 июля 2020 г.

Аннотация. Эффективность мощных сверхвысокочастотных генераторов при решении ряда прикладных задач прямо зависит от мощности выводимого в атмосферу электромагнитного поля. В атмосферных условиях мощность излучения всегда ограничена электрическим пробоем воздуха в антенне. Типовыми антеннами мощных сверхвысокочастотных генераторов являются поверхностные антенны. Поэтому исследования, связанные с поиском путей повышения электрической прочности поверхностных антенн, представляют практический интерес. Один из таких путей связан с применением импульсов с линейно нарастающей амплитудой напряженности электрического поля. Цель работы состоит в определении предельно допустимых пробойных параметров импульсов указанного типа (максимальной амплитуды напряженности электрического поля, пиковой мощности и энергии) в поверхностной антенне мощного сверхвысокочастотного генератора и их сравнение с аналогичными параметрами импульсов с постоянной амплитудой. Основой для решения задачи послужили критерий пробоя и уравнение непрерывности электронов в воздухе. В результате получены выражения для оценки предельно допустимых пробойных параметров импульса с линейно нарастающей амплитудой в поверхностной антенне. Проведено сравнение указанных параметров с аналогичными параметрами импульса с постоянной амплитудой. Показано, что

пробойное поле и предельно допустимая пиковая мощность импульса с линейно нарастающей амплитудой выше, а предельно допустимая энергия ниже соответствующих параметров импульса с постоянной амплитудой при их одинаковой длительности. Определены закономерности, связывающие предельно допустимые энергию и пиковую мощность импульсов. Установлено, что при одинаковой предельно допустимой пиковой мощности энергия импульса с линейно нарастающей амплитудой выше, чем у импульса с постоянной амплитудой.

Ключевые слова: пробой воздуха, поверхностная антенна, сверхвысокочастотный генератор.

Abstract. The efficiency of high power microwave generators in the solving a number of applied problems directly depends on the power of the electromagnetic field emitted into the atmosphere. In atmospheric conditions, the radiation power is always limited by the electrical breakdown of the air in the antenna. Typical antennas for high power microwave generators are superface antennas. Therefore, studies related to the search for ways to increase the electric strength of superface antennas are of practical interest. One of these ways is associated with the use of pulses with a linearly increasing amplitude of the electric field strength. The purpose of the research is to determine the maximum permissible breakdown parameters of pulses of this type (maximum amplitude of the electric field strength, peak power and energy) in the superface antenna of a high power microwave generator and compare them with similar parameters of pulses with constant amplitude. The basis for solving the problem is the breakdown criterion and the equation of continuity of electrons in air. As a result, expressions were obtained for estimating the maximum permissible breakdown parameters of a pulse with linearly increasing amplitude in a superface antenna. The above parameters are compared with similar parameters of a pulse with constant amplitude. It is shown that the breakdown field and the maximum permissible peak power of a pulse with linearly increasing amplitude are higher, and the maximum permissible energy is lower than corresponding parameters of a pulse with a constant amplitude at the same duration. The regularities connecting the

maximum permissible energy and the peak power of the pulses have been determined. It was found that at the same maximum permissible peak power, the energy of a pulse with linearly increasing amplitude is higher than that of a pulse with constant amplitude.

Key words: air breakdown, superface antenna, microwave generator.

Введение

Мощные генераторы электромагнитного поля (ЭМП) находят все более широкое применение в различных отраслях народного хозяйства. В настоящее время наибольшей мощностью обладают приборы вакуумной релятивистской электроники сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона – виркаторы, черенковские генераторы и релятивистские магнетроны [1]. В классе данных приборов освоен диапазон мощностей в единицы ГВт, причем некоторые образцы превосходят уровень 10 ГВт [2,3]. Указанные генераторы представляют значительный практический интерес для разработчиков систем радиолокации, связи, электромагнитного поражения, а также других технических систем, эффективность которых прямо зависит от мощности излучаемых импульсов.

Излучение ЭМП мощных релятивистских СВЧ генераторов в атмосферу осуществляется в основном через рупорно-волноводные поверхностные антенны [4]. Вакуумные тракты таких приборов и воздушное пространство разделены диэлектрической перегородкой, находящейся в раскрыве антенны. При излучении мощных СВЧ импульсов вблизи перегородки со стороны атмосферы может возникнуть безэлектродный электрический пробой воздуха. Этот фактор ограничивает мощность излучения [5] и, следовательно, эффективность генераторов ЭМП.

Для оценки пробойных полей в газах широко используется модель СВЧ импульса с постоянной амплитудой. Данная модель подходит для описания импульсов, фронт и срез огибающей которых существенно короче плоской части, а также времени развития пробоя, что на практике встречается

достаточно часто. Повышению электрической прочности воздуха при излучении таких импульсов способствует укорочение их длительности [6]. Однако возможности такого способа ограничены нижним пределом реализуемых длительностей импульсов СВЧ генераторов, составляющим десятки наносекунд [7,8,9,10]. Кроме того, в диапазоне реализуемых рассматриваемыми генераторами длительностей (десятки – сотни наносекунд) предельно допустимая энергия импульсов снижается при уменьшении их длительности [11]. Поэтому поиск путей повышения предельно допустимой мощности излучения при сохранении энергии импульсов представляется актуальным.

Исследования, проведенные в работе [12], показали, что при инициации пробоя воздуха на фронте огибающей импульса уровень напряженности электрического поля может существенно превышать критический уровень при пробое на его плоской части. Данный факт указывает на возможность повышения предельно допустимой пиковой мощности в антенне СВЧ генератора при сохранении излучаемой энергии путем использования импульсов с нарастающей амплитудой. Наиболее удобным для теоретического анализа является СВЧ импульс с линейно нарастающей амплитудой.

Цель работы – определение предельно допустимых пробойных параметров импульсов электромагнитного поля с линейно нарастающей амплитудой (максимальной амплитуды напряженности электрического поля, пиковой мощности и энергии) в поверхностной антенне мощного СВЧ генератора и их сравнение с аналогичными параметрами импульсов с постоянной амплитудой.

Оценка пробойного поля

Формируемые мощными релятивистскими СВЧ генераторами импульсы ЭМП, как правило, имеют узкую полосу частот и амплитудную модуляцию. Изменение напряженности электрического поля во времени в этом случае описывается выражением:

$$E(t) = E_m(t) \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

где t – текущее время; $E_m(t)$ – функция амплитудной модуляции; ω – круговая частота; φ – начальная фаза. При этом функция $E_m(t)$ меняется медленно по сравнению с несущим колебанием, т.е. выполняется условие:

$$\frac{dE_m(t)}{dt} \ll \omega E_m(t). \quad (2)$$

Функция амплитудной модуляции для импульса с линейно нарастающей амплитудой имеет вид:

$$E_m(t) = E_{\max} \frac{t}{\tau} (\sigma(t) - \sigma(t - \tau)), \quad (3)$$

а для импульса с постоянной амплитудой:

$$E_m(t) = E_{\max} (\sigma(t) - \sigma(t - \tau)), \quad (4)$$

где E_{\max} – максимальная амплитуда; τ – длительность импульса; $\sigma(t)$ – функция Хевисайда.

Условием пробоя воздуха является достижение электронной плотности критического уровня [13]:

$$n(t) = n_{\text{кр}}, \quad (5)$$

где $n(t)$ – плотность электронов в воздухе; $n_{\text{кр}}$ – критическое значение плотности электронов. Поведение электронной плотности определяется уравнением непрерывности электронов в воздухе [13]. В нормальных атмосферных условиях при воздействии на воздух СВЧ ЭМП с напряженностью, превышающей статический пробойный уровень, это уравнение имеет вид [12]:

$$\frac{dn}{dt} = (v_i - v_a)n, \quad (6)$$

где v_a – частота прилипания электронов к молекулам газов из состава воздуха; v_i – частота ионизации молекул газов из состава воздуха электронами.

Плотность электронов связана с напряженностью электрического поля через частоту ионизации. Частота прилипания слабо зависит от внешнего ЭМП [14] и в расчетах, как правило, считается постоянной величиной. В диапазоне

СВЧ частоту ионизации определяет главным образом амплитуда переменного поля, наложенного на газ. Зависимость ν_i от E_m выражается очень громоздкой формулой [15], поэтому в теоретических оценках пробойных полей часто используют аппроксимацию этой зависимости элементарными функциями. При $E_m \leq 3E_{ст пр}$, где $E_{ст пр}$ – статический пробойный уровень, достаточно хорошее согласие теории и эксперимента дает приближенная формула [15]:

$$\nu_i = \nu_a \left(\frac{E_m}{E_{ст пр}} \right)^\beta, \quad (7)$$

где $\beta \approx 5,3$.

Модуляция амплитуды СВЧ поля в соответствии с (7) переносится на частоту ионизации, а решение уравнения (6) будет иметь вид:

$$n(t) = n_0 \exp \left(\int_0^t (\nu_i(\xi) - \nu_a) d\xi \right). \quad (8)$$

Из (5) с учетом (8) и (7) следует, что пробойное поле должно определяться из уравнения:

$$\nu_a \int_0^\tau \left(\left(\frac{E_m(\xi)}{E_{ст пр}} \right)^\beta - 1 \right) d\xi = \gamma \quad (9)$$

где $\gamma = \ln(n_{кр}/n_0)$.

Вычисление пробойного поля (предельно допустимой максимальной амплитуды) для импульса с линейно нарастающей амплитудой по формуле (9) с учетом (3) дает:

$$E_{\max пр} = E_{ст пр} (\beta + 1)^{1/\beta} \left(1 + \frac{\gamma}{\nu_a \tau} \right)^{1/\beta} \quad (10)$$

Пробойное поле для импульса с постоянной амплитудой равно [12]:

$$E_{\max пр} = E_{ст пр} \left(1 + \frac{\gamma}{\nu_a \tau} \right)^{1/\beta}. \quad (11)$$

Сравнение (10) и (11) показывает, что при одинаковых длительностях пробойное поле импульса с линейно нарастающей амплитудой в 1,415 раза выше аналогичного показателя для импульса с постоянной амплитудой.

Оценка предельно допустимых энергетических параметров импульса

Для определенности ниже будет считаться, что излучающая антенна СВЧ генератора представляет собой плоскую синхронно возбуждаемую апертуру, а распределение возбуждающего поля по ней описывается безразмерной функцией $f(\mathbf{r})$, где \mathbf{r} – радиус-вектор точки на излучающей поверхности. Функция $f(\mathbf{r})$ может принимать значения от нуля до единицы. Так же будет считаться, что вектора напряженностей электрического и магнитного полей лежат в плоскости апертуры. В таких допущениях пространственно-временное распределение напряженности электрического поля по апертуре будет иметь вид:

$$E_S(\mathbf{r}, t) = E(t) f(\mathbf{r}). \quad (12)$$

Мгновенная мощность ЭМП в апертуре в данном случае равна:

$$P_{\text{мгн}}(t) = \frac{1}{Z_0} \int E_S^2(\mathbf{r}, t) dS = \frac{\alpha E^2(t) S}{Z_0}, \quad (13)$$

где S – площадь излучающей поверхности; $Z_0 = 120\pi$ Ом – волновое сопротивление свободного пространства; α – коэффициент формы пространственного распределения поля по апертуре:

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

Под пиковой мощностью импульса в настоящей работе понимается средняя за один период мощность в окрестности точки с максимальной амплитудой. Вычисление этой величины с использованием формул (1), (13) и учетом условия (2) дает:

$$P_{\text{пик}} = \frac{\alpha E_{\text{max}}^2 S}{2Z_0}. \quad (15)$$

Предельно допустимая пиковая мощность соответствует предельно допустимой максимальной амплитуде импульса $E_{\max \text{ пр}}$. Для импульса с линейно нарастающей амплитудой она равна:

$$P_{\text{пик пр}} = P_{\text{ст пр}} (\beta + 1)^{2/\beta} \left(1 + \frac{\gamma}{v_a \tau} \right)^{2/\beta}, \quad (16)$$

а для импульса с постоянной амплитудой:

$$P_{\text{пик пр}} = P_{\text{ст пр}} \left(1 + \frac{\gamma}{v_a \tau} \right)^{2/\beta}, \quad (17)$$

где $P_{\text{ст пр}} = \alpha E_{\text{ст пр}}^2 S / (2Z_0)$ – статический пробойный уровень мощности в антенне.

На рисунке 1 показаны графики нормированных зависимостей предельно допустимой пиковой мощности от длительности импульса, построенные по формулам (16) и (17), в диапазоне реализуемых значений длительностей импульсов мощных релятивистских СВЧ генераторов. Параметры среды приняты равными [16]: $v_a = 10^8 \text{ с}^{-1}$, $n_0 = 10^3 \text{ см}^{-3}$, $n_{\text{кр}} = 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

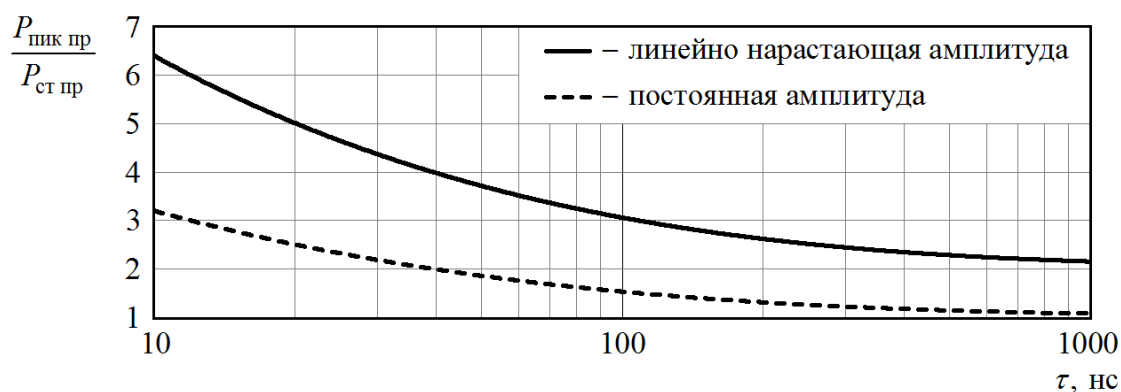


Рис. 1. Зависимости предельно допустимой пиковой мощности импульса от его длительности.

Из графиков видно, что при одинаковых длительностях предельно допустимая пиковая мощность импульса с линейно нарастающей амплитудой в 2 раза выше аналогичного показателя для импульса с постоянной амплитудой.

Энергия импульса СВЧ ЭМП (1) с учетом условия (2) определяется выражением:

$$W = \int_0^{\tau} P_{\text{МГН}}(t) dt = \frac{\alpha S}{2Z_0} \int_0^{\tau} E_m^2(t) dt. \quad (18)$$

Предельно допустимая энергия определяется как энергия импульса с предельно допустимой максимальной амплитудой. Вычисление этой величины для импульса с линейно нарастающей амплитудой дает:

$$W_{\text{пр}} = \frac{1}{3} P_{\text{ст пр}} \tau (\beta + 1)^{2/\beta} \left(1 + \frac{\gamma}{v_a \tau} \right)^{2/\beta}, \quad (19)$$

а для импульса с постоянной амплитудой:

$$W_{\text{пр}} = P_{\text{ст пр}} \tau \left(1 + \frac{\gamma}{v_a \tau} \right)^{2/\beta}, \quad (20)$$

На рисунке 2 показаны графики нормированных зависимостей предельно допустимой энергии от длительности импульса, построенные по формулам (18) и (19), в диапазоне реализуемых значений длительностей импульсов мощных релятивистских СВЧ генераторов. Нормировка проводилась к величине $W_0 = P_{\text{ст пр}}/v_a$, имеющей размерность энергии.

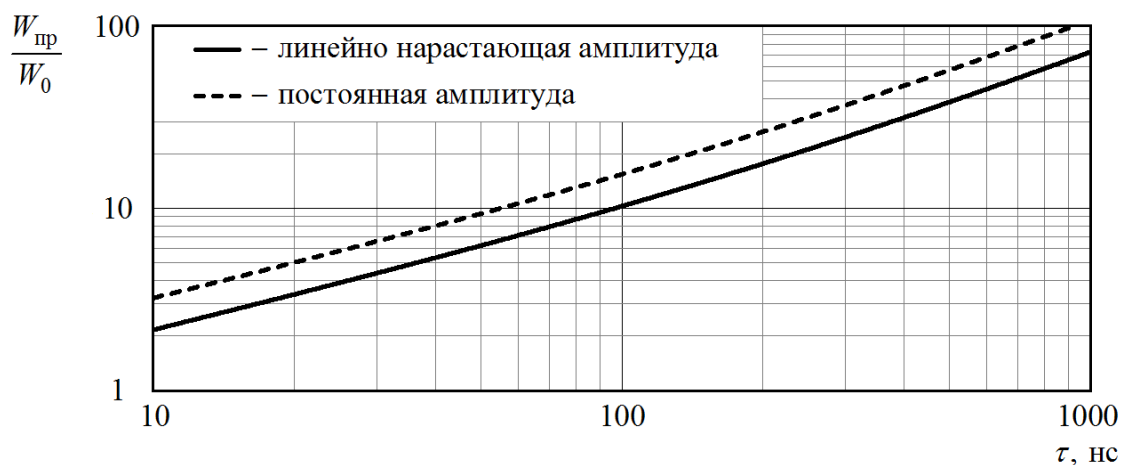


Рис. 2. Зависимости предельно допустимой энергии импульса от его длительности.

Из графиков видно, что при одинаковых длительностях предельно допустимая энергия импульса с линейно нарастающей амплитудой в 1,5 раза ниже аналогичного показателя для импульса с постоянной амплитудой.

Практический интерес также представляет зависимость предельно допустимой энергии от предельно допустимой пиковой мощности. Для импульса с линейно нарастающей амплитудой эта зависимость имеет вид:

$$W_{\text{пр}} = \frac{\gamma P_{\text{пик пр}}}{3v_a \left(\frac{1}{\beta + 1} \left(\frac{P_{\text{пик пр}}}{P_{\text{ст пр}}} \right)^{\beta/2} - 1 \right)}, \quad (21)$$

а для импульса с постоянной амплитудой:

$$W_{\text{пр}} = \frac{\gamma P_{\text{пик пр}}}{v_a \left(\left(\frac{P_{\text{пик пр}}}{P_{\text{ст пр}}} \right)^{\beta/2} - 1 \right)}. \quad (22)$$

На рисунке 3 показаны графики нормированных зависимостей предельно допустимой энергии импульса от его предельно допустимой пиковой мощности, построенные по формулам (21) и (22). Диапазоны изменения энергии и мощности соответствуют диапазону реализуемых значений длительностей импульсов мощных релятивистских СВЧ генераторов.

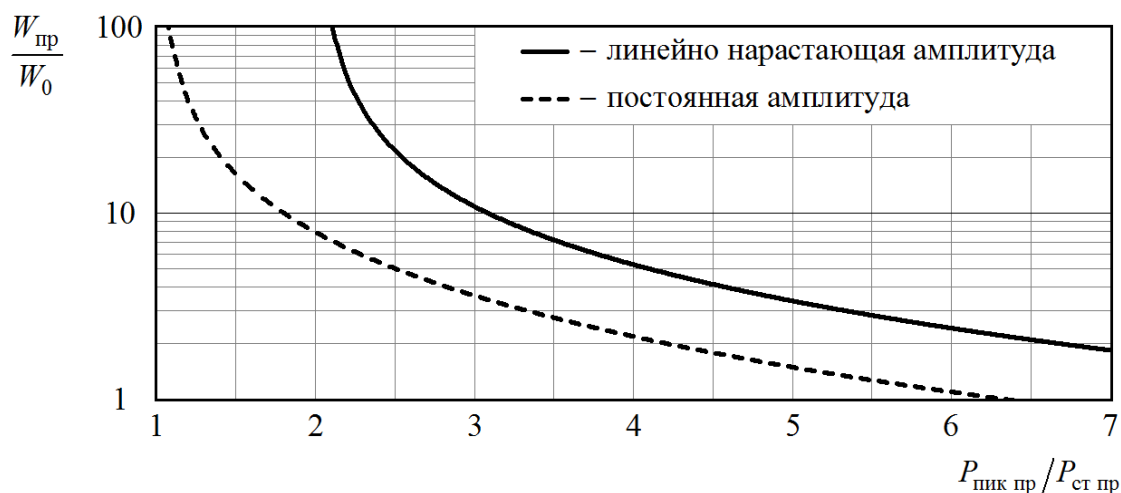


Рис. 3. Зависимости предельно допустимой энергии импульса от его предельно допустимой пиковой мощности.

Из графиков видно, что при одинаковых пиковых мощностях энергия импульса с линейно нарастающей амплитудой превосходит энергию импульса с постоянной амплитудой. Так при $P_{\text{пик пр}} = 3P_{\text{ст пр}}$ отношение предельно допустимых энергий составляет 3,02, при $P_{\text{пик пр}} = 4P_{\text{ст пр}} - 2,44$, а при $P_{\text{пик пр}} = 5P_{\text{ст пр}} - 2,27$. Т.е. разница по энергиям уменьшается при увеличении пиковой мощности.

Заключение

Таким образом, получены выражения пробойного поля, предельно допустимой пиковой мощности и предельно допустимой энергии импульса СВЧ ЭМП с линейно нарастающей амплитудой в поверхностной антенне. Проведено сравнение указанных параметров с аналогичными параметрами импульса с постоянной амплитудой. Установлено, что пробойное поле и предельно допустимая пиковая мощность импульса с линейно нарастающей амплитудой выше, а предельно допустимая энергия ниже соответствующих параметров импульса с постоянной амплитудой при их одинаковой длительности. Определены закономерности, связывающие предельно допустимые энергию и пиковую мощность для рассматриваемых импульсов. Установлено, что при одинаковой предельно допустимой пиковой мощности энергия импульса с линейно нарастающей амплитудой выше, чем у импульса с постоянной амплитудой. Данное обстоятельство указывает на возможность более эффективного использования энергии мощных релятивистских СВЧ генераторов при излучении импульсов с линейно нарастающей амплитудой. Полученные результаты могут быть использованы при обосновании требований к параметрам излучения мощных СВЧ генераторов.

Литература

1. Диденко А.Н. СВЧ-энергетика: Теория и практика. М.: Наука, 2003. 446 с.
2. Bromborsky A., Kehs R.A., Hattlin G.A., Graybell S.E., Still M.E., Clarc M.C., Bartach R., Davis H.A., Sherwood E. and Thode L.E. Preliminary Results from a

- Reflex Diode Experiment Aurora Intense Pulsed Relativistic Electron Beam Generator. // Abstracts of the 1987 IEEE International Conference on Plasma Science. Arlington, VA, 1987. P. 39.
3. 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.
 4. Айзенберг Г.З. Антенны ультракоротких волн. М.: Государственное издательство литературы по вопросам связи и радио, 1957. 699 с.
 5. Fenstermacher Dan L. and Frank von Hippelb. An Atmospheric Limit on Nuclear- powered Microwave Weapons // Science & Global Security. 1991. Vol. 2. No 4. P. 30–324.
 6. Gould L. and Roberts L.W. Breakdown of Air at Microwave Frequencies // Journal of Applied Physics. 1956. Vol. 27. No 10. P. 1162–1170.
 7. Рухадзе А.А., Столбецов С.Д., Тараканов В.П. Виркаторы (обзор) // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37. № 3. С. 385–396.
 8. Дубинов А.Е., Селемир В.Д. Электронные приборы с виртуальным катодом // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 6. С. 645–672.
 9. Черепенин В.А. Релятивистские многоволновые СВЧ генераторы и их возможные применения // Успехи физических наук. 2006. Т. 176. № 10. С. 1124–1130.
 10. Визитенко И.И. Релятивистские магнетроны. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 360 с.
 11. Волков А.А. Энергия пробоя воздуха в поверхностной антенне // Электромагнитные волны и электронные системы. 2020. № 1–2. С. 96–101.
 12. 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.
 13. Мак-Доналд А. Сверхвысокочастотный пробой в газах. М.: Мир. 1969. 212 с.

14. Александров А.Ф., Бычков В.Л., Грачев Л.П., Есаков И.И., Ломтева А.Ю. Ионизация воздуха в околокритическом электрическом поле // Журнал технической физики. 2006. Т. 76. № 3. С. 38–43.
15. Гуревич А.В. Ионизация нижней ионосферы под действием мощных радиоимпульсов // Геомагнетизм и аэрномия. 1979. Т. 19. № 4. С. 633–640.
16. Зарин А.С., Кузовников А.А., Шибков В.М. Свободно локализованный СВЧ-разряд в воздухе. М.: Нефть и газ, 1996. 204 с.

Для цитирования:

Волков А.А. Предельно допустимые параметры импульса электромагнитного поля с линейно нарастающей амплитудой в поверхностной антенне мощного сверхвысокочастотного генератора. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.8.9>