

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ, ИЗЛУЧАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТНОЙ АНТЕННОЙ БЕЗ ПРОБОЯ ВОЗДУХА

А. А. Волков¹, П. А. Трифонов²

¹ — *Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»;*

² — *Воронежский государственный университет*

Поступила в редакцию 29.03.2019 г.

Аннотация. Получено выражение предельно допустимого количества импульсов, излучаемых поверхностной антенной мощного сверхвысокочастотного генератора без пробоя атмосферного воздуха. Проведён расчёт зависимостей предельно допустимого количества импульсов от мощности генератора при фиксированных временных параметрах излучаемой последовательности для антенны с круглой апертурой. Рассматривался случай спадающего от центра к краю апертуры по квадратичному закону поля возбуждения антенны. Даны характеристики полученных зависимостей. Определены значения количества импульсов, при которых устанавливается пробойный уровень.

Ключевые слова: поверхностная антенна, электромагнитное поле, пробой воздуха.

ASSESSMENT OF LIMIT QUANTITY OF THE POWERFUL IMPULSES OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD RADIATED BY THE SUPERFICIAL ANTENNA WITHOUT AIR BREAKDOWN

A. A. Volkov, P. A. Trifonov

Abstract. Expression of limit permissible quantity of the impulses radiated by the superficial antenna of the powerful microwave generator without breakdown of atmospheric air is received. Calculation of dependences of limit permissible quantity of impulses on generator power at the fixed temporary parameters of the emitted sequence for the antenna with a round aperture is carried out. The case of the field of excitement of the antenna decreasing from the center to edge of an aperture for the square law was considered. Characteristics of the received dependences are given. Values of quantity of impulses at which breakdown level is established are defined.

Keywords: superficial antenna, electromagnetic field, air breakdown.

ВВЕДЕНИЕ

При обосновании требований к параметрам мощных сверхвысокочастотных (СВЧ) генераторов (виркаторов, черенковских генераторов, релятивистских магнетронов и др. [1]) возникает необходимость учёта пробоя атмосферного воздуха в излучающей антенне. Электрический пробой представляет собой естественный неустраняемый фактор, ограничивающий мощность и энергию излучаемого электромагнитного поля (ЭМП) и тем самым снижающий эффективность излучения. Учёт пробойных явлений особенно важен при разработке средств

электромагнитного поражения радиоэлектронной аппаратуры, потенциальные возможности которых в наибольшей степени определяются мощностью и энергией генераторов ЭМП [2].

Вывод электромагнитной энергии мощных СВЧ генераторов в атмосферу производится, как правило, через диэлектрическое окно в корпусе прибора, разделяющее вакуумные тракты генератора (рабочую камеру) и воздушное пространство, и представляющее собой поверхностную антенну (рупор или открытый конец волновода) [3]. При излучении мощного ЭМП вблизи поверхности окна со стороны атмосферы может возникнуть безэлектродный СВЧ пробой воздуха [4, 5].

Электрический пробой всегда возникает с задержкой относительно момента включения сверхкритического поля, что обусловлено инерционностью процесса ионизации молекул [5]. Наличие задержки позволяет излучать одиночные сверхкритические импульсы без пробоя в течение небольшого временного интервала, величина которого определяется напряженностью электрического поля и концентрацией фоновых электронов [4, 5].

При воздействии на воздух импульсной последовательности существенное влияние на поведение электронной плотности и, следовательно, на условия возникновения пробоя, оказывают процессы прямой рекомбинации электронов и их прилипания к молекулам с последующей рекомбинацией положительных и отрицательных ионов [6]. К моменту наступления второго и последующих импульсов в зависимости от их длительности и периода повторения концентрация электронов в воздухе может заметно отличаться от фоновой. Следовательно, количество сверхкритических импульсов, излученных антенной без пробоя воздуха, будет зависеть от временных параметров генерируемой импульсной последовательности.

Для решения большинства практических задач интерес представляет импульсно-периодический режим работы мощных СВЧ генераторов, поэтому имеется потребность в оценках предельного количества импульсов ЭМП, излучаемых антенной без пробоя воздуха. В работах [4–7] приводятся результаты эксперимента, а также методики расчета зависимостей пробойных уровней напряженности поля от длительности импульса для случаев одиночного и повторного воздействий. Данные, позволяющие оценить предельно допустимое количество импульсов, излучаемых без пробоя, в известной литературе отсутствуют.

Цель работы — определение зависимости предельно допустимого количества беспробойно излучаемых импульсов поверхностной антенной СВЧ генератора от мощности, длительности и периода повторения импульсов.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для недопущения пробоя воздуха при выводе СВЧ излучения в атмосферу необходимо поддерживать уровень напряженности электрического поля в излучающем окне генератора ниже критического значения. В противном случае в той области окна, где произошло превышение критического уровня, может развиваться электрический пробой, а образовавшаяся при этом электронная плазма будет экранировать поле. Критерию пробоя [4, 5] на поверхности окна можно сопоставить условие пробоя, выраженное в напряженностях электрического поля:

$$E_{\max} = E_{\text{пр имп}}, \quad (1)$$

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

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

$$E_S(\mathbf{r}) = E_{\max} f(\mathbf{r}), \quad (2)$$

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 (2) выражением [8]:

$$P = \frac{1}{2Z_0} \int E_S^2(\mathbf{r}) dS = \frac{E_{\max}^2}{2Z_0} \int f^2(\mathbf{r}) dS = \frac{\alpha E_{\max}^2 S}{2Z_0}, \quad (3)$$

где S — площадь излучающей поверхности; $Z_0 = 120\pi$ Ом — волновое сопротивление свободного пространства; α — коэффициент формы ($0 \leq \alpha \leq 1$):

$$\alpha = \frac{1}{S} \int f^2(\mathbf{r}) dS. \quad (4)$$

Зависимость импульсного пробойного уровня напряженности электрического поля от временных параметров последовательности импульсов для воздуха в нормальных атмосферных условиях определена в [9] 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; $\gamma = n_{\text{кр}}/n_0$ — отношение критической плотности электронной плазмы $n_{\text{кр}}$ к плотности фоновых электронов n_0 ; ν_a — частота прилипания электронов; $\nu_\beta = 2\beta\nu_a n_0/\nu_d$ — интенсивность спада электронной плотности в отсутствие поля; ν_d — частота отлипания электронов; β — коэффициент рекомбинации электронов и ионов; $b = 0.108$ — безразмерный коэффициент; ΔT_N — максимальный межимпульсный интервал, при котором пробойный уровень ещё зависит от количества импульсов:

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

Подстановка (2) и (5) в (3) позволяет получить выражение предельной мощности генератора $P_{\text{пр}}$, обусловленной пробоем воздуха в излучающем окне в импульсно-периодическом режиме:

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{пр ст}} \begin{cases} \left(1 - b \ln \left(1 + \frac{\ln \gamma}{N \nu_a \tau}\right)\right)^{-2}, & T - \tau \leq \Delta T_N, \\ \left(1 - b \ln \left(1 + \frac{\ln \gamma}{\nu_a \tau} + \frac{1}{\nu_a \tau} \ln \left(\frac{e^{\nu_\beta(T-\tau)} - 1}{e^{\nu_\beta(T-\tau)} + 1}\right)\right)\right)^{-2}, & T - \tau > \Delta T_N, \end{cases} \quad (7)$$

где $P_{\text{пр ст}} = \alpha E_{\text{пр ст}}^2 S / (2Z_0)$ — предельная мощность в антенне в режиме непрерывного излучения.

Из (7) видно, что предельная мощность $P_{\text{пр}}$ имеет две характерные области определения параметров τ , N , T , в одной из которых она зависит от количества импульсов, а в другой нет. На границе этих областей параметры τ , N , T связаны уравнением $T - \tau = \Delta T_N$, а предельная мощность равна:

$$P_{\text{пр}}^* = P_{\text{пр ст}} \left(1 - b \ln \left(1 + \frac{1}{\nu_a \tau} \ln \gamma + \frac{1}{\nu_a \tau} \ln \left(\frac{e^{\nu_\beta(T-\tau)} - 1}{e^{\nu_\beta(T-\tau)} + 1} \right) \right) \right)^{-2}. \quad (8)$$

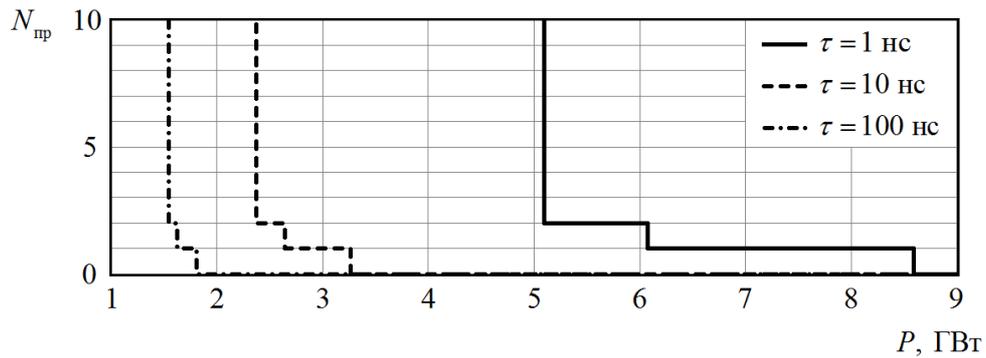


Рис. 1. Зависимости предельно допустимого количества излучаемых импульсов от мощности генератора для разных значений длительности импульсов при $T = 1$ мс.

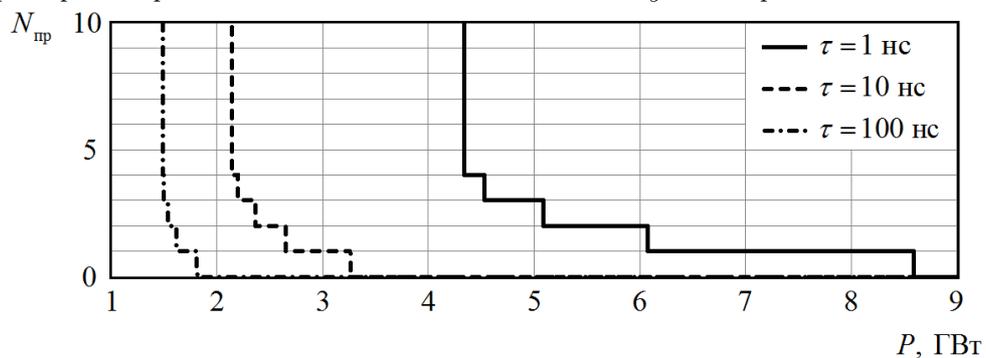


Рис. 2. Зависимости предельно допустимого количества излучаемых импульсов от мощности генератора для разных значений длительности импульсов при $T = 0,1$ мс.

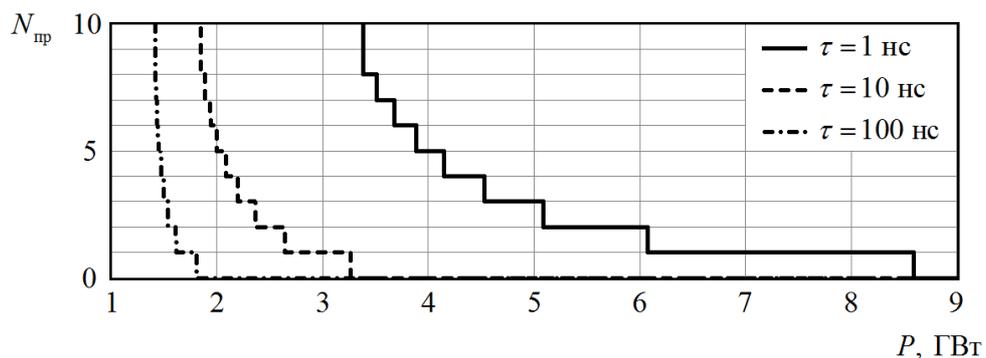


Рис. 3. Зависимости предельно допустимого количества излучаемых импульсов от мощности генератора для разных значений длительности импульсов при $T = 0,01$ мс.

Из (7) и (8) следует, что предельно допустимое количество импульсов, обусловленное пробоем воздуха в антенне, равно:

$$N_{\text{пр}} = \begin{cases} \left[\frac{\ln \gamma}{\nu_a \tau \left(e^{\left(1 - \sqrt{P_{\text{пр ст}}/P}\right)/b} - 1 \right)} \right], & P \geq P_{\text{пр}}^*, \\ \infty, & P < P_{\text{пр}}^*, \end{cases} \quad (9)$$

где [...] — оператор выделения целой части числа.

С использованием выражения (9) проведены расчеты предельного количества беспробоно излучаемых поверхностной антенной импульсов ЭМП. Частота СВЧ излучения выбрана равной 10 ГГц. Это значение соответствует одному из наиболее распространенных на практике диапазону частот мощных СВЧ генераторов. Для этой частоты статический пробойный уровень равен $E_{\text{СТ}} = 32$ кВ/см [10]. Рассматривались нормальные атмосферные условия [7]: $\nu_a = 7.6 \cdot 10^7$ с⁻¹, $\nu_\beta = 2 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹, $n_0 = 10^3$ см⁻³, $n_{\text{кр}} = 10^{12}$ см⁻³.

В качестве излучающей антенны выбрана круглая апертура радиуса $R = 25$ см с квадратично спадающим по мощности распределением поля от центра к краям апертуры: $f(\rho) = \sqrt{1 - \rho^2/R^2}$, где ρ — расстояние от центра круга до точки на излучающей поверхности. Площадь излучающей поверхности и коэффициент формы в данном случае равны, соответственно, $S = 0,196$ м² и $\alpha = 0,5$. Статический пробойный уровень мощности при этом равен $P_{\text{пр ст}} = 1,33$ ГВт.

На рисунках 1, 2 и 3 показаны графики зависимостей предельного количества импульсов ЭМП, излучаемых апертурой без пробоя воздуха, от импульсной мощности генератора при периодах повторения, соответственно, 1 мс, 0,1 мс и 0,01 мс для различных длительностей импульсов (1 нс, 10 нс, 100 нс). Из этих графиков видно, что предельно допустимое количество импульсов уменьшается при увеличении мощности и длительности импульсов и при уменьшении периода их повторения. При излучении последовательности импульсов мощностью меньшей $P_{\text{пр}}^*$ электрический пробой воздуха в антенне не возникает, а количество излучаемых импульсов не ограничено пробойными явлениями. Граничное значение мощности $P_{\text{пр}}^*$ представляет собой установившийся пробойный уровень для заданных τ и T . Из представленных графиков следует, что для периодов повторения 1 мс, 0,1 мс и 0,01 мс пробойный уровень устанавливается, соответственно, при излучении 3, 5 и 9 импульсов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, получено выражение предельно допустимого количества мощных импульсов ЭМП, излучаемых поверхностной антенной СВЧ генератора без электрического пробоя воздуха. Для антенны с круглой апертурой с квадратично спадающим распределением поля с максимумом в центре апертуры проведён расчёт зависимости предельно допустимого количества излучаемых импульсов от мощности генератора при разных значениях их длительности и периода повторения. В результате установлено, что предельно допустимое количество импульсов возрастает при уменьшении их мощности и длительности и при увеличении периода повторения. Показано, что круглая апертура радиуса 25 см в наносекундном диапазоне длительностей позволяет излучать последовательности единиц импульсов, мощность которых превосходит установившийся пробойный уровень.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диденко, А. Н. СВЧ-энергетика: Теория и практика / А. Н. Диденко. — М. : Наука, 2003. — 446 с.

2. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем / В. Д. Добыкин, А. И. Куприянов, В. Г. Пономарёв, Л. Н. Шустов. — М. : Вузовская книга, 2007. — 468 с.
3. Драбкин, А. Л. Антенно-фидерные устройства / А. Л. Драбкин, В. Л. Зузенко, А. Г. Кислов. — М. : Советское радио, 1974. — 320 с.
4. Мак-Доналд, А. Сверхвысокочастотный пробой в газах / А. Мак-Доналд. — М. : Мир, 1969. — 212 с.
5. Райзер, Ю. П. Основы физики газоразрядных процессов / Ю. П. Райзер. — М. : Наука, 1980. — 416 с.
6. Гуревич, А. В. Ионизированный слой в газе (атмосфере) / А. В. Гуревич // Успехи физических наук. — 1980. — Т. 132, вып. 4. — С. 685–690.
7. Зарин, А. С. Свободно локализованный СВЧ-разряд в воздухе / А. С. Зарин, А. А. Кузовников, В. М. Шибков. — М. : Нефть и газ, 1996. — 204 с.
8. Шифрин, Я. С. Антенны / Я. С. Шифрин. — Харьков : ВИРТА, 1976. — 408 с.
9. Волков, А. А. Учёт времени повторения и числа импульсов при оценке пробойных уровней поля в антенных системах сверхвысокочастотных генераторов / А. А. Волков, П. А. Трифонов // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Физика, математика. — 2014. — № 1. — С. 15–21.
10. Пробой воздуха в нарастающем СВЧ поле / В. С. Барашенков, Л. П. Грачев, И. И. Есаков и др. // Журнал технической физики. — 2000. — Т. 70, вып. 10. — С. 34–39.

REFERENCES

1. Didenco A.N. Microwave power engineering: Theory and practice. [Didenco A.N. SVCh-e'nergetika: Teoriya i praktika]. Moscow: Nauka, 2003, 446 p.
2. Dobykin V.D., Kupriyanov A.I., Ponomarev V.G. Shustov L.N. Radio- electronic fight. Power defeat of radio-electronic systems. [Dobykin V.D., Kupriyanov A.I., Ponomarev V.G. Shustov L.N. Radioe'lektronnaya bor'ba. Silovoe porazhenie radioe'lektronnykh sistem]. Moscow: Vuzovskaya kniga, 2007, 468 p.
3. Drabkin A.L., Zuzenko V.L., Kislov A.G. Antenna-feeding devices. [Drabkin A.L., Zuzenko V.L., Kislov A.G. Antenna-fidernye ustroystva]. Moscow: Sovetskoe radio, 1974, 320 p.
4. Mac-Donald A. Superhigh-frequency breakdown in gases. [Mac-Donald A. Sverkhvysokochastotnyi proboi v gazakh]. Moscow: Mir, 1969, 212 p.
5. Raizer U.P. Bases of physics of gas-discharge processes. [Raizer U.P. Osnovy fiziki gazorazryadnykh processov]. Moscow: Nauka, 1980, 416 p.
6. Gurevich A.V. The ionised layer in gas (atmosphere). [Gurevich A.V. Ionizirovanniy sloi v gaze (atmosfera)]. *Uspekhi fizicheskikh nauk — Physics-Uspekhi*, 1980, vol. 132, no. 4, pp. 685–690.
7. Zarin A.S., Kuzovnikov A.A., Shibkov V.M. Freely localised microwave category in air. [Zarin A.S., Kuzovnikov A.A., Shibkov V.M. Svobodno lokalizovanniy SVCh-razryad v vozdukhel]. Moscow: Neft' i Gaz, 1996, 204 p.
8. Shifrin Ya.S. Aerials. [Shifrin Ya.S. Antenny]. Khar'kov: VIRTА, 1976, 408 p.
9. Volkov A.A., Trifonov P.A. The accounting of time of repetition and number of impulses at an assessment the breakdown of levels of a field in antenna systems the microwave of generator. [Volkov A.A., Trifonov P.A. Uchet vremehi povtoreniya i chisla impul'sov pri ocenke proboynykh urovney polya v antennykh sistemakh mosh'nykh sverkhvysokochastonykh generatorov]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika*.
10. Barashenkov V.S., Grachev L.P., Esakov I.I., Kostenko B.F., Hodataev V.K., Ur'ev M.Z. Air breakdown in an accruing microwave field. [Barashenkov V.S., Grachev L.P., Esakov I.I., Kostenko B.F., Hodataev V.K., Ur'ev M.Z. Probroy vozdukhа v narastaush'em SVCh pole]. *Zhurnal tekhnicheskoy phiziki — Technical Physics*, 2000, vol. 70, no. 10, pp. 34–39.

*Волков Алексей Анатольевич, преподаватель Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил “Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина” (г. Воронеж), кандидат технических наук, Воронеж, Россия
E-mail: volkov_aa@autorambler.ru*

*Трифонов Павел Андреевич, профессор Воронежского государственного университета, доктор технических наук, доцент, Воронеж, Россия
E-mail: bk_123@bk.ru*

*lecturer of Military Educational-Research Centre of Air Force “Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin” (Voronezh), candidate of engineering sciences, Voronezh, Russia,
E-mail: volkov_aa@autorambler.ru*

*Trifonov Pavel Andreevich, professor of Voronezh State University, doctor of engineering sciences, docent, Voronezh, Russia
E-mail: bk_123@bk.ru*