

УДК 621.373

**ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ
МОЩНЫХ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ
ПРИ УЧЁТЕ МАССОГАБАРИТНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ
НОСИТЕЛЯ***

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 06.03.2015 г.

Аннотация. Получены аналитические выражения для оценки предельных параметров излучения мощных генераторов электромагнитного поля в схеме “источник питания – сверхвысокочастотный генератор”, связанных с допустимым объёмом и массой полезной нагрузки носителя. Найдены условия, при которых объём и (или) масса радиоизлучающего средства, построенного по схеме “источник питания – сверхвысокочастотный генератор”, определяются преимущественно одним из приборов. Проведён расчёт предельных параметров излучения для генераторной схемы “взрывомагнитный генератор – виркатор” и заданных массогабаритных характеристик полезной нагрузки носителя.

Ключевые слова: массогабаритные ограничения, сверхвысокочастотный генератор, предельные параметры излучения.

**ASSESSMENT OF LIMIT PARAMETERS OF RADIATION OF
POWERFUL MICROWAVE GENERATORS AT THE
ACCOUNTING OF MASS-DIMENSIONAL RESTRICTIONS OF
THE CARRIER**

A. A. Volkov, P. A. Trifonov

Abstract. Analytical expressions for an assessment of limit parameters of radiation of the powerful generators of an electromagnetic field in the scheme “power supply – microwave generator” connected with the admissible volume and mass of payload of the carrier are received. Conditions under which the volume and (or) mass of the radio radiating means constructed according to the scheme “power supply – microwave generator” are defined mainly by one of devices are found. Calculation of limit parameters of radiation for the generating scheme “magnetic explosion generator – virkator” and the set mass – dimensional characteristics of payload of the carrier is carried out.

Keywords: mass – dimensions restrictions, microwave generator, limiting parameters of radiation.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 13–01–97504 и № 13–08–00735)

© Волков А. А., Трифонов П. А., 2015

ВВЕДЕНИЕ

При решении некоторых прикладных задач, связанных с использованием мощных импульсных сверхвысокочастотных (СВЧ) генераторов в составе радиоизлучающих средств, доставляемых с помощью летательных аппаратов, возникает необходимость учёта объективных ограничений на предельные параметры излучаемого электромагнитного поля (ЭМП). Эти ограничения, прежде всего, связаны с допустимыми габаритами и массой полезной нагрузки носителя, а также с электрической прочностью атмосферы [1], [2]. Учёт указанных ограничений особенно важен в задачах обоснования параметров радиоизлучающих средств, где максимальная излучаемая мощность СВЧ генераторов определяет потенциальные возможности их применения.

Электрический пробой воздуха представляет собой естественный фактор, ограничивающий максимальную излучаемую мощность, длительность и время повторения импульсов. В [3] получено аналитическое выражение пробойного уровня напряжённости электрического поля для атмосферного воздуха, учитывающее параметры последовательности импульсов ЭМП. В [4] оценены размеры антенны СВЧ генератора, обеспечивающих беспробоное излучение в атмосферу. Возможности носителя по размещению на нём нагрузки заданной массы и объёма всегда имеют предел и ограничивают значения характеристик генераторов ЭМП, в первую очередь энергию излучения. В работе [5] представлены методика и результаты расчёта массогабаритных характеристик системы “ёмкостной накопитель – черенковский генератор” для заданной мощности СВЧ излучения. На основе этих результатов можно решать и обратную задачу, однако они не позволяют учесть длительность импульса, их число и время повторения. Поэтому **цель работы** состоит в получении аналитических выражений, связывающих объём и массу полезной нагрузки носителя с предельно достижимыми параметрами излучаемого ЭМП (мощность, длительность, число и время повторения импульсов).

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЧ ГЕНЕРАТОРА, СВЯЗАННЫХ С МАССОЙ И ГАБАРИТАМИ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ НОСИТЕЛЯ

В состав радиоизлучающего средства помимо СВЧ генератора входит источник питания, который тоже занимает некоторый объём и имеет массу. При генерации больших мощностей источник питания должен иметь значительные объём и массу, поэтому их учёт также важен при оценке ограничений на основные характеристики СВЧ генератора.

Вне зависимости от того, сколько ступеней преобразования энергии используется для получения требуемых токов и напряжений, в конечном итоге схему построения любого формирователя СВЧ ЭМП всегда можно свести к двухкаскадной схеме “источник питания – СВЧ генератор”. Для такого типа построения радиоизлучающего средства объём полезной нагрузки V и её масса M будут равны:

$$V = V_{\Gamma} + V_{\text{ип}}, \quad (1)$$

$$M = M_{\Gamma} + M_{\text{ип}} \quad (2)$$

где V_{Γ} , M_{Γ} — объём и масса СВЧ генератора; $V_{\text{ип}}$, $M_{\text{ип}}$ — объём и масса источника питания.

Генераторные приборы ЭМП характеризуются предельным уровнем мощности излучения [6], который определяется, как правило, предельно допустимыми токами, напряжениями или напряжённостями электрических и магнитных полей при которых происходят вредные нелинейные эффекты, существенно снижающие эффективность генерации. Предельный уровень мощности зависит от рабочего объёма и, следовательно, от массы прибора. Он не зависит

от количества запасённой в источнике питания энергии, а при невысоких частотах повторения, что характерно для современных мощных генераторов, не зависит и от количества излучённых импульсов.

Источники питания принято характеризовать удельными параметрами – объёмной и массовой плотностями энергии (мощности) [7]. Для этого класса приборов объём и масса определяют количество запасённой энергии.

Таким образом, считая мощность и энергию билинейными функциями массы и объёма, можно записать:

$$V_{\Gamma} = P_{\Gamma} / \Lambda_{V_{\Gamma}}, \quad (3)$$

$$M_{\Gamma} = P_{\Gamma} / \Lambda_{M_{\Gamma}}, \quad (4)$$

$$V_{\text{инп}} = W_{\text{инп}} / \Omega_{V_{\text{инп}}}, \quad (5)$$

$$M_{\text{инп}} = W_{\text{инп}} / \Omega_{M_{\text{инп}}}, \quad (6)$$

где $\Lambda_{V_{\Gamma}}$, $\Lambda_{M_{\Gamma}}$ – объёмная и массовая плотности мощности генератора ЭМП; P_{Γ} – средняя импульсная мощность СВЧ генератора; $\Omega_{V_{\text{инп}}}$, $\Omega_{M_{\text{инп}}}$ – объёмная и массовая плотности энергии источника питания; $W_{\text{инп}}$ – энергия источника питания.

При формировании импульсной последовательности, состоящей из N импульсов, источник питания расходует энергию, которая распределяется равномерно по всем импульсам в течении времени генерации $T_{\text{ген}}$:

$$T_{\text{ген}} = NT_{\Pi}, \quad (7)$$

где T_{Π} – время повторения импульсов. Считая, что в интервалах между импульсами энергия не расходуется, можно записать:

$$W_{\text{инп}} = \int_0^{T_{\text{ген}}} P_{\text{инп мгно}}(t) dt = P_{\text{инп}} \tau \frac{T_{\text{ген}}}{T_{\Pi}} = NP_{\text{инп}} \tau, \quad (8)$$

где $P_{\text{инп мгно}}(t)$ – мгновенная мощность источника питания; τ – длительность импульса; $P_{\text{инп}}$ – средняя скорость изменения энергии в течение одного импульса (средняя импульсная мощность):

$$P_{\text{инп}} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} P_{\text{инп мгно}}(t) dt. \quad (9)$$

При излучении импульсов СВЧ генератор преобразует энергию источника питания в энергию ЭМП. Эффективность преобразования энергии определяется типом генератора и характеризуется коэффициентом полезного действия (КПД) $\eta_{\text{КПД}}$:

$$P_{\Gamma} = \eta_{\text{КПД}} P_{\text{инп}}, \quad (10)$$

откуда с учётом (8):

$$W_{\text{инп}} = \frac{NP_{\Gamma}\tau}{\eta_{\text{КПД}}}. \quad (11)$$

Использование зависимостей (3) – (6) и (11) в (1) и (2), позволяют связать объём и массу полезной нагрузки с параметрами излучения:

$$V = P_{\Gamma} \left(\frac{1}{\Lambda_{V_{\Gamma}}} + \frac{N\tau}{\eta_{\text{КПД}} \Omega_{V_{\text{инп}}}} \right) = \frac{P_{\Gamma}}{\Lambda_{V_{\Gamma}}} \left(1 + \frac{N\tau}{\tau V} \right), \quad (12)$$

$$M = P_{\Gamma} \left(\frac{1}{\Lambda_{M_{\Gamma}}} + \frac{N\tau}{\eta_{\text{КПД}} \Omega_{M_{\text{инп}}}} \right) = \frac{P_{\Gamma}}{\Lambda_{M_{\Gamma}}} \left(1 + \frac{N\tau}{\tau M} \right), \quad (13)$$

где τ_V и τ_M – некоторые характеристические времена генераторной схемы, равные, соответственно:

$$\tau_V = \eta_{\text{КПД}} \Omega_{V_{\text{ин}}} / \Lambda_{V_{\Gamma}}, \quad (14)$$

$$\tau_M = \eta_{\text{КПД}} \Omega_{M_{\text{ин}}} / \Lambda_{M_{\Gamma}}. \quad (15)$$

Из формул (12) и (13) видно, что возможны случаи, когда объём или (и) масса радиоизлучающего средства будут определяться преимущественно одним из приборов. Эти случаи соответствуют предельным значениям отношений величин, входящих в (12) и (13). Так при $\tau_V \gg N\tau$ и $\tau_M \gg N\tau$ объём и масса радиоизлучающего средства определяются СВЧ генератором, а при обратных условиях – источником питания. При $\tau_V \approx N\tau$ и $\tau_M \approx N\tau$ вклад обоих приборов в общие объём и массу примерно одинаков.

На основе (12) и (13) могут быть получены ограничения на излучаемую мощность:

$$P_{\Gamma} \leq V \frac{\eta_{\text{КПД}} \Omega_{V_{\text{ин}}} \Lambda_{V_{\Gamma}}}{\eta_{\text{КПД}} \Omega_{V_{\text{ин}}} + N\tau \Lambda_{V_{\Gamma}}}, \quad (16)$$

$$P_{\Gamma} \leq M \frac{\eta_{\text{КПД}} \Omega_{M_{\text{ин}}} \Lambda_{M_{\Gamma}}}{\eta_{\text{КПД}} \Omega_{M_{\text{ин}}} + N\tau \Lambda_{M_{\Gamma}}}. \quad (17)$$

Как следует из (16) и (17), предельную излучаемую мощность можно повысить путём уменьшения числа и длительности импульсов, т.е. путём уменьшения общего времени излучения. При этом наибольшее значение предельной мощности (при $N\tau \rightarrow 0$) задаётся удельными параметрами виркатора.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА ПРЕДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧАЕМОГО ПОЛЯ ДЛЯ ЗАДАННЫХ МАССОГАБАРИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ НОСИТЕЛЯ

Расчёт проведён для генераторной схемы, где в качестве источника питания выбран взрывоманитный генератор (ВМГ) [7], а в качестве СВЧ генератора – виркатор [8]. Такой выбор обусловлен тем, что в настоящее время среди импульсных источников питания ВМГ имеют наивысшие удельные энергетические показатели [7], а виркаторы имеют наилучшие результаты по максимальной генерируемой мощности [8]. Кроме этого ВМГ и виркаторы хорошо согласуются, что продемонстрировано в экспериментах [9].

Анализ работ [10], [11], посвященных исследованию виркаторов, позволил установить, что в настоящее время достижимы объёмные удельные показатели мощности в единицы ГВт/м³. Оценка массовых удельных показателей мощности виркаторов, включающих импульсный трансформатор (индуктивный накопитель), по материалам [12] даёт величины в единицы МВт/кг. На основе этих данных принято: $\Lambda_{V_{\Gamma}} = 5 \text{ ГВт/м}^3$, $\Lambda_{M_{\Gamma}} = 5 \text{ МВт/кг}$. Коэффициент преобразования энергии виркатором на основе анализа источников [13], [14] принят равным $\eta_{\text{КПД}} = 0,01$. Удельные показатели ВМГ приведены в [7] и составляют $\Omega_{V_{\text{ин}}} = 100 \text{ МДж/м}^3$; $\Omega_{M_{\text{ин}}} = 100 \text{ кДж/кг}$.

На рисунке 1 показаны графики зависимостей требуемых объёма и массы полезной нагрузки носителя от импульсной СВЧ мощности радиоизлучающего средства, построенные по формулам (12) и (13). В качестве исходных данных по длительностям импульсов выбраны характерные значения $\tau = 30 \text{ нс}$ и $\tau = 300 \text{ нс}$, реализуемые современными виркаторами. Время повторения импульсов и время излучения приняты равными, соответственно: $T_{\text{п}} = 1 \text{ мс}$ и $T_{\text{ген}} = 1 \text{ с}$ ($N = 1000$).

Из представленных на рисунке 1 графиков следует, что радиоизлучающее средство рассматриваемого типа гигаваттного уровня мощности для размещения на носителе требует объёма полезной нагрузки в единицы кубических метров и грузоподъёмности в единицы тонн.

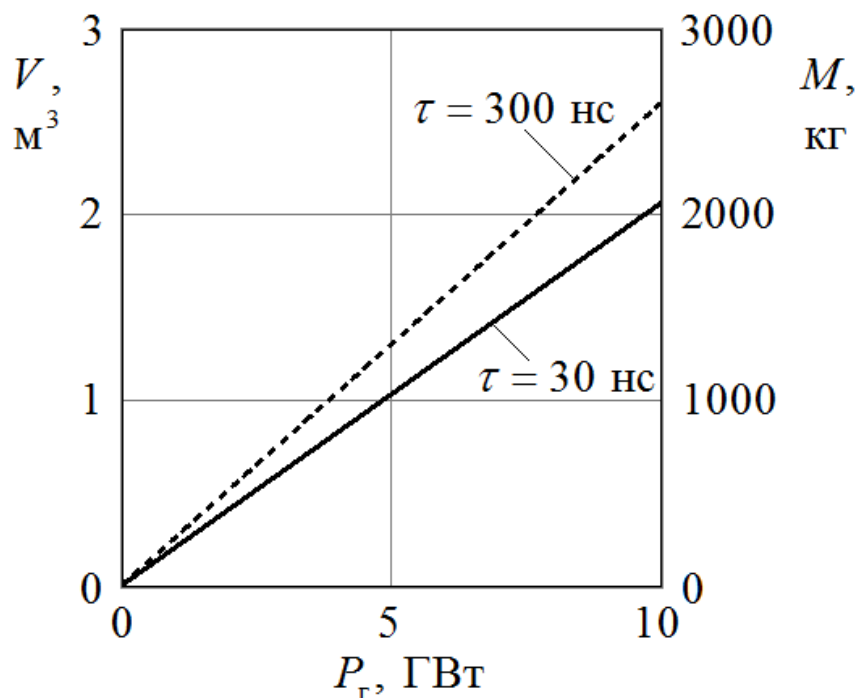


Рис. 1. Зависимости требуемых объёма и массы полезной нагрузки носителя от импульсной мощности СВЧ излучения

Такие массогабаритные показатели могут обеспечить, например, некоторые летательные аппараты.

Предельная мощность излучения генераторной схемы “ВМГ – виркатор” определяется наименьшим из (16) и (17) ограничением:

$$P_{\gamma \max} = \min \left(\frac{\eta_{\text{КПД}} \Omega_{V_{\text{ин}}} \Lambda_{V_{\gamma}} V}{\eta_{\text{КПД}} \Omega_{V_{\text{ин}}} + N \tau \Lambda_{V_{\gamma}}}, \frac{\eta_{\text{КПД}} \Omega_{M_{\text{ин}}} \Lambda_{M_{\gamma}} M}{\eta_{\text{КПД}} \Omega_{M_{\text{ин}}} + N \tau \Lambda_{M_{\gamma}}} \right). \quad (18)$$

На рисунке 2 показан график зависимости предельной мощности излучения (18), которая может быть получена при размещении радиоизлучающего средства на носителе с полезной нагрузкой объемом $V = 1 \text{ м}^3$ и массой $M = 1000 \text{ кг}$, от длительности импульса. Число импульсов принято равным: $N = 1000$.

Из графика на рисунке 2 видно, что рассматриваемый носитель позволяет получить уровни мощности в единицы гигаватт. Предельная мощность уменьшается при увеличении длительности импульсов. Для характерного нижнего предела по длительности импульса виркаторов $\tau = 10 \text{ нс}$ предельная мощность составляет $P_{\gamma \max} = 4,95 \text{ ГВт}$. Характеристические времена генераторной схемы в данном случае одинаковы и равны: $\tau_V = \tau_M = 200 \text{ мкс}$. В масштабе длительностей импульсов характеристическим временам соответствует значение $\tau = 200 \text{ нс}$. В районе этого значения масса и габариты радиоизлучающего средства определяются примерно одинаково, как виркатором, так и ВМГ. В области $10 \text{ нс} \leq \tau \leq 50 \text{ нс}$ предельная мощность слабо меняется при изменении длительности импульса. Эта область соответствует случаю, когда вклад источника питания – ВМГ в общие массу и габариты мал. В районе 1000 нс вклад ВМГ становится определяющим.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для радиоизлучающего средства, построенного по схеме “источник питания – СВЧ генератор”, получены аналитические выражения для оценки предельных значе-

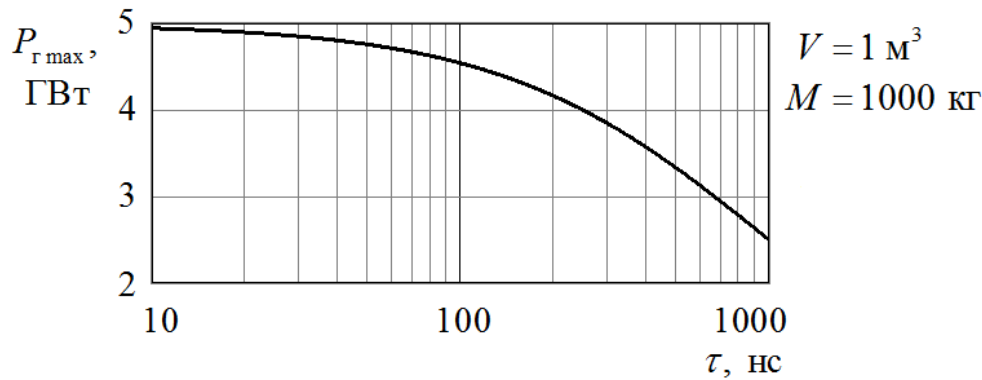


Рис. 2. Зависимость предельной мощности излучения генераторной схемы “ВМГ – виркатор” от длительности импульса для заданных объёма и массы полезной нагрузки носителя

ний основных параметров мощных СВЧ генераторов, связанных с допустимыми объёмом и массой полезной нагрузки носителя. Для генераторной схемы “ВМГ – виркатор” и типовых значений удельных показателей мощности и энергии рассчитаны требуемые объём и масса полезной нагрузки носителя для излучения СВЧ ЭМП гигаваттных мощностей. Полученные данные необходимо учитывать при решении задач размещения мощных СВЧ генераторов на носителях с жесткими габаритными ограничениями. Для генераторной схемы “ВМГ – виркатор” и заданных массогабаритных характеристик полезной нагрузки носителя проведён расчёт зависимости предельной мощности излучения от длительности импульсов и дана её характеристика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем [Текст] / В. Д. Добыкин, А. И. Куприянов, В. Г. Пономарёв, Л. Н. Шустов. — М.: Вузовская книга, 2007. — 468 с.
2. Прищепенко, А. Б. Взрывы и волны. Взрывные источники электромагнитного излучения радиочастотного диапазона [Текст] / А. Б. Прищепенко. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. — 208 с.
3. Волков, А. А. Учёт времени повторения и числа импульсов при оценке пробойных уровней поля в антенных системах сверхвысокочастотных генераторов [Текст] / А. А. Волков, П. А. Трифонов // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Физика, математика. — 2014. — № 1. — С. 15–21.
4. Волков, А. А. Ограничения на минимальные размеры антенны для излучения мощных сверхвысокочастотных импульсных полей [Текст] / А. А. Волков // Антенны. — 2014. — № 10. — С. 54–59.
5. Добыкин, В. Д. Оценка массогабаритных характеристик многоволнового черенковского генератора как источника мощного сверхвысокочастотного излучения [Текст] / В. Д. Добыкин, Р. П. Никитин, С. Г. Комолев // Радиотехника. — 2008. — № 6. — С. 58–59.
6. Диденко, А. Н. О предельно допустимом уровне мощности импульсных СВЧ-генераторов на основе сильноточных электронных ускорителей [Текст] / А. Н. Диденко // Доклады Академии наук. — 1997. — Т. 356, № 4. — С. 470–471.
7. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока [Текст] / Под ред. В. Е. Фортова. — М.: Наука, 2002. — 399 с.
8. Диденко, А. Н. СВЧ-энергетика: Теория и практика [Текст] / А. Н. Диденко — М.: Наука, 2003. — 446 с.

9. Генерация импульсного СВЧ-излучения с помощью энергии химических взрывчатых веществ [Текст] / Е. И. Азаркевич, А. Н. Диденко, В. Е. Фортов и др. // Доклады Академии наук СССР. — 1991. — Т. 319, № 2. — С. 352–355.
10. Жерлицин, А. Г. Экспериментальное исследование поля излучения триода с виртуальным катодом [Текст] / А. Г. Жерлицин, В. Г. Мельников, П. Я. Исаков // Радиотехника и электроника. — 2006. — Т. 51, № 2. — С. 221–225.
11. Возбуждение TE_{11} -моды в триоде с виртуальным катодом [Текст] / В. П. Григорьев, А. Г. Жерлицин, Г. Г. Канаев и др. // Радиотехника и электроника. — 2013. — Т. 58, № 7. — С. 708–715.
12. Томский политехнический университет. Источники СВЧ излучения с виртуальным катодом [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://portal.tpu.ru:7777/departments/laboratory/lab42/sciense/svch_virt.
13. Разработка релятивистских СВЧ генераторов в НИИ ядерной физики при ТПУ [Текст] / И. И. Визитенко, А. Г. Жерлицин, А. И. Рябчиков, Ю. Г. Юшков // Известия Томского политехнического университета. — 2003. — Т. 306, № 1. — С. 101–105.
14. Дубинов, А. Е. Электронные приборы с виртуальным катодом [Текст] / А. Е. Дубинов, В. Д. Селемир // Радиотехника и электроника. — 2002. — Т. 47, № 6. — С. 645–672.

REFERENCES

1. 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.
2. Prishpenko A. B. Explosions and waves. Explosive sources of electromagnetic radiation of radio-frequency range. [Prishpenko A. B. Vzryvy i volny. Vzryvnye istochniki elektromagnitnogo izlucheniya radiochastotnogo diapazona]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2008, 208 p.
3. 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 probnoykh urovney polya v antennoykh sistemakh mosh'nykh sverkhvysokochastotnykh generatorov]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika — Proceedings of Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics*, 2014, no. 1, pp. 15–21.
4. Volkov A. A. Restrictions on the minimum sizes of the antenna for the radiation of powerful microwave pulse fields. [Volkov A. A. Ogranicheniya na minimal'nye razmery anteny dlya izlucheniya mosh'nykh sverkhvysokochastotnykh impulsnykh poley]. *Antenny — Antennas*, 2014, no. 10, pp. 54–59.
5. Dobykin V. D., Nikitin R. P., Komolev S. G. Assessment of mass-dimensional characteristics of the multiwave cherenkov generator as source of powerful microwave radiation. [Dobykin V. D., Nikitin R. P., Komolev S. G. Ocenka massogabaritnykh harakteristik mnogovolnovogo cherenkovskogo generatora kak istochnika mosh'nogo sverkhvysokochastotnogo izlucheniya]. *Radiotekhnika — Radio engineering*, 2008, no. 6, pp. 58–59.
6. Didenko A. N. About maximum permissible power level of pulse microwave generators on a basis the high-current of electronic accelerators. [Didenco A. N. O predel'no dopustimom urovne mosh'nosti impulsnykh SVCh-generatorov na osnove sil'notochnykh e'lektronnykh uskoriteley]. *Doklady Akademii nauk — Reports of Academy of Sciences*, 1997, vol. 356, no. 4, pp. 470–471.
7. Explosive generators of powerful impulses of electrical current. Editor V. E. Fortov. [Vzryvnye generatory mosh'nykh impulsov e'lektricheskogo toka. Pod red. V. E. Fortova]. Moscow: Nauka, 2002, 399 p.
8. Didenko A. N. Microwave power engineering: Theory and practice. [Didenco A. N. SVCh-

e'nergetika: Teoriya i praktika]. Moscow: Nauka, 2003, 446 p.

9. Azarkevich E. I., Didenco A. N., Fortov V. E., et al. Generation of pulse microwave radiation by means of energy of chemical explosives. [Azarkevich E. I., Didenco A. N., Fortov V. E., i dr. Generaciya impulsnogo SVCh-izlucheniya s pomosh'yu e'nergii vzryvchatykh vesh'estv]. *Doklady Akademii nauk SSSP — Reports of Academy of Sciences USSR*, 1991, vol. 319, no. 2, pp. 352–355.

10. Zherlicin A. G., Melnikov V. G., Isakov P. Ya. Pilot study of a field of radiation of the triode with the virtual cathode. [Zherlicin A. G., Melnikov V. G., Isakov P. Ya. E'ksperimental'noe issledovanie polya izlucheniya trioda s virtual'nym katodom]. *Radiotekhnika i e'lektronika — Journal of Communications Technology and Electronics*, 2006, vol. 51, no. 2, pp. 221–225.

11. Grigor'ev V. P., Zherlicin A. G., Kanaev G. G. et al. Excitement of TE₁₁-fashion in the triode with the virtual cathode. [Grigor'ev V. P., Zherlicin A. G., Kanaev G. G. i dr. Vozbuzhdenie TE₁₁-mody v triode s virtual'nym katodom]. *Radiotekhnika i e'lektronika — Journal of Communications Technology and Electronics*, 2013, vol. 58, no. 7, pp. 708–715.

12. Tomsk polytechnical university. Sources of the microwave oven of radiation with the virtual cathode. [Tomskii politekhnicheskii universitet. Istochniki SVCh izlucheniya s virtual'nym katodom]. Access mode:

http://portal.tpu.ru:7777/departments/laboratory/lab42/sciense/svch_virt.

13. Vizitenko I. I., Zherlicin A. G., Ryabchikov U. G., Ushkov U. G. Development of relativistic microwave ovens of generators in scientific research institute of nuclear physics at Tomsk polytechnical university. [Vizitenko I. I., Zherlicin A. G., Ryabchikov U. G., Ushkov U. G. Razrabotka relyativistskikh SVCh generatorov v NII yadernoy fiziki pri TPU]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta — News of Tomsk polytechnical university*, 2003, vol. 306, no. 1, pp. 101–105.

14. Dubinov A. E., Selemir V. D. Electronic devices with the virtual cathode. [Dubinov A. E., Selemir V. D. E'lektronnye pribory s virtual'nym katodom]. *Radiotekhnika i e'lektronika — Journal of Communications Technology and Electronics*, 2002, vol. 47, no. 6, pp. 645–672.

Волков Алексей Анатольевич, начальник
лаборатории Военного учебно-научного
центра Военно-воздушных сил “Военно-
воздушная академия имени профессора
Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина”,
г. Воронеж, Российская Федерация
E-mail: volkov_aa@autorambler.ru
Тел.: 8-906-673-67-92

Volkov Aleksey Anatolevich, chief of the
laboratory from the Military Educational-
Research Centre of Air Force “Air Force
Academy named after professor N.E.
Zhukovsky and Y.A. Gagarin”,
Voronezh,
Russian Federation
E-mail: volkov_aa@autorambler.ru
Tel.: 8-906-673-67-92

Трифонов Павел Андреевич, профессор Во-
ронезского госуниверситета, доктор тех-
нических наук, доцент, г. Воронеж, Рос-
сийская Федерация
E-mail: bk_123@bk.ru
Тел.: 8-951-545-61-69

Trifonov Pavel Andreevich, Dr.Sci. (Eng.),
Professor of Voronezh State University,
Voronezh, Russian Federation
E-mail: bk_123@bk.ru
Tel.: 8-951-545-61-69