

ТРЕБОВАНИЯ К ПОТЕРЯМ ХОЛОСТОГО ХОДА АВТОНОМНЫХ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

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 11.02.2020 г.

Аннотация. На основе уравнения энергетического баланса получены соотношения, связывающие коэффициент полезного действия, объем и массу формирователя электромагнитного поля с коэффициентом потерь холостого хода. Проведен анализ влияния потерь холостого хода на энергетическую эффективность и массогабаритные параметры формирователя. Определены условия, при которых потери холостого хода не влияют на параметры формирователя. Разработана методика обоснования требований к потерям холостого хода, обеспечивающих заданные эффективность и массогабаритные параметры формирователя. Проведен расчет граничных коэффициентов потерь холостого хода формирователя, построенного по схеме “емкостной накопитель – виркатор”.

Ключевые слова: формирователь электромагнитного поля, сверхвысокочастотный генератор, потери холостого хода.

IDLE LOSS REQUIREMENTS OF AUTONOMOUS SHAPERS OF A POWERFUL PULSED ELECTROMAGNETIC FIELD

A. A. Volkov, P. A. Trifonov

Abstract. On the basis of the energy balance equation, relations are obtained that relate the efficiency, volume and mass of the electromagnetic field shaper to the idle loss coefficient. The analysis of the influence of idling losses on energy efficiency and weight and size parameters of the shaper is carried out. The conditions are determined under which the idle loss does not affect the parameters of the shaper. A methodology has been developed to justify the requirements for idle losses, providing the specified efficiency and weight and size parameters of the shaper. The calculation of the boundary idle loss coefficients of the shaper, constructed according to the scheme “capacitive storage – vircator”.

Keywords: electromagnetic field shaper, microwave generator, idle loss.

ВВЕДЕНИЕ

При разработке формирователей мощного импульсного электромагнитного поля (ЭМП) на основе релятивистских сверхвысокочастотных (СВЧ) генераторов (виркаторов, черенковских генераторов, релятивистских магнетронов [1]) важнейшей задачей является обоснование

требований к техническим характеристикам устройств из их состава. Формирователь ЭМП состоит из источника питания, СВЧ генератора и антенны. В режиме формирования импульсной последовательности энергия источника питания расходуется на генерацию СВЧ поля с некоторой эффективностью. Во время пауз между импульсами формирователь находится в состоянии холостого хода, который может сопровождаться потерями энергии.

При размещении формирователя ЭМП на носителе с жесткими массогабаритными ограничениями и автономном его использовании запас энергии источника питания, как правило, не может пополняться. В этом случае наличие потерь холостого хода может потребовать увеличенного запаса энергии источника питания, что в свою очередь, приведет к увеличению объема и массы формирователя ЭМП. Таким образом, задача обоснования требований к потерям холостого хода в схеме “источник питания – СВЧ генератор”, при которых энергетическая эффективность, объем и масса формирователя находится в заданных пределах, актуальна. В известной литературе, касающейся вопросов формирования мощных импульсных ЭМП [1–3], анализ влияния потерь холостого хода на параметры формирователей не проводился.

Цель статьи – обоснование требований к потерям холостого хода автономных формирователей ЭМП на основе мощных импульсных СВЧ генераторов.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОТЕРЬ ХОЛОСТОГО ХОДА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ, ОБЪЕМ И МАССУ ФОРМИРОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

При формировании импульсов поля генератор преобразует энергию источника питания в энергию СВЧ излучения. Эффективность этого преобразования определяется коэффициентом полезного действия (КПД) генератора η_g . Во время пауз между импульсами система находится в состоянии холостого хода. В общем случае это состояние может сопровождаться потерями энергии. Поэтому уравнение энергетического баланса формирователя ЭМП 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 $W_{\text{ИП}0}$ – начальная энергия 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; N – количество импульсов в последовательности.

Одним из наиболее интересных для практики режимов работы формирователей ЭМП является режим генерации последовательностей одинаковых по мощности и длительности импульсов с постоянным периодом повторения. В этом режиме величины $W_{\text{ИП ген } i}$ и $W_{\text{ИП ХХ } i(i+1)}$ определяются по формулам:

$$W_{\text{ИП ген } i} = - \int_0^{\tau} P_{\text{ИП мгн}}(t) dt = P_{\text{ИП}} \tau, \quad (2)$$

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

где $P_{\text{ИП мгн}}(t)$, $P_{\text{ИП}}$ – мгновенная и средняя мощности источника питания в состоянии генерации импульса; $Q_{\text{ИП мгн}}(t)$, $Q_{\text{ИП}}$ – мгновенная и средняя мощности источника питания в состоянии холостого хода во время паузы между импульсами; τ , T – длительность и период повторения импульсов.

Мощность источника питания в состоянии холостого хода удобно выражать в долях мощности генерации импульса:

$$Q_{\text{ИП}} = \chi P_{\text{ИП}}, \quad (4)$$

где χ — коэффициент потерь холостого хода.

Мощность ЭМП связана с мощностью источника питания соотношением:

$$P = \eta_{\Gamma} P_{\text{ИП}}. \quad (5)$$

С учетом (2) – (5) уравнение энергетического баланса примет вид:

$$W_{\text{ИП}0} = (N\tau + (N - 1)(T - \tau)\chi) \frac{P}{\eta_{\Gamma}}. \quad (6)$$

В качестве показателя эффективности формирователя может использоваться его КПД, который в данном случае равен:

$$\eta = \frac{W}{W_{\text{ИП}0}} = \frac{\eta_{\Gamma}}{1 + \frac{(N-1)(T-\tau)\chi}{N\tau}}, \quad (7)$$

где $W = N\tau P$ — энергия сформированной последовательности импульсов ЭМП.

Из (7) следует, что потери холостого хода снижают эффективность формирователя. Наличие потерь обуславливает зависимость КПД формирователя от длительности и периода повторения импульсов. Для уменьшения влияния потерь холостого хода на энергетическую эффективность необходимо увеличивать длительность импульсов и уменьшать время паузы между ними. В отсутствие потерь, а также в режиме одиночного импульса, КПД формирователя максимален и равен КПД генератора. Влияние потерь холостого хода на эффективность формирователя ЭМП становится не существенным при выполнении условия:

$$\chi \ll \frac{N\tau}{(N - 1)(T - \tau)}. \quad (8)$$

Современные мощные релятивистские СВЧ генераторы способны формировать последовательности импульсов нано- и микросекундного диапазонов длительностей с частотой повторения единицы-сотни Гц, т. е. для них выполняется соотношение:

$$T \gg \tau. \quad (9)$$

С учетом (9) условие (8) примет вид:

$$\chi \ll \frac{N\tau}{(N - 1)T}. \quad (10)$$

Вывод электромагнитной энергии мощных релятивистских СВЧ генераторов в атмосферу производится, как правило, через диэлектрические окна в корпусах приборов, представляющие собой поверхностные антенны [4]. Такие антенны не требуют дополнительного массогабаритного ресурса, поэтому объем формирователя V и его масса M будут равны:

$$V = V_{\text{ИП}} + V_{\Gamma}, \quad (11)$$

$$M = M_{\text{ИП}} + M_{\Gamma}, \quad (12)$$

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

Источники питания характеризуются удельными параметрами — объёмной и массовой плотностями энергии [2, 3]. Эти параметры связывают запасаемую в источнике энергию с его объёмом и массой:

$$V_{\text{ИП}} = W_{\text{ИП}0}/\Omega_V, \quad (13)$$

$$M_{\text{ИП}} = W_{\text{ИП}0}/\Omega_M, \quad (14)$$

где Ω_V, Ω_M — объёмная и массовая плотности энергии источника питания.

Мощность генератора зависит от рабочего объёма и, следовательно, от массы прибора, и не зависит от количества запасённой энергии в источнике питания. При известных удельных мощностных параметрах объём и массу генератора можно представить в виде:

$$V_{\text{Г}} = P/\Lambda_V, \quad (15)$$

$$M_{\text{Г}} = P/\Lambda_M, \quad (16)$$

где Λ_V, Λ_M — объёмная и массовая плотности мощности СВЧ генератора.

Подстановка (11), (13) в (9) и (12), (14) в (10) с учетом (6) дает:

$$V = V_0 + \Delta V, \quad (17)$$

$$M = M_0 + \Delta M, \quad (18)$$

где V_0, M_0 — объём и масса формирателя ЭМП в отсутствие потерь холостого хода:

$$V_0 = \left(\frac{1}{\Lambda_V} + \frac{N\tau}{\eta_{\text{Г}}\Omega_V} \right) P, \quad (19)$$

$$M_0 = \left(\frac{1}{\Lambda_M} + \frac{N\tau}{\eta_{\text{Г}}\Omega_M} \right) P, \quad (20)$$

$\Delta V, \Delta M$ — приращения объёма и массы формирателя ЭМП за счет потерь холостого хода:

$$\Delta V = \frac{(N-1)(T-\tau)P}{\eta_{\text{Г}}\Omega_V} \chi, \quad (21)$$

$$\Delta M = \frac{(N-1)(T-\tau)P}{\eta_{\text{Г}}\Omega_M} \chi. \quad (22)$$

Из (17) – (22) видно, что при увеличении потерь холостого хода объём и масса формирателя растут линейно. Наличие потерь обуславливает зависимость объёма и массы от длительности паузы между импульсами. Для уменьшения влияния потерь холостого хода на объём и массу необходимо повышать удельные показатели энергии источника питания, увеличивать длительность импульсов и уменьшать время паузы между ними. Потери холостого хода не оказывают заметного влияния на объём и массу формирателя при выполнении условий, соответственно:

$$\chi \ll \frac{N\tau + \tau_V}{(N-1)(T-\tau)} \simeq \frac{N\tau + \tau_V}{(N-1)T}, \quad (23)$$

$$\chi \ll \frac{N\tau + \tau_M}{(N-1)(T-\tau)} \simeq \frac{N\tau + \tau_M}{(N-1)T}. \quad (24)$$

где τ_V, τ_M — характеристические временные параметры генераторной схемы:

$$\tau_V = \eta_{\text{Г}}\Omega_V/\Lambda_V, \quad (25)$$

$$\tau_M = \eta_{\text{Г}}\Omega_M/\Lambda_M. \quad (26)$$

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ПОТЕРЯМ ХОЛОСТОГО ХОДА ФОРМИРОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Полученные результаты позволяют задать интервалы изменения коэффициента потерь холостого хода, в которых энергетическая эффективность формирователя и его массогабаритные параметры не становятся хуже допустимых величин. Характеристики ухудшения показателей формирователя удобно задавать в нормированном виде относительно параметров формирователя без потерь. Нормированный КПД в данном случае будет определяться отношением $\xi = \eta/\eta_r$, а нормированные приращения объема и массы – отношениями $v = \Delta V/V_0$ и $m = \Delta M/M_0$ соответственно.

Из (7) следует, что для обеспечения нормированного КПД не ниже заданной величины ξ^* коэффициент потерь холостого хода не должен превосходить значения:

$$\chi_\eta = \frac{(1 - \xi^*) N\tau}{\xi^* (N - 1) T}. \quad (27)$$

Из (19) и (21) следует, что для обеспечения нормированного приращения объема не выше заданной величины v^* коэффициент потерь холостого хода не должен превосходить значения:

$$\chi_V = v^* \frac{N\tau + \tau_V}{(N - 1) T}. \quad (28)$$

Из (20) и (22) следует, что для обеспечения нормированного приращения массы не выше заданной величины m^* коэффициент потерь холостого хода не должен превосходить значения:

$$\chi_M = m^* \frac{N\tau + \tau_M}{(N - 1) T}. \quad (29)$$

Все граничные коэффициенты (27) – (29) обратно пропорциональны произведению $(N - 1) T$, которое при выполнении условия (9) представляет собой длительность пачки импульсов. Коэффициент χ_η прямо пропорционален произведению $N\tau$. При увеличении количества импульсов в пачке зависимость χ_η от N ослабевает. Коэффициенты χ_V и χ_M в отличие от χ_η пропорциональны суммам $(N\tau + \tau_V)$ и $(N\tau + \tau_M)$ соответственно.

Требования к коэффициенту потерь холостого хода формирователя ЭМП в общем виде с учетом ограничений (27) – (29) можно представить формулой:

$$\chi \leq \chi_{\max} = \min(\chi_\eta, \chi_V, \chi_M), \quad (30)$$

где χ_{\max} – предельно допустимое значение коэффициента потерь.

Таким образом, методика обоснования требований к потерям холостого хода формирователя ЭМП реализуется следующей последовательностью действий:

- задаются удельные параметры энергии источника питания Ω_V, Ω_M , удельные параметры мощности Λ_V, Λ_M и КПД η_r СВЧ генератора;
- по формулам (25) и (26) рассчитываются временные параметры генераторной схемы τ_V и τ_M ;
- задаются параметры формируемой импульсной последовательности N, τ, T ;
- задаются допустимое относительное снижение КПД ξ^* и допустимые увеличения объема v^* и массы m^* формирователя ЭМП;
- по формулам (27) – (29) рассчитываются граничные значения коэффициента потерь холостого хода $\chi_\eta, \chi_V, \chi_M$;

— по формуле (30) определяется предельно допустимое значение коэффициента потерь холостого хода χ_{\max} .

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ГРАНИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ПОТЕРЬ ХОЛОСТОГО ХОДА ФОРМИРОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Практический интерес представляют оценки граничных значений коэффициента потерь формирователей, построенных на основе наиболее мощных генераторных приборах. В настоящее время таковыми являются черенковские генераторы и виркаторы [5]. Существующие приборы способны генерировать СВЧ ЭМП мощностью единицы ГВт, а некоторые образцы превосходят уровень 10 ГВт [6, 7]. Приборы указанных типов близки по частотному диапазону и параметрам генерируемых ими импульсов. Однако виркаторы отличаются более простой и компактной конструкцией и могут работать без внешнего фокусирующего магнитного поля [6]. Они оказываются более подходящими для размещения на носителях с небольшим массогабаритным ресурсом. Поэтому ниже будет рассматриваться формирователь ЭМП на основе виркатора.

Анализ характеристик существующих виркаторов [8] показал, что их объемные и массовые плотности мощности составляют, соответственно, единицы ГВт/м³ и единицы МВт/кг. Энергетическая эффективность виркаторов гигаваттного уровня мощности, как правило, составляет единицы процентов [9]. На основе этих данных принято: $\Lambda_V = 5 \text{ ГВт/м}^3$, $\Lambda_M = 5 \text{ МВт/кг}$, $\eta_r = 0,05$.

В качестве источника питания рассматривался емкостной накопитель энергии. Удельные энергетические параметры источника питания на основе емкостных накопителей составляют $\Omega_V = 0,3 \text{ МДж/м}^3$, $\Omega_M = 0,1 \text{ кДж/кг}$ [3]. Для рассматриваемой генераторной схемы характеристические временные параметры равны $\tau_V = 3 \text{ мкс}$ и $\tau_M = 1 \text{ мкс}$.

Допустимым ухудшением характеристик формирователя с потерями холостого хода считалось снижение КПД на 20 %, увеличение объема на 7,5% и увеличение массы на 10 % по сравнению с характеристиками формирователя без потерь. Для таких исходных данных $\xi^* = 0,8$, $v^* = 0,075$, $m^* = 0,1$.

На рисунках 1 и 2 показаны графики зависимостей коэффициентов χ_η , χ_V , χ_M от длительности импульсов при $N = 20$ и $N = 100$ соответственно. Период повторения в обоих случаях составляет $T = 10 \text{ мс}$ (частота повторения 100 Гц). Диапазон длительностей импульсов, в котором проводился расчет, соответствует реализуемым значениям длительностей импульсов виркаторов.

Из представленных графиков видно, что для обеспечения заданных требований по энергетической эффективности и массогабаритным показателям формирователя ЭМП, построенного по схеме “емкостной накопитель – виркатор”, потери холостого хода должны быть достаточно малыми. При изменении количества импульсов в пачке от 20 до 100 границы допустимых потерь изменяются незначительно. В зависимости от длительности импульсов предельно допустимые потери холостого хода определяются разными факторами. При $N = 20$ в диапазоне 10...65 нс ограничивающим фактором является энергетическая эффективность формирователя, в диапазоне 65...350 нс – его масса, а в диапазоне 350...1000 нс – его объем. При $N = 100$ наблюдается похожая картина, однако границы указанных диапазонов смещаются в область более коротких длительностей и составляют 13 нс и 70 нс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведен анализ влияния потерь холостого хода на энергетическую эффективность, объем и массу формирователя ЭМП, построенного по схеме “источник питания –

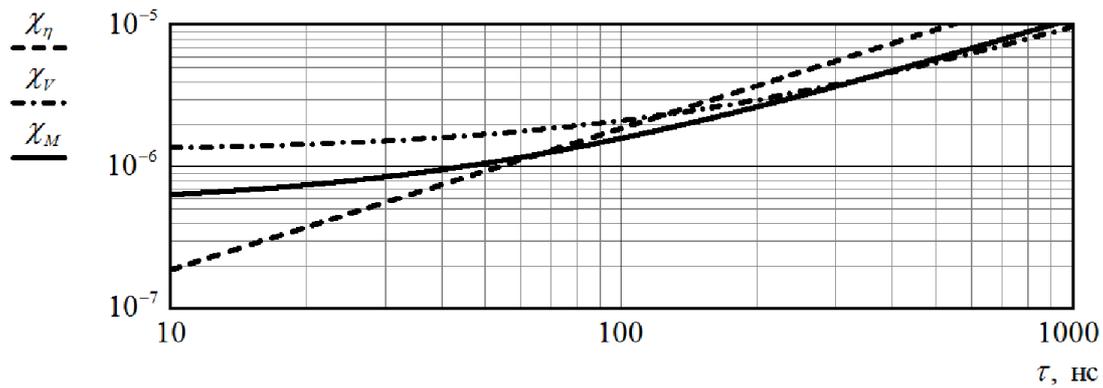


Рис. 1. Зависимости граничных коэффициентов потерь холостого хода от длительности импульсов при $N = 20$.

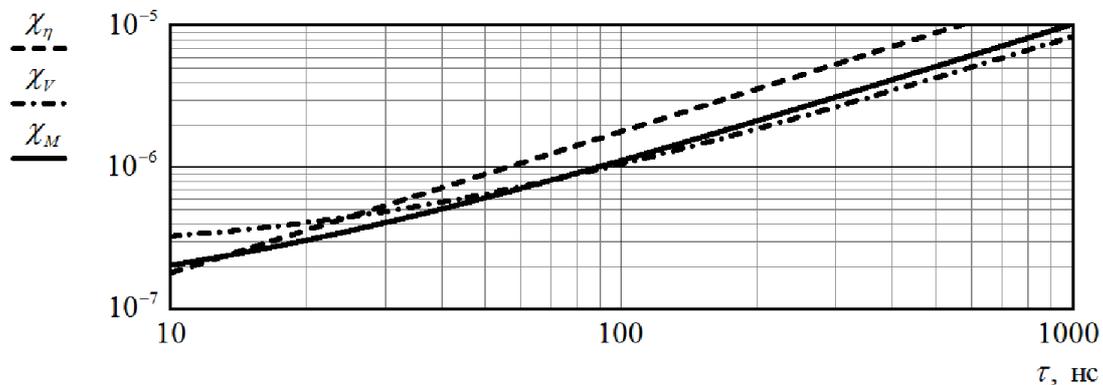


Рис. 2. Зависимости граничных коэффициентов потерь холостого хода от длительности импульсов при $N = 100$.

СВЧ генератор”. Получены соотношения, связывающие КПД, объем и массу формирователя с коэффициентом потерь холостого хода. Основой для решения задачи послужило уравнение энергетического баланса в системе “источник питания – генератор”. Определены условия, при которых потери холостого хода не влияют на эффективность и массогабаритные параметры формирователя. Разработана методика обоснования требований к потерям холостого хода, обеспечивающих заданные эффективность, объем и массу формирователя. Проведен расчет граничных коэффициентов потерь холостого хода формирователя, построенного по схеме “емкостной накопитель – виркатор”. Полученные в статье результаты могут быть использованы для обоснования требований к параметрам формирователей ЭМП на основе мощных СВЧ генераторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диденко, А. Н. СВЧ-энергетика: Теория и практика / А. Н. Диденко. — М. : Наука, 2003. — 446 с.
2. Диденко, А. Н. Мощные электронные пучки и их применение / А. Н. Диденко, В. П. Григорьев, Ю. П. Усов. — М. : Атомиздат, 1977. — 280 с.
3. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока / Под ред. В. Е. Фортова. — М. : Наука, 2002. — 399 с.
4. Айзенберг, Г. З. Антенны ультракоротких волн / Г. З. Айзенберг. — М. : Государственное издательство литературы по вопросам связи и радио, 1957. — 700 с.

5. Диденко, А. Н. О предельно допустимом уровне мощности импульсных СВЧ-генераторов на основе сильноточных электронных ускорителей / А. Н. Диденко // Доклады Академии наук. — 1997. — Т. 356, № 4. — С. 470–471.
6. Дубинов, А. Е. Электронные приборы с виртуальным катодом / А. Е. Дубинов, В. Д. Се-лемир // Радиотехника и электроника. — 2002. — Т. 47, № 6. — С. 645–672.
7. Черепенин, В. А. Релятивистские многоволновые СВЧ генераторы и их возможные применения / В. А. Черепенин // Успехи физических наук. — 2006. — Т. 176, № 10. — С. 1124–1130.
8. Источники СВЧ излучения с виртуальным катодом [Электронный ресурс]. Режим досту-па: http://portal.tpu.ru:7777/departments/laboratory/lab42/science/svch_virt (дата обращения 22.03.2020).
9. Рухадзе, А. А. Виркаторы (обзор) / А. А. Рухадзе, С. Д. Столбецов, В. П. Тараканов // Радиотехника и электроника. — 1992. — Т. 37, № 3. — С. 385–396.

REFERENCES

1. Didenko A.N. Microwave power engineering: Theory and practice. [Didenco A.N. SVCh-e'nergetika: Teoriya i praktika]. Moscow: Nauka, 2003, 446 p.
2. Didenko A.N., Grigor'yev V.P., Usov Yu.P. Powerful electron beams and their application. [Didenko A.N., Grigor'yev V.P., Usov Yu.P. Moshchnyye elektronnyye puchki i ikh primeneniye]. Moscow: Atomizdat, 1977, 280 p.
3. Explosive generators of powerful pulses of electric current. Ed. by V.E. Fortov. [Vzryvnyye generatory moshchnykh impul'sov elektricheskogo toka. Pod red. V.E. Fortova]. Moscow: Nauka, 2002, 399 p.
4. Ayzenberg G.Z. Antennas of ultrashort waves. [Ayzenberg G.Z. Antenny ul'trakorotkikh voln]. Moscow, 1957, 700 p.
5. Didenko A.N. About the maximum permissible power level of pulsed microwave generators based on high-current electron accelerators. [Didenko A.N. O predel'no dopustimom urovne moshchnosti impul'snykh SVCh-generatorov na osnove sil'notochnykh elektronnykh uskoriteley]. *Doklady Akademii nauk — Doklady Physics*, 1997, vol. 356, no. 4, pp. 470–471.
6. Dubinov A.Ye., Selemir V.D. Electronic devices with a virtual cathode. [Dubinov A.Ye., Selemir V.D. Elektronnyye pribory s virtual'nym katodom]. *Radiotekhnika i elektronika — Journal of Communications Technology and Electronics*, 2002, vol. 47, no. 6, pp. 645–672.
7. Cherepenin V.A. Relativistic multiwave microwave generators and their possible applications. [Cherepenin V.A. Relyativistskiye mnogovolnovyye SVCh generatory i ikh vozmozhnyye primeneniya]. *Uspekhi fizicheskikh nauk — Physics-Uspekhi*, 2006, vol. 176, no. 10, pp. 1124–1130.
8. Sources of microwave radiation with a virtual cathode. [Istochniki SVCh izlucheniya s virtual'nym katodom]. Access mode: http://portal.tpu.ru:7777/departments/laboratory/lab42/science/svch_virt (accessed 22.03.2020).
9. Rukhadze A. A. Stolbetsov S. D., Tarakanov V. P. Virkators (review). [Rukhadze A.A. Stolbetsov S.D., Tarakanov V.P. Virkatory (obzor)]. *Radiotekhnika i elektronika — Journal of Communications Technology and Electronics*, 1992, vol. 37, no. 3, pp. 385–396.

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

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

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

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