



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-2-100-106>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.385.6

## КЛИНОТРОН НА ОТКРЫТОМ РЕЗОНАТОРЕ С СИММЕТРИЧНЫМИ КОНИЧЕСКИМИ ГОФРИРОВАННЫМИ ЗЕРКАЛАМИ – ГОРАТРОН

А.А. КУРАЕВ, В.В. МАТВЕЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 3 февраля 2021*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

**Аннотация.** В настоящей статье представлено дальнейшее развитие идеи радиального клиноорotronа – клинотрон с симметричными коническими радиально гофрированными зеркалами резонатора – горатрон (ГОфрированные РАдиально зеркала, ТРОН – прибор). В таком приборе образуется сильная связь объемного поля и поверхностных резонансных полей сдвоенных конических зеркал, благодаря чему поле синхронной гармоникой присутствует во всем межзеркальном пространстве. Это делает возможным использование широкого электронного потока (ЭП). Коническая же геометрия зеркал обеспечивает клинотронный эффект. В результате повышается не только допустимая мощность прибора, но его КПД по сравнению с обычным радиальным клиноорotronом. В статье приведены результаты расчета варианта горатрона при  $\beta_0 = 0,51$ . Решение двумерной краевой задачи для потенциала  $V(r, z) = rB_\phi(r, z)$ , определяющего осесимметричное колебание резонатора горатрона  $E_{m01}$ , проводилось с использованием стандартных пакетов для решения общих дифференциальных уравнений в частных производных с использованием конечных элементов. Анализ распределений  $E_r(r, z)$ ,  $E_z(r, z)$ ,  $B_\phi(r, z)$  показывает, что периодическая компонента поля существует во всем пространстве между гребенчатыми зеркалами. Такая особенность позволяет использовать широкий (до  $\lambda/4$ ) ЭП. Модель ЭП горатрона содержала 16 слоев по  $z$ , уравнения движения – релятивистские. Средний по всем слоям электронный КПД составил более 30 %, что в 1,5 раза выше, чем получено в расчетах КПД радиального клинотрона.

**Ключевые слова:** клиноорotron, открытый резонатор, гофрированные конические зеркала, радиальный электронный поток, терагерцы.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Кураев А.А., Матвеев В.В. Клинотрон на открытом резонаторе с симметричными коническими гофрированными зеркалами – горатрон. Доклады БГУИР. 2021; 19(2): 100-106.

## KLYNOTRON WITH USING THE OPEN RESONATOR AND SYMMETRIC CONICAL CORRUGATED MIRRORS – GORATRON

ALEXANDER A. KURAYEV, VLADIMIR V. MATVEYENKA

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 3 February 2021*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

**Abstract.** A further development of the radial klynoorotron idea – klynotron with symmetric conical radial corrugated resonator mirrors, is presented in the article. Strong coupling volume and surface resonance fields in the double conical mirrors in such a device is formed due to which the synchronous harmonic field is in the entire intermirror space. All saying above makes it possible to use a wide electronic flow. The conical mirror geometry provides a klynotron effect. As a result, not only the permissible device power is increased, but also its efficiency in comparison with a conventional radial klynoorotron. The article presents the calculating results of the Goratron at  $\beta_0 = 0.51$ . The solution of the two-dimensional boundary value problem for the potential  $V(r, z) = rB_\phi(r, z)$ , which determines Goratron resonator axisymmetric oscillation  $E_{m01}$ , was carried out by standard packages for solving general partial differential equations using finite elements. The distribution analysis  $E_r(r, z)$ ,  $E_z(r, z)$ ,  $B_\phi(r, z)$  shows that the field periodic component exists in the entire space between the comb mirrors. Given feature allows to use a wide (up to  $\lambda/4$ ) electron flow. Goratron electron flow model contains 16 layers along  $z$ , the equations of motion were relativistic. The electronic efficiency averaged over all layers is more than 30 %, which is 1.5 times higher than that obtained in the radial klynotron efficiency calculations.

**Keywords:** klynoorotron, open resonator, corrugated conical mirrors, radial electron flow, terahertz.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interest.

**For citation.** Kurayev A.A., Matveyenka V.V. Klynotron with using the open resonator and symmetric conical corrugated mirrors – goratron. Доклады БГУИР. 2021; 19(2): 100-106.

### Введение

Оротроны – генераторы на открытом резонаторе с дифракционной решеткой на одном из зеркал – сыграли определенную роль на первоначальном освоении миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн благодаря их разработке в ИРЭ АН СССР (Москва) и ИРЭ АН УССР (Харьков) [1]. Однако оротроны имели невысокую эффективность (КПД), и поэтому к 1980 году появились их улучшенные модификации: с двойной решеткой (ИРЭ АН СССР) и двойной гребенкой, нормальной к плоскости нижнего зеркала (орботрон – ИРЭ АН УССР). Введение дополнительного ступенчатого трансформатора на нижнем зеркале перед сдвоенной гребенкой значительно улучшило КПД орботрона [2]. Оставалась, однако, еще одна проблема – жесткое ограничение на толщину электронного потока: она должна быть значительно меньше четверти длины волны. Для преодоления этого ограничения были предложены и рассчитаны оротроны с использованием клинотронного эффекта: коаксиальный клинотрон [3] и радиальный клиноорotron [4].

Клинотронный эффект был обнаружен в ИРЭ АН УССР Г. Я. Левиным в 1956 году. Этот эффект состоит в том, что при наклонном падении под малым углом на периодическую замедляющую систему (ПЗС) все слои электронного потока (ЭП) конечной толщины последовательно вступают во взаимодействие с интенсивным полем на поверхности ПЗС. Благодаря этому повышается как мощность генератора (относительно широкий ЭП), так и его эффективность (интенсивное взаимодействие всех слоев ЭП). Клинотронный эффект нашел широкое применение в клинотронах миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн. Обзор работ (экспериментальных и теоретических), содержащий ссылки на 101 публикацию, приведен в [5].

В настоящей статье представлено дальнейшее развитие идеи радиального клиноорotronа – клинотрон с симметричными коническими радиально гофрированными зеркалами резонатора – горатрон (ГОфрированные РАдиально зеркала, ТРОН – прибор). В таком приборе образуется сильная связь объемного поля и поверхностных резонансных полей сдвоенных конических зеркал, благодаря чему поле синхронной гармоникой присутствует во всем межзеркальном пространстве. Это делает возможным использование широкого ЭП. Коническая же геометрия зеркал обеспечивает клинотронный эффект. В результате повышается не только допустимая мощность прибора, но его КПД по сравнению с обычным радиальным клиноорotronом.

### Принципиальная схема горатрона

Схема поперечного сечения горатрона в плоскости  $r, z$  приведена на рис. 1. Здесь: 1 – кольцевая электронная пушка, формирующая радиально сходящийся плоский электронный поток 2; 3 – конические гребенки открытого резонатора (ОР) горатрона ( $h$  – глубина азимутальных канавок,  $a$  – ширина канавок,  $b$  – ширина зуба гребенок.  $a+b$  – радиальный период гребенок); 4 – магнитопровод фокусирующего ЭП электромагнита; 5 – катушка питания электромагнита;  $r_0$  – начальный радиус гребенчатых зеркал,  $r_1$  – конечный радиус,  $z_0$  – начальное расстояние зеркал от плоскости симметрии ( $r=0$ ) ОР при  $r_0$ ,  $z_1$  – конечное расстояние при  $r=r_1$ . Таким образом, длина области взаимодействия по  $r$  равна  $L=r_1-r_0$ . Все приведенные величины представлены в безразмерной форме:  $r=r'k$ ,  $z=z'k$ . Здесь  $k=2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  – длина волны генератора, величины со штрихом – размерные. На схеме для упрощения рисунка изображено только 4 периода гребенок. На самом деле их должно быть 20–80. Выводы энергии и каналы водяного охлаждения на схеме не указаны.

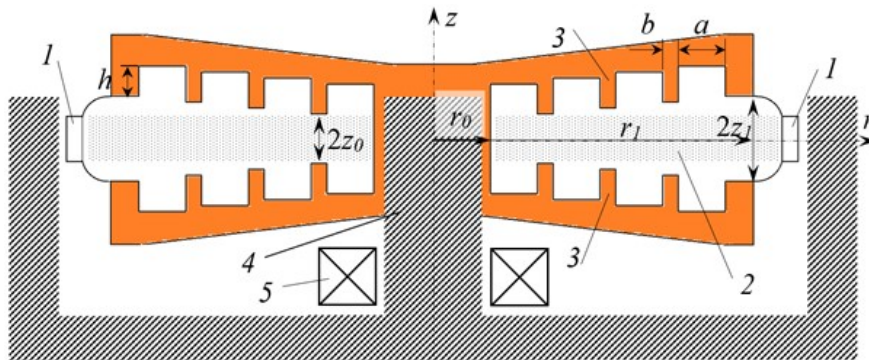


Рис. 1. Поперечное сечение горатрона в плоскости  $r, z$   
Fig. 1. Cross section for plane  $r, z$  of goratron

### Электродинамическая задача

Электромагнитное поле электродинамической системы радиального клиноорotronа-горатрона представляет собой связанное колебание азимутально-симметричного типа колебаний открытого резонатора  $E_{m01}$  и синфазного колебания  $T_{01}$  мод коаксиальных ячеек двух решеток.

Ввиду азимутальной симметрии искомого  $E$ -поля краевая задача для него оказывается скалярной. В качестве скалярной переменной можно выбрать  $z$  – составляющую электрического вектора Герца  $\vec{\Pi}_z^e$  или  $B_\phi$  (единственная составляющая магнитного поля колебания). Последнее предпочтительнее, поскольку составляющие электрического поля (по второму уравнению Максвелла) находятся через однократное дифференцирование  $B_\phi$  –  $rot(\vec{\phi}_0 B_\phi)$ , а через  $\vec{\Pi}_z^e$  необходимо двукратное дифференцирование  $\vec{\Pi}_z^e$  [6].

Однако и выбор  $B_\phi$  в качестве потенциала краевой задачи неоптимален: дифференцирование в  $rot(\vec{\phi}_0 B_\phi)$  производится не от  $B_\phi$ , а от  $rB_\phi$ . Таким образом, за потенциал краевой задачи следует принять  $V(r, z) = rB_\phi(r, z)$ .

Уравнение Гельмгольца для  $B_\varphi$  имеет вид  $\nabla^2 B_\varphi + k^2 B_\varphi - B_\varphi/r'^2 = 0$ ,  $k = \omega/c$ .

В соответствии с ним уравнение для  $V$  в безразмерных переменных записывается как

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial z} \right) + W^2 V = 0. \quad (1)$$

Здесь  $r = k_0 r'$ ,  $z = k_0 z'$ ,  $k_0 = \omega_0/c$ ,  $W = \omega/\omega_0$ ,  $\omega_0$  – резонансная частота,  $c$  – скорость света в пустоте, штрихованные координаты – размерные.

Компоненты электромагнитного поля выражаются через  $V(r, z)$  следующим образом:

$$\dot{E}_r = \frac{j}{W} \frac{\partial V}{r \partial z}, \quad \dot{E}_z = -\frac{j}{W} \frac{\partial V}{r \partial r}, \quad \dot{B}_\varphi = \frac{V}{r}. \quad (2)$$

Граничные условия к (1) в соответствии с (2) задаются следующим образом:

$$\left. \begin{array}{l} \text{на металлических поверхностях } \frac{\partial V}{\partial n} = 0, \quad (\vec{E}_r = 0); \\ \text{на открытой границе резонатора } V = 0, \quad (\vec{B}_\varphi = 0); \\ \text{на оси симметрии } z (r = 0) \frac{V}{r} = 0, \quad (\vec{B}_\varphi = 0). \end{array} \right\} \quad (3)$$

Выражения (2) относятся к безразмерным компонентам поля:  $\dot{E} = \frac{\dot{E}'}{E_m}$ ,  $\dot{B} = \frac{\dot{B}'c}{E_m}$ ,  $E_m = m_0 \omega_0 c/e$ ;  $e$ ,  $m_0$  – заряд и масса покоя электрона. Штрихованные компоненты размерные.

### Уравнения движения электронов

Безразмерные релятивистские уравнения движения крупных частиц-электронов, моделирующих ЭП, имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{dP_{rli}}{d\theta} &= - \left( \frac{\gamma_{li} \beta_{\varphi li}^2}{r} - E_r + \beta_{zli} B_\varphi \right), \\ \frac{dP_{\varphi li}}{d\theta} &= - \left( \frac{\gamma_{li} \beta_{rli} \beta_{\varphi li}}{r} - \beta_{zli} F_r \right), \\ \frac{dP_{zli}}{d\theta} &= - \left( -E_z - \beta_{rli} B_\varphi + \beta_{\varphi li} F_z \right), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{dz_{li}}{d\theta} &= -\beta_{zli}, \quad \frac{dr_{li}}{d\theta} = -\beta_{rli}, \quad \vec{P}_{li} = \gamma_{li} \vec{\beta}_{li}, \quad \vec{\beta}_{li} = \frac{\vec{v}_{li}}{c}, \\ \gamma_{li} &= \sqrt{1 + P_{rli}^2 + P_{\varphi li}^2 + P_{zli}^2}, \quad \theta = \omega t. \end{aligned}$$

Начальные условия для слоя ЭП с индексом  $l$  и электронов этого слоя с фазовым номером  $i$  имеют вид:

$$r_{li}(0) = r_1, \quad z_{li}(0) = l \Delta z, \quad l = \overline{1, N_s}, \quad \theta_i(0) = \frac{2\pi i}{N}, \quad i = \overline{1, N} \quad (5)$$

Безразмерные компоненты полей в (4) записываются как  $F_r = \frac{F_0}{r}$ ,  $F_0 = r_1 \frac{B_0(r_1)e}{m_0 \omega}$ ,  $\dot{E} = \frac{e \dot{E}'}{m_0 \omega_0 c} = A \cdot \vec{E}^0 e^{j\theta}$ ,  $A = \frac{e E'_{\max}}{m_0 \omega_0 c}$ ,  $\vec{E}^0 = \frac{\vec{E}'}{E_{\max}}$ ,  $\vec{E} = \text{Re } \dot{E} = A \vec{E}^0(r, z) \cos \theta$ ,  $\dot{B} = -jA \cdot \vec{B}^0 e^{j\theta}$ ,  $\vec{B}^0 = \frac{\vec{B}'}{B_{\max}}$ ,  $\vec{B} = \text{Re } \dot{B} = A \vec{B}^0(r, z) \sin \theta$ ,  $\theta = \omega t$ .

Конец интегрирования траектории электрона с индексами ( $li$ ) определяется условиями:  $z_{li}$  и  $r_{li}$  попадают на границу гребенки ( $Q_{\perp}$  или  $Q_{\parallel}$ ), т. е. на торец или боковую поверхность зуба гребенки, или достигают  $r = r_0$ .

Как показано в [5], поле пространственного заряда ЭП несущественно в клинотронах из-за большого сечения ЭП и, соответственно, малой плотности заряда. В рассматриваемом случае горатрона – тем более, поскольку поле резонатора значительно интенсивнее, чем поле бегущей волны в клинотроне. По этим причинам поле пространственного заряда в модели горатрона не учитывается.

Электронный КПД слоя  $l$  определяется как  $\eta_l^e = \frac{1}{N_{es}} \sum_{k=1}^{N_{es}} \frac{\gamma_0 - \gamma_{li}(k)}{\gamma_0 - 1}$ ,  $\gamma_{li}(k)$  – значение  $\gamma_{li}$  в конечной точке, т. е. в точке оседания на поверхность зуба гребенки. Суммарный по слоям КПД равен:

$$\eta^e = \frac{1}{N_s} \sum_{l=1}^{N_s} \eta_l^e. \quad (6)$$

Нагруженная добротность резонатора, при которой достигается полученное в расчете и оптимизации значение  $A$ , определяется как

$$Q_H = \frac{\omega_0 W_v}{\eta^e I_0 V_0} \approx \frac{2 \cdot 10^8 A^2}{\eta^e I_0 V_0} \int_D B_{\phi}^0 r dr dz, \quad (7)$$

где  $D$  – область вертикального сечения ( $r, z$ ) резонатора,  $W$  – запасаемая энергия в резонаторе,  $I_0$  – ток ЭП в амперах,  $V_0$  – напряжение пучка в вольтах.

### Результаты расчета горатрона

Рассчитаем вариант горатрона при  $\beta_0 = 0,51$  (ускоряющее напряжение ЭП  $V_0 = 83$ кВ) со следующими параметрами резонатора:  $r_0 = 20$ ,  $r_1 = 225$ ,  $z_0 = 0,85$ ,  $z_1 = 0,95$ ,  $h = \pi/4$ ,  $a = 1,875$ ,  $b = 0,625$ . Число ячеек гребенок зеркал  $n = 80$ . Тип объемного поля открытого резонатора  $E_{m01}$ ,  $m = 25$ . Относительная фазовая скорость обратной волны гребенки при указанных параметрах составляет  $\beta_{\phi} = v_{\phi}/c = 0,47$ . Таким образом, режим работы соответствует отстройке от синхронизма:  $\beta_0 > \beta_{\phi}$ .

Функция  $V(r, z)$ , как результат решения краевой задачи (1), (3), получена на основе стандартных пакетов для решения общих дифференциальных уравнений в частных производных с использованием конечных элементов. Поля  $E_r$ ,  $E_z$ ,  $B_{\phi}$  вычислялись по формулам (2). Распределения нормированной  $E_z$  на двух уровнях  $z$ : а)  $z = \pm 0,2$  и б)  $z = \pm 0,8$  приведены на рис. 2.

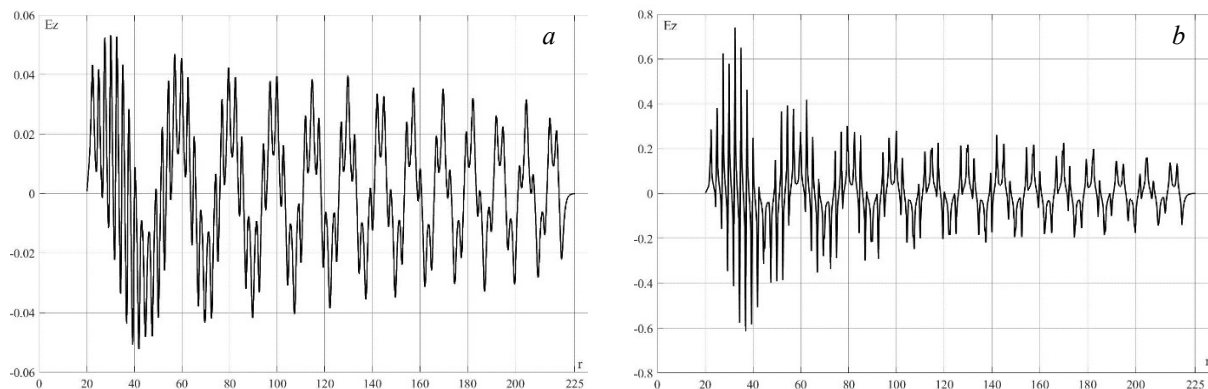


Рис. 2. Распределение  $E_z^{\circ}(r, z)$ : а –  $z = \pm 0,2$ , б –  $z = \pm 0,8$   
Fig. 2. Distribution  $E_z^{\circ}(r, z)$ : а –  $z = \pm 0,2$ , б –  $z = \pm 0,8$

Из рисунка видно, что на обоих уровнях объемное поле резонатора промодулировано периодическим полем гребенок, т. е. существует сильная связь этих полей во всем пространстве взаимодействия.

На рис. 3 представлено распределение нормированной компоненты  $E_r^\circ$  при  $z = \pm 0,8$ . Здесь также видна сильная связь полей решеток и объемного поля.

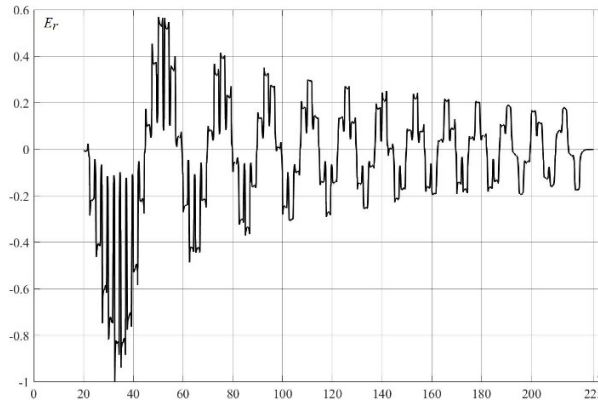


Рис. 3. Распределение  $E_r^\circ(r, z): z = \pm 0,8$

Fig. 3. Distribution  $E_r^\circ(r, z): z = \pm 0,8$

При решении уравнений движения электронов (4) ЭП разбивался на  $l = 16$  слоев при  $r = r_1: z = \{0,05 \div 0,8\}$  с шагом 0,05. При  $F_0 = 0,178$  и  $A = 0,045$  КПД горотрона составил свыше 30 %. График прироста  $\eta^e(r)$  при  $l = 16$  в пространстве взаимодействия по  $r$  представлен на рис. 4. Просматриваются участки медленного и быстрого роста КПД. Такое чередование обусловлено периодичностью группирования электронов в сложном комбинированном поле резонатора горотрона при отстройке от синхронизма ( $\beta_0 > \beta_\phi$ ). Рабочая нагруженная добротность резонатора для этого варианта горотрона  $Q = 738/I_0 [A]$  в соответствии с формулой (7).

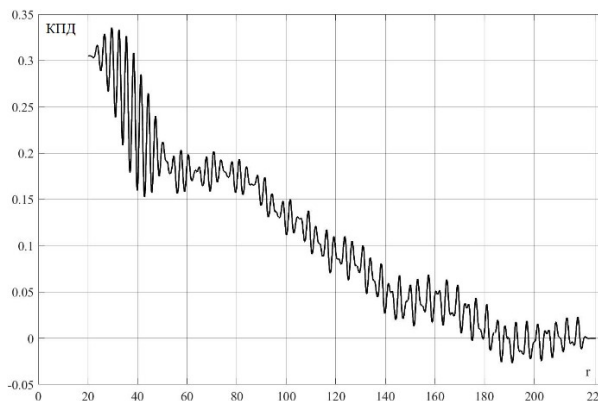


Рис. 4. Распределение  $\eta^e(r)$  при  $l = 16$

Fig. 4. Distribution  $\eta^e(r)$  at  $l = 16$

### Заключение

Горотрон, как развитие идеи радиального клиноорotronа, представляется перспективной конструкцией, обеспечивающий повышение КПД клинотронов и их мощности за счет пространственно развитого электронного пучка. Пучок имеет большой начальный радиус ( $r_1 \approx 225$ ) и относительно большую толщину (порядка  $\lambda/4$ ). КПД горотрона превосходит КПД радиального клиноорotronа в 1,5 раза. При этом надо иметь в виду, что полная оптимизация по КПД конструкции горотрона может существенно повысить его величину. Следует также отметить особенность режима работы горотрона при отстройке от синхронизма ( $\beta_0 > \beta_\phi$ ).

### Список литературы

1. Мясин Е.А. *Оротрон и его модификации*. В сб. «Генерация и усиление сигналов терагерцового диапазона». Саратов: Издательство СРТУ; 2016:160-194.
2. Кравченко В.Ф., Кураев А.А., Матвеев В.В. Орбитроны-генераторы субмиллиметрового и миллиметрового диапазонов. Ч. I. *Физические основы приборостроения*. 2016;5(2):102-115.
3. Кураев А.А., Синицын А.К. Клинооротрон на коаксиальном резонаторе. *Доклады БГУИР*. 2010;47(7):12-18.
4. Кураев А.А., Синицын А.К. Радиальный клинооротрон. *Доклады БГУИР*. 2012;65(3):98-104.
5. Еремка В.Д., Пишко О.Ф. Применение клинотронного эффекта в вакуумных источниках терагерцовых электромагнитных колебаний. *Радиофизика и электроника*. 2018;23(3):8-39.
6. Кураев А.А., Попкова Т.Л., Синицын А.К. *Электродинамика и распространение радиоволн*. Москва: ИНФРА-М; 2016.

### References

1. Myasin E.A. [*Orotron and its modifications. In the collection. "Generation and amplification of terahertz signals"*]. Saratov: Publishing house SRTU; 2016:160-194. (In Russ.)
2. Kravchenko V.F., Kurayev A.A., Matveyenka V.V. [Orbitrons-generators of submillimeter and millimeter ranges. Part I]. *Physical Foundations of Instrumentation*. 2016;5(2):102-115. (In Russ.)
3. Kurayev A.A., Sinitsyn A.K. [Klynoorotron on a coaxial resonator]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2010;47(7):12-18. (In Russ.)
4. Kurayev A.A., Sinitsyn A.K. [Radial klynoorotron]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2012;65(3):98-104. (In Russ.)
5. Eremka V.D., Pishko O.F. [Application of the klynotron effect in vacuum sources of terahertz electromagnetic oscillations]. *Radiophysics and Electronics*. 2018;23(3):8-39. (In Russ.)
6. Kurayev A.A., Popkova T.L., Sinitsyn A.K. [*Electrodynamics and propagation of radio waves*]. Moscow: INFRA-M; 2016. (In Russ.)

### Вклад авторов / Authors' contribution

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.  
All authors equally contributed to the writing of the article.

#### Сведения об авторах

Кураев А.А., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Матвеев В.В., к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

#### Information about the authors

Kurayev A.A., D.Sc., Professor, Professor at the Information Radiotechnologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Matveyenka V.V., PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Computational Methods and Programming Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

#### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники;  
тел. +375-17-293-89-56;  
e-mail: kurayev@bsuir.by  
Кураев Александр Александрович

#### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka str., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics;  
tel. +375-17-293-89-56;  
e-mail: kurayev@bsuir.by  
Kurayev Alexander Alexandrovich