



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-8-92-98>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.385.6

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ГИРОГЕЛИТРОНЫ СО СКРЕЩЕННЫМИ ПОЛЯМИ

А. А. КУРАЕВ, В. В. МАТВЕЕНКО

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

Поступила в редакцию 12.09.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

**Аннотация.** В классических гиротронах частота генерации  $\omega \approx k\omega_n$ , где  $\omega_n = eB_0/m$  – циклотронная частота вращения электрона в однородном продольном магнитном поле с индукцией  $B_0$ ,  $e$  – заряд электрона,  $m$  – масса электрона,  $k = 1, 2, 3, \dots$  – номер рабочей гармоники циклотронной частоты. То есть перестройка частоты генерации  $\omega$  возможна только за счет изменения  $B_0$ . Такой путь не очень удобен: необходима дополнительная (управляющая) обмотка соленоида. Эта трудность может быть устранена в гиротронах со скрещенными полями – электрическим  $\vec{E}_0$  и магнитным  $\vec{B}_0$ , причем  $\vec{E}_0 \perp \vec{B}_0$ . В таких гиротронах возможна перестройка частоты за счет изменения  $E_0$ , которая может быть реализована, по крайней мере, в двух случаях: гиротрон на коаксиальном резонаторе с радиальным  $E_0$ ; четырехзеркальный гиротрон на бегущих Т-волнах с поперечным по отношению к  $\vec{B}_0$  и к направлению бегущих волн однородным  $\vec{E}_0$ . В первом типе гиротрона моновинтовой электронный поток имеет угловую частоту вращения  $\omega_s = \frac{1}{2}(\omega_n + \sqrt{\omega_n^2 + 4\omega_c^2})$ , где  $\omega_c = \sqrt{\frac{eV_0}{mr_0^2}}$ ,  $V_0 = \frac{\Delta V}{\ln \frac{b_1}{b_2}}$ ,  $\Delta V$  – разность потенциалов между внутренним (радиус  $b_1$ ) и внешним (радиус  $b_2$ )

проводниками коаксиала,  $r_0$  – радиус вращения пучка. Таким образом, частота генерации  $\omega \approx k\omega_n$  определяется как при помощи  $B_0$ , так и  $\Delta V$ . Причем при  $\Delta V = 0$  прибор становится классическим высокоорбитным гиротроном, при  $B_0 = 0$  – классическим гелитроном. Поэтому при  $B_0 \neq 0$  и  $\Delta V \neq 0$  его следует назвать гирогелитроном, частота генерации которого перестраивается электрическим способом – изменением  $\Delta V$ . В статье приведены схемы конструкций гирогелитрона и двухпучкового четырехзеркального гиротрона. В том и другом случаях указаны пьезоэлектрические устройства синхронной перестройки частоты резонатора, что делает приборы полностью электрически управляемыми. Для гирогелитрона получены следующие результаты. Поле резонатора –  $H_{211}$ , взаимодействие на второй гармонике  $\omega_s$ ; а) узкополосная перестройка 10 %: максимальный КПД = 55 %, минимальный КПД = 25 %;  $\beta_0 = v_0/c = 0,27$ ;  $q = v_{0\perp}/v_{\parallel} = 2$ ; б) широкополосная перестройка 58 %: максимальный КПД = 18 %, минимальный КПД = 14 %;  $\beta_0 = v_0/c = 0,2$ ;  $q = v_{0\perp}/v_{\parallel} = 2$ . Полученные для гирогелитрона результаты указывают на перспективность использования электрической перестройки частоты в коаксиальной гиро-ЛОВ и полосы усиления в гиро-ЛБВ, поскольку в этих приборах нет необходимости в пьезоэлектрической перестройке электродинамических структур.

**Ключевые слова:** гиротрон, электрическая перестройка частоты, пьезоэлектрическая перестройка резонатора, полоса перестройки, КПД, фазовая селекция электронов.

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

Для цитирования. Кураев, А. А. Электрически перестраиваемые гирогелитроны со скрещенными полями / А. А. Кураев, В. В. Матвейенко // Доклады БГУИР. 2022. Т. 20, № 8. С. 92–98. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-8-92-98>.

## ELECTRICALLY TUNABLE GYROHELITRONS WITH CROSSED FIELDS

ALEXANDER A. KURAYEV, VLADIMIR V. MATVEYENKA

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

*Submitted 12.09.2022*

**Abstract.** The generation frequency is  $\omega \approx k\omega_H$  in classical gyrotrons, where  $\omega_H = eB_0/m$  is the electron cyclotron rotation frequency in a uniform longitudinal magnetic field with induction  $B_0$ ,  $e$  is the electron charge,  $m$  is the electron mass,  $k = 1, 2, 3, \dots$  is the cyclotron frequency working harmonic number. Thus, the generation frequency  $\omega$  being tuned is possible only by changing  $B_0$ . This way is very inconvenient. It's necessary a solenoid additional (control) winding. That difficulty can be eliminated in gyrotrons with crossed fields - electric  $\vec{E}_0$  and magnetic  $\vec{B}_0$ , here  $\vec{E}_0 \perp \vec{B}_0$ . The frequency can be tuned by changing  $E_0$ . This possibility can be realized at least two ways: a gyrotron based on a coaxial resonator with radial field  $E_0$ ; a four-mirror gyrotron on traveling  $T$ -waves with transverse in respect the traveling wave direction to uniform crossed fields - electric  $\vec{E}_0$  and magnetic  $\vec{B}_0$ . The single-screw electron flow has a rotation frequency  $\omega_s = \frac{1}{2} \left( \omega_H + \sqrt{\omega_H^2 + 4\omega_c^2} \right)$ , for the first gyrotron type, where  $\omega_c = \sqrt{\frac{eV_0}{mr_0^2}}$ ,  $V_0 = \frac{\Delta V}{\ln \frac{b_1}{b_2}}$ ,  $\Delta V$  is the potential difference between the inner (radius  $b_1$ ) and outer (radius  $b_2$ ) coaxial

conductors,  $r_0$  is the electron flow rotation radius. Thus, the generation frequency  $\omega \approx k\omega_H$  is determined by both  $B_0$  and  $\Delta V$ . Moreover, at  $\Delta V = 0$  the device becomes a classical high-orbit gyrotron, at  $B_0 = 0$  a classical helitron. Therefore, at  $B_0 \neq 0$  и  $\Delta V \neq 0$  it should be called a gyrohelitron, the generation frequency of which is tuned electrically - by changing  $\Delta V$ . The article presents the design schemes of a gyrohelitron and a two-beam four-mirror gyrotron. In both cases, piezoelectric devices realize synchronous tuning of the frequency, just it allows the devices becoming fully electrically controllable. The following results were obtained for the gyrohelitron. Resonator field -  $H_{211}$ , interaction on the second harmonic  $\omega_s$ ; a) narrow-band tuning 10 %: maximum efficiency - 55 %, minimum efficiency - 25 %;  $\beta_0 = v_0/c = 0.27$ ;  $q = v_{0\perp}/v_{\parallel} = 2$ ; b) broadband tuning 58 %: maximum efficiency - 18 %, minimum efficiency - 14 %;  $\beta_0 = v_0/c = 0.2$ ;  $q = v_{0\perp}/v_{\parallel} = 2$ . The given results for the gyrohelitron indicate that it is promising to use electrical frequency tuning in a coaxial gyro-BWT and the amplification band in a gyro-TWT, since these devices do not require piezoelectric tuning of electrodynamic structures.

**Keywords:** gyrotron, electrical frequency being tuned, piezoelectric resonator being tuned, tuning band, efficiency, electron phase selection.

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

**For citation.** Kurayev A. A., Matveyenka V. V. (2022) Electrically Tunable Gyrohelitrons with Crossed Fields. *Doklady BGUIR*. 20 (8), 92–98. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-8-92-98> (in Russian).

### Введение

К электронным приборам СВЧ с винтовыми электронными потоками относятся два вида: гелитрон [1–8] и гиротрон [9–13]. Они кардинально различаются по механизмам как формирования электронного потока (ЭП), так и процесса взаимодействия. В гелитроне ЭП формируется с использованием центробежно-электростатической фокусировки (ЦЭФ), при которой центробежная сила при вращении электрона компенсируется центростремительной силой радиального электростатического поля коаксиальной линии [14]. Ввиду разной радиальной зависимости этих сил, ЦЭФ абсолютно устойчива [8]. В гиротроне, в частности в коаксиальном моновинтовом, фокусировка осуществляется продольным магнитостатическим полем.

Поэтому угловая частота вращения электронов в гелитроне и гиротроне определяется разными полями:

$$\begin{aligned} & \text{– в гелитроне [8]} \quad \omega_c = \sqrt{\frac{eV_0}{r_0^2 m}}; \\ & \text{– в гиротроне} \quad \omega_H = \frac{eB_0}{m}, \end{aligned}$$

где  $e$ ,  $m$  – заряд и масса электрона;  $V_0 = \Delta V / \ln b_1 / b_2$ ;  $\Delta V$  – разность потенциалов внутренней ( $r = b_1$ ) и внешней линий коаксиала ( $r = b_2$ );  $r_0$  – радиус вращения электрона;  $B_0$  – индукция продольного магнитостатического поля.

Из определения  $\omega_c$  и  $\omega_H$  непосредственно следует, что  $\omega_c$  изменяется (управляется) напряжением  $\Delta V$ , а  $\omega_H$  – индукцией магнитного поля  $B_0$ . Таким образом, перестройка частоты в гелитроне осуществляется напряжением  $\Delta V$ , в гиротроне – магнитным полем  $B_0$ . В этом первое преимущество гелитрона – безинерционная и бестоковая перестройка генерируемой частоты. Второе преимущество – отсутствие магнитной системы фокусировки. Но эти преимущества перекрывает существенный недостаток – ограничение предельно возможной частоты генерации. Он вытекает из принципиального физического ограничения  $V_0$ . Действительно, угловая скорость электрона  $v_\phi \approx \omega_c r_0 = \sqrt{\frac{eV_0}{m}} < c$ , где  $c$  – скорость света в пустоте, т. е.  $\frac{eV_0}{mc^2} < 1$ . Нужно учесть также, что неравенство следует усилить, поскольку  $v_\phi = \sqrt{v^2 - v_z^2} < v < c$ . В итоге  $V_0 < 5 \cdot 10^5$  В, и частотный диапазон гелитрона при  $r_0 \cong 1,57 \cdot 10^{-3}$  м ограничен ( $f_{\text{пред}} \sim 3 \cdot 10^9$  Гц). В гиротроне же – на три порядка больше [10, 11].

С другой стороны, в коаксиальном гиротроне также можно ввести  $\Delta V$ . Тогда частота вращения электрона  $\omega_s = \frac{1}{2}(\omega_H + \sqrt{\omega_H^2 + 4\omega_c^2})$ , т. е. за счет изменения  $\omega_c$  ( $\Delta V$ ) можно производить электрическую перестройку частоты генерации гиротрона со скрещенными полями – гирогелитрона в диапазоне примерно  $3 \cdot 10^9$  Гц. Исследованию эффективности гирогелитрона в приближении заданного поля посвящена данная статья.

### Схема конструкции гирогелитрона

На рис.1, а представлена схема конструкции гирогелитрона с фиксированной настройкой резонатора.

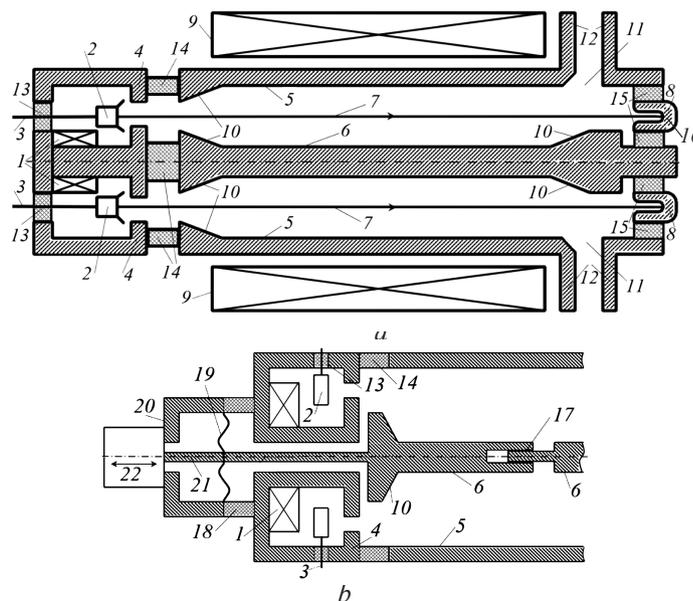


Рис. 1. Схема конструкции гирогелитрона: а – с фиксированной настройкой резонатора; б – управляющая часть с пьезоперестройкой резонатора

Fig. 1. Construction diagram of gyrohelitron: а – with a fixed resonator tuning; б – control part with a piezo resonator being tuned

Обозначения на рис. 1, *a*: 1 – обмотка электромагнита электронно-оптической системы (ЭОС); 2 – кольцевой термокатод; 3 – вывод катодного блока; 4 – анод, составляющий одновременно кольцевой зазор магнитной системы ЭОС, формирующей вращающийся моновинтовой электронный поток (электронная пушка Харриса); 5 – внешний цилиндр коаксиального резонатора радиусом  $b_2$ ; 6 – внутренний проводник резонатора радиусом  $b_1$ ; 7 – моновинтовой электронный поток радиусом  $r_0$ ; 8 – кольцевой коллектор; 9 – внешний соленоид, создающий в области взаимодействия продольное магнитное поле; 10 – конические скосы на внутреннем проводнике, образующие закритические области для волны  $H_{21}$  коаксиала; 11 – дифракционный вывод энергии через радиальную линию 12, 13, 14, 15 – вакуумно-плотные изоляторы; 16 – циркулярная водяная (или воздушная) система охлаждения коллектора. На рис. 1, *b* изображена управляющая часть конструкции гирогелитрона с пьезоперестройкой резонатора: 17 – телескопическое подвижное сочленение проводника резонатора, его положение должно соответствовать узлу азимутальной составляющей магнитного поля резонатора (в середине длины резонатора при нечетном продольном индексе  $l$  колебания  $H_{12l}$  резонатора); 18 – диэлектрический резонатор опорного стакана 20 пьезопакета; 19 – гибкая вакуумноплотная диафрагма, соединенная со штоком перемещения 21 крышки резонатора; 22 – пьезопакет (более подробно его конструкция описана далее).

### Математическая модель гирогелитрона

Безразмерные уравнения движения «крупных частиц», моделирующих электронный поток в поле  $H_{nil}$  коаксиального резонатора, имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_{zi}}{dz} = \frac{1}{\beta_{zi}} \left( \frac{\gamma_i \beta_{\varphi i}^2}{r_i} - E_r - \beta_{\varphi i} B_z + \beta_{zi} B_\varphi - F_r^0 - \beta_{\varphi i} F \right); \\ \frac{dP_{\varphi i}}{dz} = \frac{1}{\beta_{zi}} \left( -\frac{\gamma_i \beta_{ri} \beta_{\varphi i}}{r_i} - \beta_{zi} B_r + \beta_{ri} B_z + \beta_{ri} F \right); \\ \frac{dP_{zi}}{dz} = \frac{1}{\beta_{zi}} (-\beta_{ri} B_\varphi + \beta_{\varphi i} B_r); \\ \frac{dr_i}{dz} = \frac{\beta_{ri}}{\beta_{zi}}, \quad \frac{d\theta_i}{dz} = \frac{1}{\beta_{zi}}, \quad \frac{d\theta_i}{dz} = \frac{1}{\beta_{zi}}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $0 \leq z \leq d$ ;  $i$  – номер электрона (крупной частицы),  $i = \overline{1, N}$ ;  $\gamma_i = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_i^2}} = \sqrt{1 + P_{ri}^2 + P_{\varphi i}^2 + P_{zi}^2}$ ;

$\beta_i = v_i/c$ ;  $\beta_{ri} = v_{ri}/c$ ;  $\beta_{zi} = v_{zi}/c$ ;  $v_{z\varphi i} = v_{\varphi i}/c$ ;  $c$  – скорость света в пустоте;  $\theta_i = \omega t_i$ ;  $z = z'\omega/c = 2\pi z'/\lambda$ ;  $z'$  – размерная длина вдоль оси, м;  $r = r'\omega/c = 2\pi r'/\lambda$ ;  $r'$  – размерный радиус  $i$ -го электрона;  $\overline{P}_i = \gamma_i \beta_i$  – безразмерный импульс  $i$ -го электрона.

Начальные условия к системе (1) имеют вид:

$$\varphi_i(0) = 1/n(2\pi i/N); \theta_i(0) = 0; P_{ri}(0) = 0; P_{\varphi i}(0) = \gamma(0)\beta_{\varphi 0}; \gamma(0) = \left[ 1 - \beta_{\varphi 0}^2 \left( 1 + \frac{1}{q^2} \right) \right]^{-1/2}; \quad (2)$$

$$r_i(0) = \sqrt{\frac{DnS}{\gamma(0) - F}}; \beta_{\varphi i}(0) = \frac{r_0}{ns}; \beta_{ri}(0) = 0; \beta_{zi}(0) = \frac{\beta_{\varphi i}(0)}{q}; F_r^0 = \frac{D}{r_i(z)}, \quad (3)$$

где  $D = \frac{eV_0}{m_0 c^2}$ ;  $F = \frac{eB_0}{m_0 \omega}$ ;  $m_0$  – масса покоя электрона;  $\omega$  – рабочая частота генератора.

Безразмерные составляющие синхронной компоненты поля  $H_{nil}$  моды с круговой поляризацией запишутся в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_r = A_0 n/r_i F_{n1} \cos(n\varphi_i - \theta_i) \sin(\pi lz/d) / 2, \quad E_\varphi = -A_0 \mathcal{F}_{n1} \sin(n\varphi_i - \theta_i) \sin(\pi lz/d) / 2; \\ B_r = -A_0 \mathcal{F}_{n1} \cos(n\varphi_i - \theta_i) \cos(\pi lz/d) / 2, \quad B_\varphi = A_0 \pi l/d \cdot n/r_i F_{n1} \sin(n\varphi_i - \theta_i) \cos(\pi lz/d) / 2; \\ B_z = -A_0 (1 - (\pi l/d)^2) F_{n1} \cos(n\varphi_i - \theta_i) \sin(\pi lz/d) / 2, \end{array} \right. \quad (4)$$

где  $F_{n1} = J_n(\alpha_{n1}r_i/b_1)/J'_n(\alpha_{n1}) - N_n(\alpha_{n1}r_i/b_1)/N'_n(\alpha_{n1})$ ;  $\alpha_{n1}$  – корень уравнения;  $N_n(x)$  – функция Бесселя 2-го рода  $n$ -го порядка;  $\mathcal{F}_{n1} = \alpha_{n1}/b_1[J'_n(\alpha_{n1}r_i/b_1)/J'_n(\alpha_{n1}) - N'_n(\alpha_{n1}r_i/b_1)/N'_n(\alpha_{n1})]$ ;  $J'_n(\alpha_{n1})/N'_n(\alpha_{n1}) = J'_n(\alpha\alpha_{n1})/N'_n(\alpha\alpha_{n1})$ ;  $\alpha = b_2/b_1$ ,  $J_n(x)$  – функция Бесселя 1-го рода  $n$ -го порядка;  $J'_n(x) = dJ_n(x)/dx$ ;  $N'_n(x) = dN_n(x)/dx$ ;  $A_0 = eE_{\text{фmax}}/(m_0c\omega\mathcal{F}_{n1\text{max}})$ ;  $b_1 = 2\pi b'_1/\lambda$ ;  $b_2 = 2\pi b'_2/\lambda$ ;  $d = 2\pi d'/\lambda$ ; штриховые величины – размерные, м.

Оптимизацию гелитрона проводили по КПД, который определяли по формуле

$$\eta(z) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\gamma_0 - \gamma_i(d)}{\gamma_0 - 1}. \quad (5)$$

### Результаты расчета гиروهлитрона

Расчеты гиروهлитрона проводили для конструкции, приведенной на рис. 1, а, с фиксированной настройкой коаксиального резонатора на частоту  $\omega$  колебания  $H_{211}$ . Диапазон возможной электрической перестройки в эквивалентной конструкции (рис. 1, б) с пьезоперестройкой резонатора определяли по «замещению» магнитного поля  $F$  электрическим полем  $D$  при сохранении  $\omega_n = \omega F/\gamma_0$ ,  $\omega_c = \omega\sqrt{D}/r\sqrt{\gamma_0}$ .

1. Варианты с узкой перестройкой ( $\beta_{\text{ф0}} = 0,27$ ,  $q = 2$ ,  $r_0 = 0,5616$ ,  $b_1 = 0,3$ ,  $\alpha = 17$ ,  $S = 1,04$ ,  $d = 10\pi$ ):
  - а) гиротрон –  $D = 0$ :  $F = 0,52$ ,  $A = 0,0026$ ,  $\eta = 0,25$ ;
  - б) гиروهлитрон –  $D = 0,052$ :  $F = 0,47$ ,  $A = 0,008$ ,  $\eta = 0,55$ .

Возможный диапазон перестройки для конструкции гиروهлитрона по соотношению значений  $F$  составлял 10 %. Причины резкого повышения КПД гиروهлитрона по сравнению с той же конструкцией гиротрона заключаются в том, что в гиروهлитроне в дополнение к процессу обычной фазовой группировки осуществляется режим фазовой селекции электронов, осаждаемых на внутренний проводник. Такой режим существует и в гиротроне, но там он менее эффективен. Заметим: эффект фазовой селекции в гелитроне подробно исследовался В. И. Пермяковым в 1965 году.

2. Варианты с широкой перестройкой и слаборелятивистским электронным потоком ( $\beta_{\text{ф0}} = 0,2$ ,  $q = 2$ ,  $r_0 = 0,4$ ,  $b_1 = 0,33$ ,  $\alpha = 24$ ,  $S = 1$ ,  $d = 10\pi$ ):
  - а) гиротрон –  $D = 0$ :  $F = 0,5$ ,  $A = 0,0026$ ,  $\eta = 0,14$ ;
  - б) гиروهлитрон –  $D = 0,0242$ :  $F = 0,21$ ,  $A = 0,0073$ ,  $\eta = 0,18$ .

Возможный диапазон перестройки в этом случае составляет 58 %.

На рис. 2 приведены графики проекции движения электронов в плоскости  $rz$  для гиروهлитрона. Они отчетливо иллюстрируют процесс фазовой селекции электронов, попадающих на внутренний стержень с  $b_1 = 0,33$ . Эта селекция приводит к положительному эффекту в отношении КПД: замедленные электроны, отдавшие энергию электромагнитному полю, оседают на внутреннем стержне резонатора и уже не участвуют в дальнейшем взаимодействии с полем, которое привело бы их к ускорению.

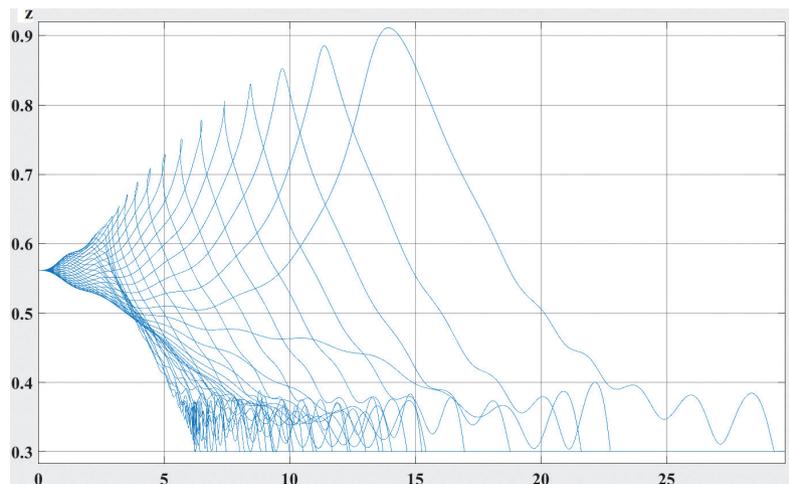


Рис. 2. Движение электронов в плоскости  $rz$  для гиروهлитрона  
Fig. 2. Electron motion plot in the  $rz$  plane for a gyrohelitron

## Заключение

1. В коаксиальных гиро-ЛОВ и гиро-ЛБВ со скрещенными  $E_0$  и  $B_0$  полями возможна электрическая перестройка частоты при одновременной электрической пьезоперестройке частоты резонатора в полосе 10–20 %.

2. Возможно значительное понижение требуемой индукции магнитного поля в гирогелитроне (до пяти раз).

3. Существенную роль в повышении КПД гирогелитрона (до 55 % на второй гармонике циклотронной частоты) играет фазовая селекция электронов.

4. Следует указать на перспективность использования скрещенных полей в электрически перестраиваемых коаксиальных гиро-ЛОВ и гиро-ЛБВ (перестраиваемая полоса усиления), в которых нет необходимости пьезоперестройки каких-либо структур.

## Список литературы

1. Чернов, З. С. Методы фокусировки электронов в современных приборах СВЧ / З. С. Чернов // Радиотехника и электроника. 1958. Т. 3, № 10. С. 1227–1235.
2. Watkins, D. A. The Helitron Oscillator / D. A. Watkins, G. Wada // Proceedings of the IRE. 1958. Vol. 46, No 10. P. 1700–1712.
3. Pantell, R. H. Small-Signal Analysis of the Helitron Oscillator / R. H. Pantell // IRE Trans. 1960. ED-7, No 1. P. 20–34.
4. Nunn, W. M. Some Characteristics of Certain Electrostatically-Focused Devices / W. M. Nunn, J. E. Rowe // Proceedings of the IRE. 1962. Vol. 50, No 1. P. 110–121.
5. Wada, G. Design, Theory and Characteristics of the Helitron – a New Type of Microwave Oscillator / G. Wada, R. H. Pantell // I.R.E. Wescon Convent. Rec. 1959. Vol. 3, No 3. P. 92–118.
6. Lindsay, P. A. Some General Properties of E-type Devices / P. A. Lindsay, J. Caunter // Mikrowellen, Vortrage der Internationalen Tagung. 1960. Vol. 1. P. 224–241.
7. Кураев, А. А. Стартовые условия в генераторах E-типа / А. А. Кураев, Б. Н. Романов, В. Н. Шевчик // Радиотехника и электроника. 1964. Т. 9, № 6. С. 983–993.
8. Кураев, А. А. Сверхвысокочастотные приборы с периодическими электронными потоками / А. А. Кураев. Минск: Наука и техника, 1971, 312 с.
9. Прибор для генерации электромагнитных колебаний в сантиметровом, миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн: а. с. СССР № 223931 / А. В. Гапонов, А. Л. Гольденберг, М. И. Петелин, В. К. Юлпатов. Оpubл. 24.03.1967.
10. Запевалов, В. Е. Гиротрон: пределы роста выходной мощности и КПД / В. Е. Запевалов // Известия вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 10. С. 864–871.
11. Запевалов, В. Е. Терагерцовые гиротроны / В. Е. Запевалов, М. Ю. Глявин // Сборник «Генерация и усиление сигналов терагерцового диапазона». Саратов: изд. СГГУ, 2016. 460 с.
12. Кураев, А. А. Теория и оптимизация электронных приборов СВЧ / А. А. Кураев. Минск: Наука и техника, 1979, 334 с.
13. Harriet, S. B. Construction of a Large-Orbit Second-Harmonic TE<sub>21</sub> Gyro-TWT Amplifier / S. B. Harriet, D. B. McDermott, N. C. Luhmann // Proceeding of IVEC–2005. P. 293–296.
14. Кураев, А. А. Электродинамика и распространение радиоволн / А. А. Кураев, Т. Л. Попкова, А. К. Синицын. М.: Инфра-М, 2016. 424 с.

## References

1. Chernov Z. S. (1958) Electron Focusing Methods in Modern Microwave Devices. *Radio Engineering and Electronics*. 3 (10), 1227–1235 (in Russian).
2. Watkins D. A., Wada G. (1958) The Helitron Oscillator. *Proceedings of the IRE*. 46 (10), 1700–1712.
3. Pantell R. H. (1960) Small-Signal Analysis of the Helitron Oscillator. *IRE Trans*. ED-7 (1), 20–34.
4. Nunn W. M., Rowe J. E. (1962) Some Characteristics of Certain Electrostatically-Focused Devices. *Proceedings of the IRE*. 50 (1), 110–121.
5. Wada G., Pantell R. H. (1959) Design, Theory and Characteristics of the Helitron – a New Type of Microwave Oscillator. *I.R.E Wescon Convent. Rec*. 3 (3), 92–118.
6. Lindsay P. A., Caunter J. (1960) Some General Properties of E-Type Devices. *Mikrowellen, Vortrage der Internationalen Tagung*. 1, 224–241.
7. Kurayev A. A., Romanov B. N., Shevchik V. N. (1964) Starting Conditions in E-Type Generators. *Radio Engineering and Electronics*. 9 (6), 983–993 (in Russian).

8. Kurayev A. A. (1971) *Microwave Devices with Periodic Electronic Flows*. Minsk, Science and Technology Publ. 312 (in Russian).
9. Gaponov A. V., Goldenberg A. L., Petelin M. I., Yulpatov V. K. A Device for Generating Electromagnetic Oscillations in the Centimeter, Millimeter and Submillimeter Wavelength Ranges. A. S. USSR No 223931. Publ. 24.03.1967 (in Russian).
10. Zapevalov V. E. (2006) Gyrotron: Limits of Output Power Growth and Efficiency. *News Universities. Radiophysics*. 49 (10), 864–871 (in Russian).
11. Zapevalov V. E., Glyavin M. Yu. (2016) Terahertz Gyrotrons. Compilation “Generation and Amplification of Signals in the Terahertz Range”. Saratov, SGGU Publ. 460 (in Russian).
12. Kurayev A. A. (1979) *Theory and Optimization of Microwave Electronic Devices*. Minsk: Science and Technology Publ. 334 (in Russian).
13. Harriet S. B., McDermott D. B., Luhmann N. C. (2005) Construction of a Large-Orbit Second-Harmonic TE<sub>21</sub> Gyro-TWT Amplifier. *Proceeding of IVEC–2005*. 293–296.
14. Kurayev A. A., Popkova T. L., Sinitsyn A. K. (2016) *Electrodynamics and Propagation of Radio Waves*. Moscow, Infra-M Publ. 424 (in Russian).

### Вклад авторов

Авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

### Authors' contribution

The 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.

### 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

### Information about the authors

**Kurayev A. A.**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Professor at the Information Radiotechnologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

**Matveyenka V. V.**, Cand. of Sci., Assistant Professor, Assistant Professor at the Computational Methods and Programming Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

### Address for correspondence

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