

ISSN 1561-8358 (Print)  
 ISSN 2524-244X (Online)  
 УДК 621.385.6  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-358-367>

Поступила в редакцию 07.06.2018  
 Received 07.06.2018

С. В. Колосов<sup>1</sup>, В. Е. Запелов<sup>2</sup>, И. Е. Зайцева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Институт прикладной физики Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ГИРОТРОНА НА КОНУСООБРАЗНОМ ВОЛНОВОДЕ

**Аннотация.** Приводятся результаты расчетов нелинейной модели перестраиваемого по частоте гиротрона на конусообразном волноводе и основной волне  $TE_{01}$ . Показано, что диапазон перестройки может достигать 2,8 %. Чтобы расширить данную полосу, необходимо удлинить конусообразную часть волновода без изменения угла увеличения радиуса волновода.

Волновой КПД расширяющегося вдоль оси волновода составляет 21 % на рабочей частоте 10 ГГц. Чтобы достичь данных показателей, необходимо электромагнит гиротрона разделить на две части – основной электромагнит и вспомогательный, который имеет ограниченную длину и может перемещаться вдоль волновода. Второй магнит можно выполнить в виде набора отдельных электромагнитов ограниченной длины. Набор электромагнитов должен заполнять всю длину конусообразного волновода. Выполнение данного условия позволит перемещать резонансное магнитостатическое поле вдоль волновода путем переключения тока в катушках указанного набора электромагнитов, что позволит исключить механическое перемещение вспомогательного электромагнита. На частоте 200 ГГц волновой КПД уменьшается до 15 %, при этом омические потери в стенках волновода составляют 3 % от мощности электронного потока.

Была исследована зависимость КПД гиротрона от начального углового разброса скоростей электронов, сделан вывод о том, что начальный угловой разброс скоростей электронов очень слабо влияет на КПД перестраиваемого гиротрона.

Волновой КПД сужающегося по длине волновода может достигать 29 % на частоте 200 ГГц, омические потери в стенках медного волновода составляют 4 % от мощности электронного потока. Расчеты показали, что гиротронная лампа обратной волны с сужающимся вдоль оси волноводом более эффективна, чем вариант гиротронной лампы бегущей волны. Однако в обоих вариантах синхронное значение магнитостатического поля должно смещаться вдоль оси в зависимости от требуемой рабочей частоты, иначе происходит или перегруппировка электронного потока, или обратная отдача энергии высокочастотным полем электронному потоку.

**Ключевые слова:** перестраиваемый гиротрон, конусообразный волновод, КПД, электронный поток, нелинейная модель

**Для цитирования:** Колосов, С. В. Исследование перестраиваемого гиротрона на конусообразном волноводе / С. В. Колосов, В. Е. Запелов, И. Е. Зайцева // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 3. – С. 358–367. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-358-367>

S. V. Kolosov<sup>1</sup>, V. E. Zapevalov<sup>2</sup>, I. E. Zaitseva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

## INVESTIGATION OF TUNABLE GYROTRON ON A CONE-SHAPED WAVEGUIDE

**Abstract.** The results of calculations of a nonlinear model of a tunable frequency gyrotron on a cone-shaped waveguide and the main wave  $TE_{01}$  are presented. It is shown that the adjustment range can reach 2.8 %. To extend this band, it is necessary to lengthen the cone-shaped part of the waveguide without changing the angle of increase in the radius of the waveguide.

The wave efficiency of a waveguide expanding along the axis is 21 % at a working frequency of 10 GHz. To achieve these parameters, it is necessary to divide the gyrotron electromagnet into two parts – the main electromagnet and auxiliary one, which has a limited length and can move along the waveguide. The second magnet can be made in the form of a set of individual electromagnets of limited length the set of electromagnets must fill the entire length of the cone-shaped waveguide. The fulfillment of this condition will allow to move the resonant magnetostatic field along the waveguide by switching the current in the coils of this set of electromagnets, which will exclude the mechanical movement of the auxiliary electromagnet. At a frequency of 200 GHz, the wave efficiency is reduced to 15 %, while the ohmic losses in the walls of the waveguide are 3 % of the power of the electron beam.

The dependence of the gyrotron efficiency on the initial angular spread of electron velocities was investigated. It was concluded that the initial angular spread of the electron velocities has very little effect on the efficiency of the tunable gyrotron.

The wave efficiency of a waveguide narrowing in length can reach 29 % at a frequency of 200 GHz, ohmic losses in the walls of a copper waveguide amount to 4 % of the power of the electron beam. Calculations have shown that a lamp backward wave gyrotron with a waveguide narrowing along the axis is more efficient than the version of the gyrotron traveling wave tube. However, in both cases, the synchronous value of the magnetostatic field must be displaced along the axis, depending on the required operating frequency, otherwise there occurs either a rearrangement of the electron beam or a return of the energy to the high-frequency field by the electron beam.

**Keywords:** tunable gyrotron, cone-shaped waveguide, efficiency, electron flow, nonlinear model

**For citation.** Kolosov S. V., Zapevalov V. E., Zaitseva I. E. Investigation of tunable gyrotron on a cone-shaped waveguide. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 3, pp. 358–367 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-3-358-367>

**Введение.** Гиротроны, как правило, работают на одной частоте, которая равняется циклотронной в резонаторе с критической частотой, близкой к генерируемой [1]. Перестройка по частоте может осуществляться только изменениями геометрических размеров резонатора, что на практике довольно трудно осуществить. В данной работе предлагается для перестройки частоты использовать длинный конусообразный волновод, в котором за счет перемещения области гирорезонанса путем смещения магнитостатического поля вдоль оси прибора будет изменяться и рабочая частота, так как максимум высокочастотного электромагнитного поля наблюдается вблизи критического сечения волновода для заданной волновой моды, а сдвиг вдоль оси конусообразного волновода магнитостатического поля приводит к изменению критического сечения и, следовательно, частоты. Такая идея была высказана еще в 1976 г. учеными Научно-исследовательского радиофизического института (ныне Институт прикладной физики), г. Горький [2, 3], однако не была подкреплена нелинейными расчетами конкретных приборов.

**Математическая модель и алгоритм расчета.** Для расчета гиротрона нами использована программа Гуго-К из программного комплекса CEDR [4] (Свидетельство о регистрации компьютерной программы № 384, внесена в реестр Национального центра интеллектуальной собственности Республики Беларусь 07.02.2012). Математическая модель процессов, происходящих в гирорезонансных приборах, описана в [5]. В основу модели заложена идея поиска решения в нерегулярном симметричном волноводе в виде разложения по собственным функциям регулярного волновода, которую предложил А. Г. Свешников [6]. Коэффициенты такого разложения определяются по методу Галеркина. Для решения самосогласованной задачи применяется метод блочной матричной прогонки. Учет омических потерь в стенках волновода производится с использованием приближения Щукина – Леонтовича [7]. В расчетах применялись неусредненные релятивистские уравнения движения электронов в заданных электромагнитных полях [8].

**Результаты расчетов гиротрона с расширяющимся волноводом.** Прежде всего, были определены электродинамические возможности конусообразного волновода ограниченной длины. Все параметры, в том числе и геометрические размеры, задавались в программе Гуго-К в нормированном виде, что позволило переносить полученные результаты в любой частотный диапазон. Параметры волновода приведены на рис. 1. Длина волновода задавалась равной  $l = L2\pi/\lambda_0 = 250$  радиан (где  $L$  – длина волновода,  $\lambda_0$  – рабочая длина волны), а длина конусообразного волновода – 200 радиан, или около 32 длин волн.

Критический радиус волновода для волны  $TE_{01}$  составляет 3,8317 радиан. Радиус начала конусообразной части волновода был задан равным 3,82 радиан, а в конце волновода – 3,9 радиан. В расчетах учитывались четыре типа волны – от  $TE_{01}$  до  $TE_{04}$ , что позволило корректно учесть преобразование типов волн на нерегулярных участках волновода. Граничные условия для волн в начале волновода были установлены путем полного их отражения от левой границы. В конце волновода для всех типов волн были определены условия полного согласования, то есть отсутствие отражения от правой границы волновода.

Как следует из рис. 1, *b*, при увеличении частоты в волноводе появляются несколько пиков амплитуды волны, но первый из них всегда больше, а это означает, что основное воздействие на электронный поток будет иметь этот первый максимум. На рис. 1, *c* показано продольное сечение распределения модуля нормированной амплитуды волны  $TE_{01}$ .

Нами была просчитана частотная характеристика такого конусообразного резонатора (рис. 2). Видно, что полоса возможной перестройки частоты может составить 2,8 %. Для расширения

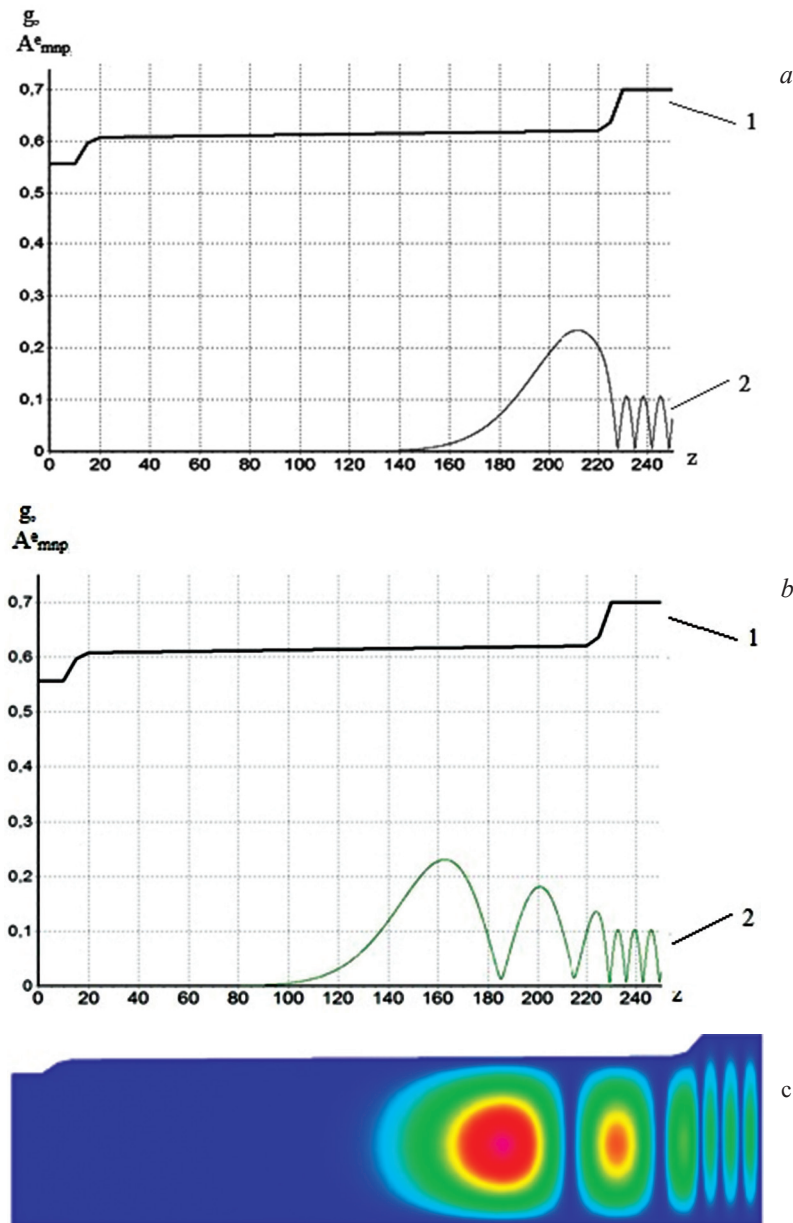


Рис. 1. Профиль волновода  $g = R/\lambda_0(I)$  и нормированный модуль амплитуды волны  $TE_{01}$   $A_{mnp}^e = \frac{E_{\perp mnp}^e \eta_0}{c^2}$  (2) для частоты  $M = \omega/\omega_0 = 0,985$  (a) и  $M = \omega/\omega_0 = 0,99$  (b); продольное сечение распределения модуля нормированной амплитуды волны  $TE_{01}$  для частоты  $M = \omega/\omega_0 = 0,99$  (c)

Fig. 1. The waveguide profile  $g = R/\lambda_0(I)$  and the normalized amplitude modulus of the  $TE_{01}$   $A_{mnp}^e = \frac{E_{\perp mnp}^e \eta_0}{c^2}$  (2) wave for the frequency  $M = \omega/\omega_0 = 0.985$  (a) and  $M = \omega/\omega_0 = 0.99$  (b); longitudinal section of the distribution of the modulus of the normalized wave amplitude  $TE_{01}$  for the frequency  $M = \omega/\omega_0 = 0.99$  (c)

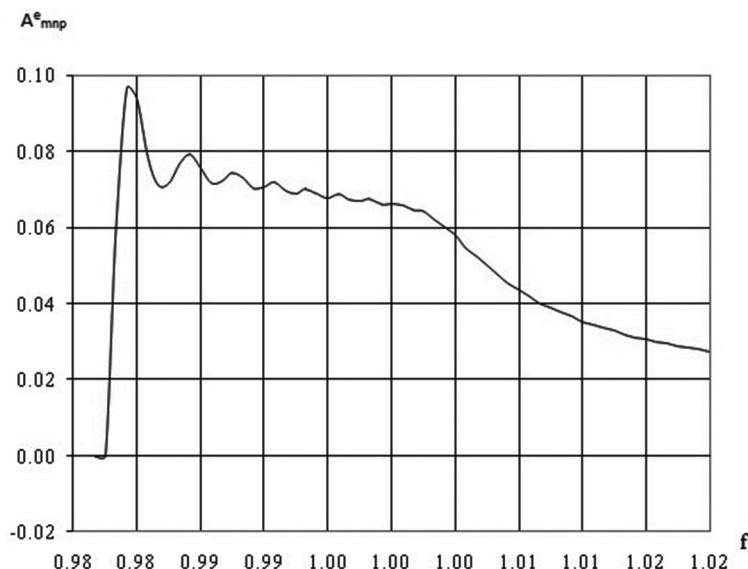
этой полосы допустимо удлинить конусообразную часть волновода без изменения угла увеличения радиуса волновода. Пульсацию амплитуды волны по частоте можно объяснить конечностью конусообразной части волновода.

Расчеты гиротрона проводились при следующих параметрах электронного потока:

$$\text{ускоряющее напряжение } V_0 = 46,5 \text{ кВ, } \beta_0 = \frac{v_0}{c} = \sqrt{1 - \frac{1}{(1,957 \cdot 10^{-6} V_0[\text{В}] + 1)^2}} = 0,4;$$

$$\text{сила тока } I_0 = 0,54 \text{ А, } \sigma = \frac{\eta_0 \mu_0}{c} I_0 = 0,73723 \cdot 10^{-3} I_0[\text{А}] = 0,0004;$$

$$\text{питч-фактор } q = v_{\perp} / v_t = 1.$$

Рис. 2. Частотная характеристика конусообразного резонатора длиной  $z = 220$ Fig. 2. The frequency response of a cone-shaped resonator of length  $z = 220$ 

Радиус ведущего центра электронных ротаторов для волны  $TE_{01}$  задавался  $r_{\text{вц}} = \frac{2\pi R_{\text{вц}}}{\lambda} = 1,57$ . Результаты расчета гиротрона на частоте  $M = 0,985$  показаны на рис. 3, *a*.

Функция поперечной фазовой группировки электронного потока  $F_{1z}$  равняется нулю при условии отсутствия группировки, как и в случае, когда все электроны попадают в одну фазу [6]. Оптимальное значение нормированного магнитостатического поля составило

$$F(z) = \frac{\mu_0 e H_z^0(z)}{\omega_0} = \frac{(1,748 \cdot 10^{11}) B_0 [T]}{2\pi f_0 [Hz]} = 1,04.$$

Был получен электронный КПД  $\eta_e = 0,17$ , или 17 %.

Результаты расчета гиротрона на частоте  $M = 0,9914$  отражены на рис. 3, *b*.

Оптимальное значение нормированного магнитостатического поля для данной частоты составило  $F = 1,06$ . «Электронный» КПД на выходе из волновода близок к нулю, хотя в середине волновода он составлял 22 %. Это объясняется тем, что после отбора энергии у электронного потока в середине волновода поток продолжает взаимодействовать с бегущей по волноводу волной  $TE_{01}$  и забирает у нее почти всю энергию.

На рис. 3, *c* приводится продольное сечение распределения модуля нормированной амплитуды волны  $TE_{01}$  для частоты  $M = 0,9914$ . Видно, что после основного максимума амплитуды волны следуют еще несколько максимумов бегущей волны, которые и уменьшают общий КПД лампы.

Для устранения данного явления предлагается разделить электромагнит на две части – основной электромагнит и вспомогательный, который имеет ограниченную длину и может смещаться вдоль волновода, как это показано на рис. 4. Второй магнит можно выполнить в виде набора отдельных электромагнитов ограниченной длины. Данный набор должен заполнять всю длину конусообразного волновода. Это позволит перемещать резонансное магнитостатическое поле вдоль волновода путем переключения тока в катушках этого набора электромагнитов, что поможет исключить механическое перемещение вспомогательного электромагнита.

Результаты расчета такого гиротрона на частоте  $M = \omega/\omega_0 = 0,9914$  отражены на рис. 5. Видно, что КПД (3) может достигать порядка 21 % при наличии ограниченного участка синхронного значения магнитостатического поля, а дальнейший несинхронный участок магнитостатического поля не позволяет отобрать энергию у бегущей вправо волны  $TE_{01}$ .

Значения поперечных нормированных скоростей электронов показаны на рис. 6, на котором заметно увеличение поперечных скоростей электронов при увеличении значения магнитостати-

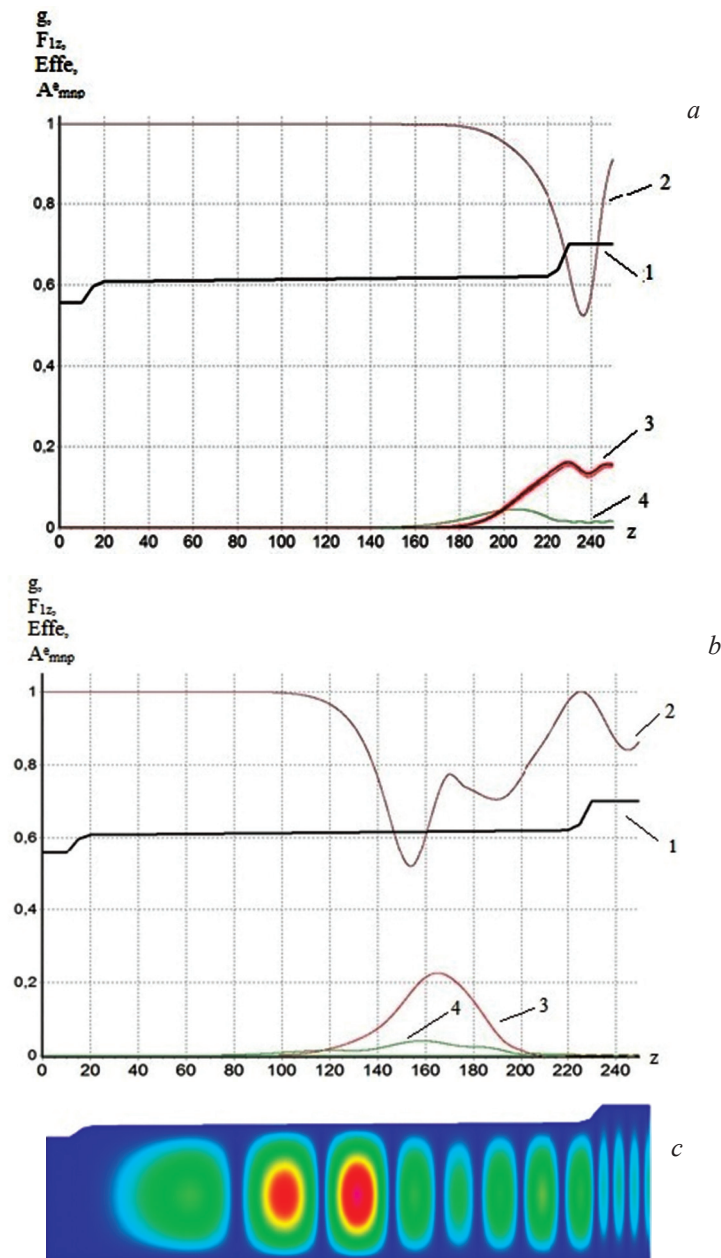


Рис. 3. Интегральные характеристики гиротрона (1 – профиль волновода, 2 – функция поперечной группировки электронов по первой гармонике гирочастоты  $F_{1z}$ , 3 – КПД, 4 – нормированное значение модуля амплитуды  $A_{mp}^e$  волны  $TE_{01}$ ) на относительной частоте  $M = 0,985$  (a) и  $M = 0,9914$  (b); продольное сечение распределения модуля нормированной амплитуды волны  $TE_{01}$  для частоты  $M = \omega/\omega_0 = 0,9914$  (c)

Fig. 3. Integral characteristics of the gyrotron (1 – waveguide profile, 2 – the transverse electron grouping function for the first harmonic of the gyrofrequency  $F_{1z}$ , 3 – the efficiency, 4 – the normalized value of the modulus of the wave  $A_{mp}^e$  amplitude  $TE_{01}$ ) at the relative frequency  $M = 0.985$  (a) and  $M = 0.9914$  (b); longitudinal section of the distribution of the modulus of the normalized amplitude of the wave  $TE_{01}$  for the frequency  $M = \omega/\omega_0 = 0.9914$  (c)

ческого поля при  $z = 40$ . В расчетах учитывались 32 траектории на ларморовской орбите и задавались четыре времени их влета в волновод. На рисунке заметно, что большая часть электронов отдала свою поперечную энергию электромагнитной волне, что и объясняет получение довольно высокого КПД.

Фазовые траектории электронов показаны на рис. 7, на котором видно, как формируется фазовый сгусток электронов в середине волновода и какой разброс получают электроны после отдачи энергии высокочастотной волне.

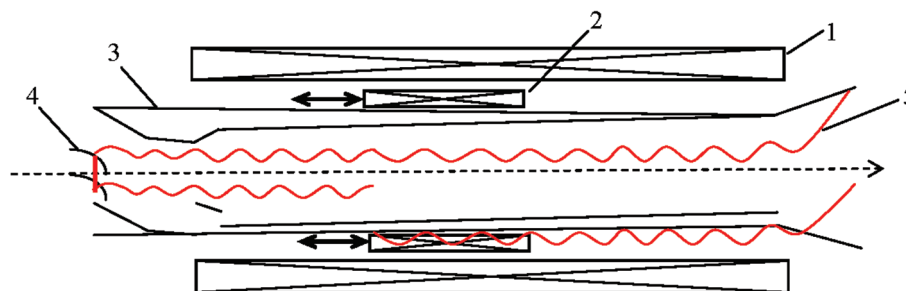


Рис. 4. Схематическое изображение предлагаемого перестраиваемого гиротрона на коническом волноводе: 1 – основной электромагнит, 2 – вспомогательный электромагнит, который может перемещаться вдоль волновода, 3 – конусообразный волновод, 4 – катод, 5 – электронный поток

Fig. 4. Schematic representation of the proposed tunable gyrotron on a conical waveguide: 1 – the main electromagnet, 2 – an auxiliary electromagnet that can move along the waveguide, 3 – is a cone-shaped waveguide, 4 – a cathode, and 5 – an electron beam

Расчеты проводились для рабочей частоты 10 ГГц, когда потери в стенках волновода были небольшими – порядка 0,1 %, поэтому волновой КПД почти совпадал с электронным КПД. Расчеты на более высокой частоте показали, что для частоты 200 ГГц волновой КПД уменьшился до 15 %, а потери в стенках волновода составили 3 % от мощности электронного потока (разность между электронным, то есть потерями мощности электронным потоком, и волновым, то есть мощностью, переносимой ВЧ волной, КПД).

Нами была исследована зависимость КПД гиротрона от начального углового разброса скоростей электронов, который определялся питч-фактором  $q = v_{\perp} / v_{\parallel}$ . На рис. 9 показано, как уменьшается КПД по мере разброса  $\Delta q$  (это полное значение разброса в обе стороны от среднего значения  $q$ ). Расчеты проводились по трехкомпонентной модели электронного потока.

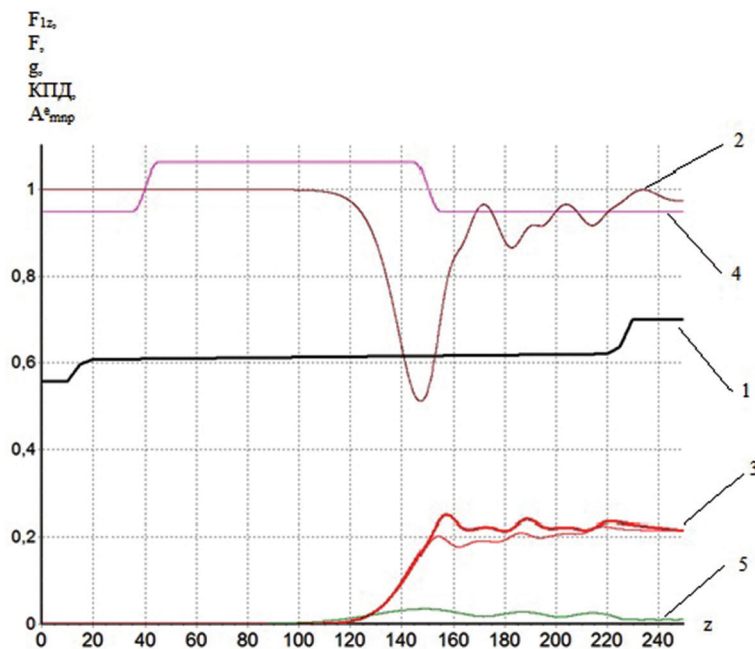


Рис. 5. Интегральные характеристики гиротрона на относительной частоте  $M = 0,9914$  и неоднородном магнитостатическом поле: 1 – профиль волновода  $g = R/\lambda_0$ , 2 – функция поперечной группировки электронов по первой гармонике гирочастоты  $F_{1z}$ , 3 – КПД, 4 – неоднородное магнитостатическое поле  $F$ , 5 – нормированное значение модуля амплитуды  $A_{mnp}^e$  волны  $TE_{01}$

Fig. 5. The integral characteristics of the gyrotron at the relative frequency  $M = 0,9914$  and the inhomogeneous magnetostatic field: 1 – the waveguide profile  $g = R/\lambda_0$ , 2 – the transverse electron grouping function for the first harmonic of the gyrofrequency  $F_{1z}$ , 3 – the efficiency, 4 – the inhomogeneous magnetostatic field  $F$ , 5 – the normalized value of the amplitude  $A_{mnp}^e$  modulus waves  $TE_{01}$

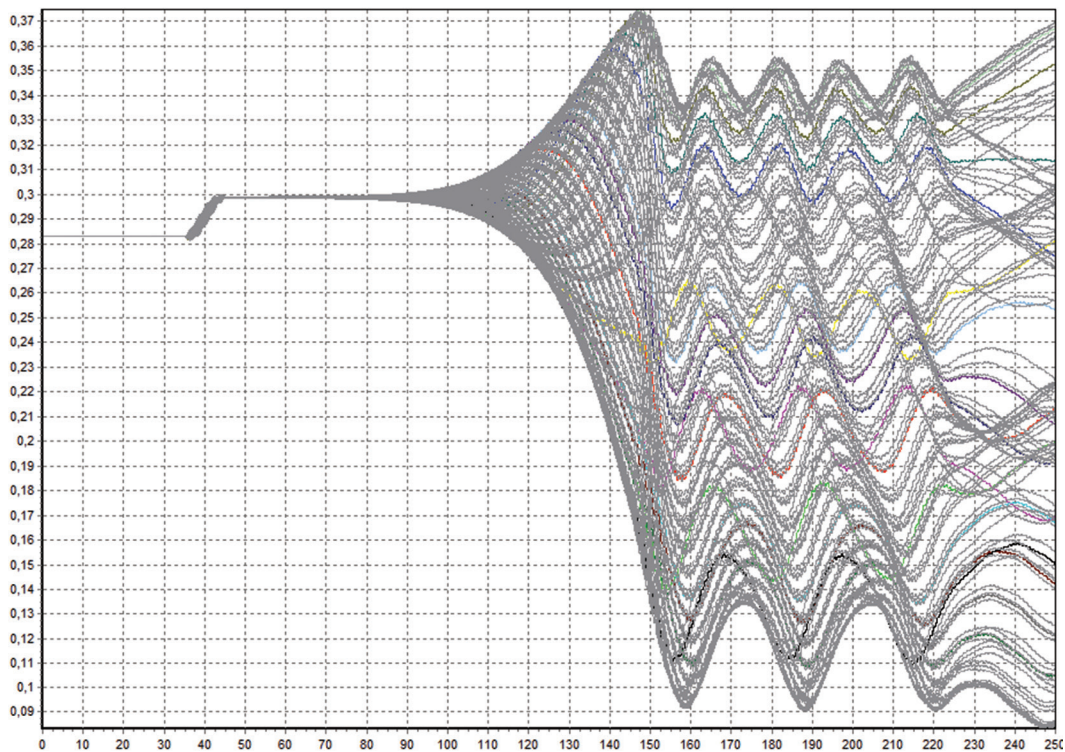


Рис. 6. Значения поперечных нормированных скоростей электронов по длине гиротрона  
 Fig. 6. The values of the transverse normalized electron velocities along the length of the gyrotron

Для определения начального углового разброса скоростей электронов для поперечной скорости по разбросу  $\Delta q$  может использоваться следующая формула:

$$\frac{\Delta\beta_{\perp}}{\beta_{\perp}} = \frac{(\Delta q + q)\beta_0}{\sqrt{1 + (\Delta q + q)^2\beta_{\perp}^2}} - 1.$$

Как видно на рис. 9, начальный угловой разброс питч-фактора не очень сильно уменьшает КПД гиротрона, что может быть связано с относительно невысоким значением  $q = 1$ .

**Результаты расчетов гиротрона с сужающимся волноводом.** Определенный интерес вызывает расчет гиротронных ламп обратной волны с сужающимся вдоль оси волноводом и выводом

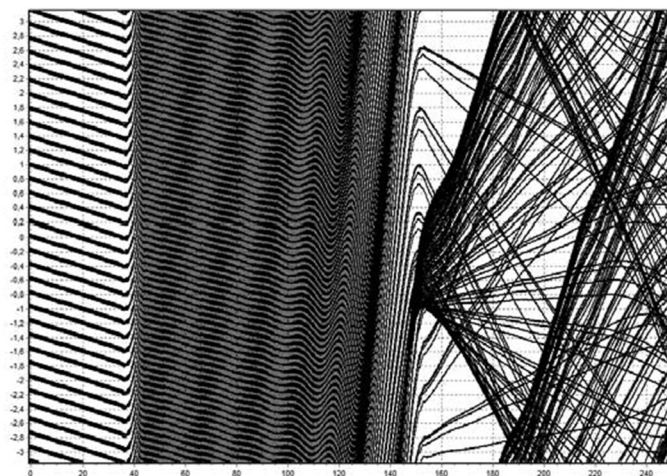


Рис. 7. Фазовые траектории электронов  
 Fig. 7. Phase trajectories of electrons

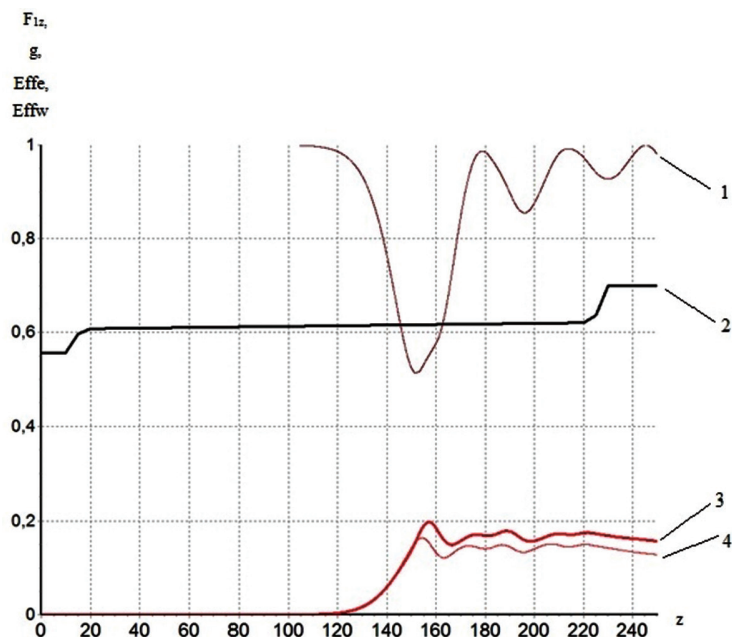


Рис. 8. Интегральные характеристики гиротрона на частоте 200 ГГц: 1 – функция поперечной группировки электронов по первой гармонике гирочастоты, 2 – профиль волновода  $g = R/\lambda_0$ , 3 – электронный КПД  $\eta_e$ , 4 – волновой КПД  $\eta_w$

Fig. 8. Integral characteristics of a gyrotron at a frequency of 200 GHz: 1 – a function of the transverse grouping of electrons with respect to the first harmonic of the gyrofrequency, 2 – the waveguide profile  $g = R/\lambda_0$ , 3 – the electronic efficiency  $\eta_e$ , 4 – the wave efficiency  $\eta_w$

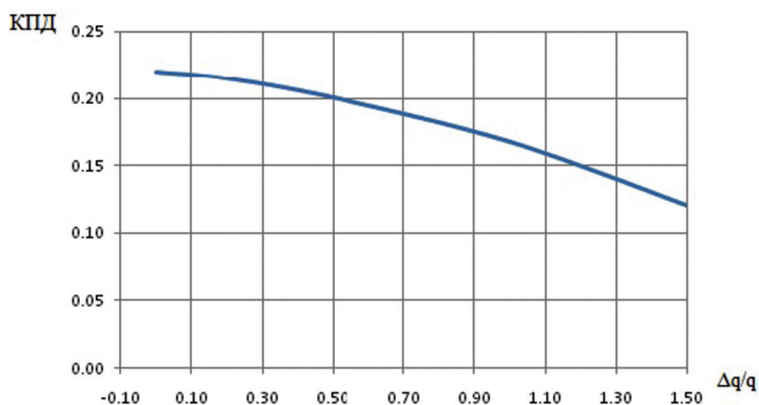


Рис. 9. Зависимость КПД гиротрона от начального углового разброса электронов на относительной частоте  $M = 0,9914$

Fig. 9. Dependence of the gyrotron efficiency on the initial angular spread of electrons at the relative frequency  $M = 0.9914$

высокочастотной энергии в сторону катода с последующим квазиоптическим преобразованием волны в параксиальный волновой пучок.

При проведении исследований все параметры гиротрона соответствовали приведенным в предыдущем разделе.

Как видно на рис. 10, *a*, волновой КПД (*b*) отрицателен, так как волна распространяется в сторону катода, а электронный КПД – 33 %. Это существенно больше, чем в случае расширяющегося вдоль оси волновода, где КПД достигал только 21 %.

На рис. 10, *b* приведено распределение высокочастотного поля вдоль оси волновода. Расчеты показали, что вариант гиротронной лампы обратной волны с сужающимся вдоль оси волноводом более эффективен, чем вариант гиротронной лампы бегущей волны. Однако в обоих вариантах синхронное значение магнитостатического поля должно смещаться вдоль оси в зависимости от требуемой рабочей частоты, иначе происходит или перегруппировка электронного потока, или обратная отдача энергии ВЧ полем электронному потоку.



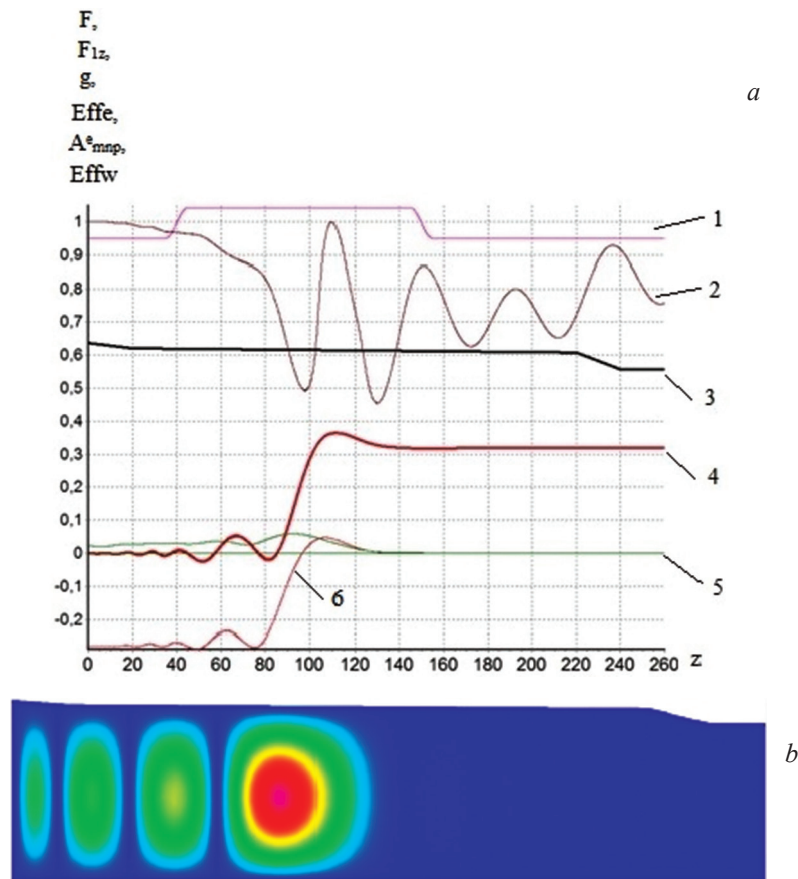


Рис. 10. Интегральные характеристики гиротрона с сужающимся волноводом и неоднородным магнитостатическом поле для относительной частоты  $M = 0,9914$  (a): 1 – нормированное магнитостатическое поле, 2 – функция поперечной группировки электронов по первой гармонике гирочастоты, 3 – профиль волновода  $g = R/\lambda_0$ , 4 – электронный КПД, 5 – нормированное значение модуля амплитуды волны  $TE_{01}$ , 6 – волновой КПД; продольное сечение распределения модуля нормированной амплитуды волны  $TE_{01}$  (b)

Fig. 10. The integral characteristics of a gyrotron with a tapered waveguide an inhomogeneous magnetostatic field for the relative frequency  $M = 0,9914$  (a): 1 – the normalized magnetostatic field, 2 – the transverse electron grouping function for the first harmonic of the gyrofrequency, 3 – the waveguide profile  $g = R/\lambda_0$ , 4 – electronic efficiency, 5 – normalized value of wave amplitude modulus  $TE_{01}$ , 6 – wave efficiency; longitudinal section of the distribution of the modulus of the normalized wave amplitude  $TE_{01}$  (b)

**Заключение.** В результате численных расчетов дано обоснование возможности практической реализации перестраиваемого по частоте гиротрона на конусообразном волновом.

Показано, что возможный диапазон перестройки составляет 2,8 %, при этом КПД гиротронной лампы бегущей волны составляет 21 %. Для достижения этих показателей необходимо электромагнит гиротрона разделить на две части – основной электромагнит и вспомогательный, который должен перемещаться по длине волновода. Максимальное значение омических потерь в стенках волновода – 3 % от мощности электронного потока на частоте 200 ГГц. Сделан вывод, что начальный угловой разброс скоростей электронов практически не влияет на КПД перестраиваемого гиротрона.

Для случая гиротронной лампы обратной волны с сужающимся конусообразным волноводом КПД стремится к 29 %, что существенно больше, чем для варианта гиротронной лампы бегущей волны.

#### Список использованных источников

1. Гапонов, А. В. Мазеры на циклотронном резонансе / А. В. Гапонов, М. И. Петелин, В. К. Юлпатов // Изв. вузов. Радиофизика. – 1967. – Т. 10, № 9/10. – С. 1414–1453.
2. Братман, В. Л. Теория гиротронов с низкодобротными электродинамическими системами / В. Л. Братман, М. А. Моисеев, М. И. Петелин // Гиротрон: сб. науч. тр. – Горький: ИПФ АН СССР, 1981. – С. 122–145.

3. Братман, В. Л. Перестройка частоты в гиromонотроне с электродинамической системой в виде конического волновода / В. Л. Братман, С. Л. Новожилов, М. И. Петелин // Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ. – 1976. – № 11. – С. 46–49.
4. Колосов, С. В. Компьютерная программа Гуго-К для разработки и проектирования гирорезонансных приборов / С. В. Колосов, И. Е. Зайцева // СВЧ электроника. – 2017. – № 2. – С. 44–46.
5. Колосов, С. В. Уравнения возбуждения нерегулярных волноводов с конечной проводимостью стенок / С. В. Колосов, А. А. Кураев, А. В. Сенько // Техника и приборы СВЧ. – 2009. – № 2. – С. 8–13.
6. Свешников, А. Г. К обоснованию метода расчета распространения электромагнитных колебаний в нерегулярных волноводах / А. Г. Свешников // Журн. вычисл. математики и мат. физики. – 1963. – Т. 3, № 2. – С. 314–326.
7. Никольский, В. В. Теория электромагнитного поля / В. В. Никольский. – М.: Высш. шк., 1961. – 372 с.
8. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: в 10 т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1988. – Т. 2: Теория поля. – 512 с.

## References

1. Gaponov A. V., Petelin M. I., Yulpatov V. K. Mathers at cyclotron resonance. *Izvestiya vuzov. Radiofizika* [News of Universities. Radiophysics], 1967, vol. 10, no. 9–10, pp. 1414–1453 (in Russian).
2. Bratman V. L., Moiseev M. A., Petelin M. I. The theory of gyrotrons with low-QD electrodynamic systems. *Gyrotron: sbornik nauchnykh trudov* [Gyrotron: collection of scientific papers]. Gorky: Institute of Applied Physics of the Academy of Sciences of the USSR, 1981, pp. 122–145 (in Russian).
3. Bratman V. L., Novozhilov S. L., Petelin M. I. Frequency tuning in a gyromonotron with an electrodynamic system in the form of a conical waveguide. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 1, Elektronika SVCh* [Electronic Engineering. Series 1: Microwave electronics], 1976, no. 11, pp. 46–49 (in Russian).
4. Kolosov S. V., Zaitseva I. E. Computer program Gyro-K for the development and design of gyro-resonance devices. *SVCh elektronika* [Microwave Electronics], 2017, no. 2, pp. 44–46 (in Russian).
5. Kolosov S. V., Kuraev A. A., Sen'ko A. V. Equations of excitation of irregular waveguides with finite wall conductivity. *Tekhnika i pribory SVCh* [Appliances and Devices of Microwave], 2009, no. 2, pp. 8–13 (in Russian).
6. Sveshnikov A. G. To the substantiation of the method for calculating the propagation of electromagnetic oscillations in irregular waveguides. *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki* [Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics], 1963, vol. 3, no. 2, pp. 314–326 (in Russian).
7. Nikol'skii V. V. *Theory of the electromagnetic field*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1961. 372 p. (in Russian).
8. Landau L. D., Lifshits E. M. *Theoretical physics. Volume 2: Field theory*. Moscow, Nauka Publ., 1988. 512 p. (in Russian).

## Информация об авторах

*Колосов Станислав Васильевич* – доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительных методов и программирования, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kolosov@bsuir.by

*Запеевалов Владимир Евгеньевич* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией гиротронов для термоядерных исследований, Институт прикладной физики Российской академии наук (ул. Ульянова, 46, БОКС-120, 603950, Нижний Новгород, Российская Федерация). E-mail: zapev@appl.sci-nnov.ru

*Зайцева Ирина Евгеньевна* – исследователь, ассистент кафедры вычислительных методов и программирования, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: irina\_zaitseva@list.ru

## Information about the authors

*Stanislaw V. Kolosov* – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Computational Methods and Programming, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kolosov@bsuir.by

*Vladimir E. Zapevalov* – D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Gyrotron Laboratory for Thermonuclear Research, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (46, Ulyanov Str., BOX-120, 603950, Nizhny Novgorod, Russian Federation). E-mail: zapev@appl.sci-nnov.ru

*Irina E. Zaitseva* – Researcher, Assistant of the Department of Computational Methods and Programming, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: irina\_zaitseva@list.ru