

# Gyrotrons with conical resonators

Stanislav V. Kolosov, Mihail P. Batura, Irina V. Zaitseva  
 Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics  
 Minsk, 220600, Brovki str. 6, Belarus  
 kolosov@bsuir.by

**Abstract:** *The report compared by efficiency of three types of resonators gyrotron - ordinary cylindrical, conical and biconical. It is noted that the use of conical cavities significantly increases the efficiency of a gyrotron from 23% to 50%. This is ensured by the fact that the phase bunching of electrons are gradually increasing RF electromagnetic field, and the selection of energy from the electron beam is carried out in a strong and rapidly falling electromagnetic field. All calculations and optimization of gyrotrons conducted using GYRO-K program from the software package CEDR.*

**Keywords:** *gyrotron, irregular waveguide, excitement irregular waveguides, self-consistent problem.*

## Гиротроны с конусообразными резонаторами

Колосов С.В., Батура М.П., Зайцева И.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
 г. Минск, 220600, ул. П.Бровки 6, Беларусь  
 kolosov@bsuir.by

**Аннотация:** *Проведено сравнение по эффективности трех типов резонаторов гиротронов – обычного цилиндрического, конического и биконического. Отмечается, что использование конических резонаторов существенно повышает КПД гиротронов с 23 % до 50 %. Это обеспечивается тем, что фазовая группировка электронов происходит в постепенно нарастающем ВЧ электромагнитном поле, а отбор энергии от электронного потока осуществляется в сильном и быстро спадающем электромагнитном поле. Все расчеты и оптимизация таких гиротронов проводились с использованием программы GYRO-K из программного комплекса КЕДР.*

**Ключевые слова:** *гиротрон, нерегулярные волноводы, возбуждение нерегулярных волноводов, самосогласованная задача.*

### 1. Введение

Как отмечалось ранее [1], для получения высокого КПД гиротрона на основной волне цилиндрического резонатора  $H_{01}$  на первой гармонике

циклотронной частоты фазовая группировка спирализованного электронного потока должна осуществляться в постепенно нарастающем высокочастотном электромагнитном поле, что обеспечивает хорошую плотность фазового сгустка электронов. Отбор энергии от такого сгустка нужно осуществлять в сильном электромагнитном поле на небольшой длине, что бы не позволить электронному сгустку рассыпаться по фазе и по остаточной энергии. Ведь некоторые электроны могут попасть в ускоряющую фазу поля и забрать обратно энергию у электромагнитного поля. В [1] приведены примеры продольного распределения ВЧ электрического поля, однако расчеты проводились по усредненным уравнениям движения электронов и при заданном ВЧ поле. Для получения профиля резонатора по продольному распределению ВЧ поля приходилось решать обратную задачу электродинамики, при этом полученный таким образом профиль не всегда мог быть реализован на практике.

В программе Суго-К [2] используются не усредненные уравнения и решается самосогласованная задача возбуждения резонатора электронным потоком [3]. Это позволяет сразу определять распределение ВЧ электрического поля вдоль резонатора для заданного его профиля.

В данной работе ставилась задача определить насколько окажется более эффективным конический профиль резонатора по сравнению в обычным регулярным профилем.

## 2. Модель регулярного резонатора

В качестве исходного варианта резонатора гиротрона был выбран регулярный профиль резонатора с нормированным радиусом

$$g = \frac{2\pi R}{\lambda_0} = 3.863 \text{ и длиной } l = \frac{2\pi L}{\lambda_0} = 65. \text{ В конце резонатора вводилось}$$

небольшое короткое сужение радиуса волновода для повышения добротности резонатора. Электродинамический расчет показал, что собственная добротность такого резонатора составляет  $Q=6666$ . Оптимизация значений магнитостатического поля и тока электронного потока позволила достичь КПД гиротрона  $\eta=23\%$ , при нормированном значении магнитостатического

$$\text{поля } F(z) = \frac{\mu_0 e H_z^0(z)}{\omega_0} = \frac{1.748 \cdot 10^{11} \cdot B_0 [T]}{2\pi \cdot f_0 [Hz]} = 1.044 \text{ и нормированном}$$

$$\text{значении тока } \sigma = \frac{\eta_0 \mu_0}{c} I_0 = 0.73723 \cdot 10^{-3} I_0 [A] = 0.0000055 \text{ (} I=7.4 \text{ мА),}$$

питч фактор  $q=1.5$ , нормированная начальная скорость электронного по-

тока  $\beta_0 = \frac{v_0}{c} = \sqrt{1 - \frac{1}{(1.957 \cdot 10^{-6} V_0 [v] + 1)^2}} = 0.319$  ( $V=28\text{кВ}$ ). Процесс взаимодействия электронного потока с ВЧ полем резонатора показан на следующем рисунке.

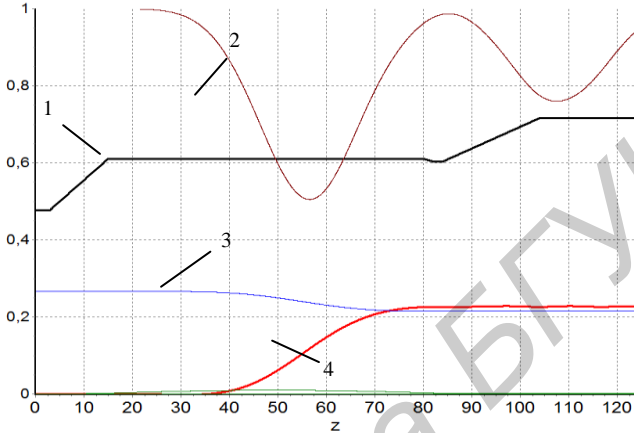


Рис. 1. Интегральные характеристики процесса в гиротроне.  
(кривая 1 – профиль резонатора  $g/2\pi$ , кривая 2 – функция группировки электронов по первой гармонике, кривая 3 – нормированная поперечная усредненная скорость электронов, кривая 4 – КПД).

Fig. 1. Integral characteristics of the process in gyrotron

(Curve 1 -  $g / 2\pi$  cavity profile, curve 2 - function of bunching at the first harmonic, curve 3 - normalized cross-averaged velocity of the electrons, curve 4 - Efficiency).

На следующем рисунке показано продольное сечение распределения электрической составляющей ВЧ электромагнитного поля в резонаторе.

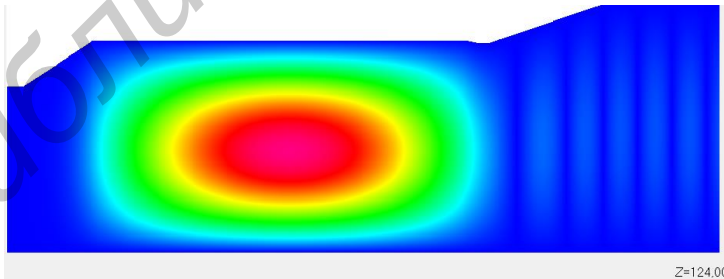


Рис. 2. Продольное сечение распределения электрической составляющей ВЧ электромагнитного поля в резонаторе.

Fig. 2. Longitudinal sectional distribution of the electric component of the RF electromagnetic field in the cavity

Как видно из этого рисунка, распределение ВЧ электрического поля по продольной координате близко к синусоидальному.

### 3. Модель конического резонатора

Профиль конического резонатора определялся от левой границы со значения  $g=3.81$  до значения  $g=3.85$  на правой границе. Длина резонатора та же, что и у регулярного резонатора  $l=65$ .

Собственная добротность такого резонатора равна  $Q=7142$ . Процесс взаимодействия электронного потока с ВЧ полем такого резонатора показан на рисунке 3.

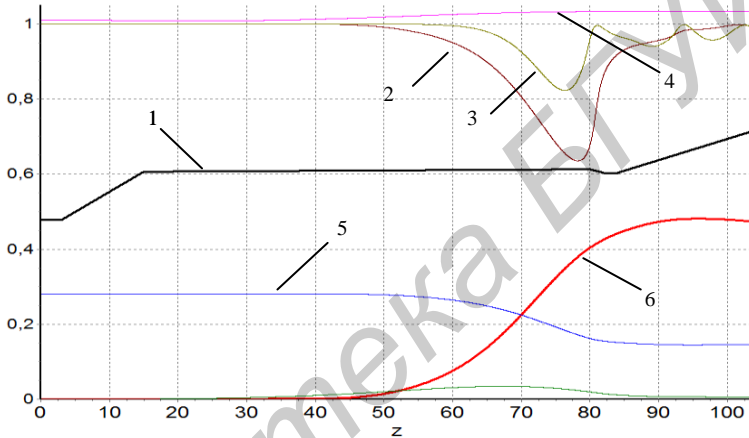


Рис. 3. Интегральные характеристики конического резонатора (кривая 1 – профиль резонатора  $g/2\pi$ , кривая 2 – функция группировки электронов по первой гармонике, кривая 3 – функция группировки по второй гармонике циклотронной частоты, кривая 4 – значение нормированного магнитоэстатического поля, кривая 5 – нормированная поперечная усредненная скорость электронов, кривая 6 – КПД).

Fig. 3. Integral characteristics of the conical cavity (curve 1 -  $g/2\pi$  cavity profile, curve 2 - function of bunching at the first harmonic, curve 3 - function of bunching at the second harmonic of the cyclotron frequency, curve 4 - value of the normalized magnetostatic field, curve 5 - normalized cross-averaged velocity of the electrons, curve 6 - Efficiency)

КПД гиротрона в этом случае достигает уже 50%, но для возбуждения такого гиротрона требуется ток  $\sigma=0.0001587$  или  $I=215$  мА. На следующем рисунке показано продольное сечение распределения электрической составляющей ВЧ электромагнитного поля в резонаторе. Этот рисунок показывает, что максимальное значение ВЧ составляющей электрического поля достигается в конце конического резонатора, что и обеспечивает высокий КПД такого гиротрона.

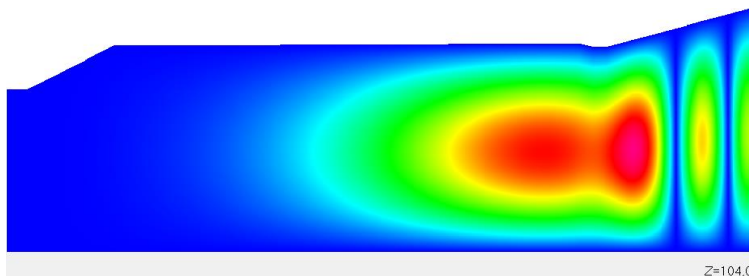


Рис. 4. Продольное сечение распределения электрической составляющей ВЧ электромагнитного поля в коническом резонаторе.

Fig. 4. Longitudinal section of the distribution of the electric component of the RF electromagnetic field in a conical cavity

#### 4. Модель биконического резонатора

Был исследован вариант биконического резонатора гиротрона. Первая секция резонатора представляла собой расширяющийся конус, а вторая секция – сужающийся конус. Процессы, происходящие в таком гиротроне, показаны на рисунках 5 и 6.

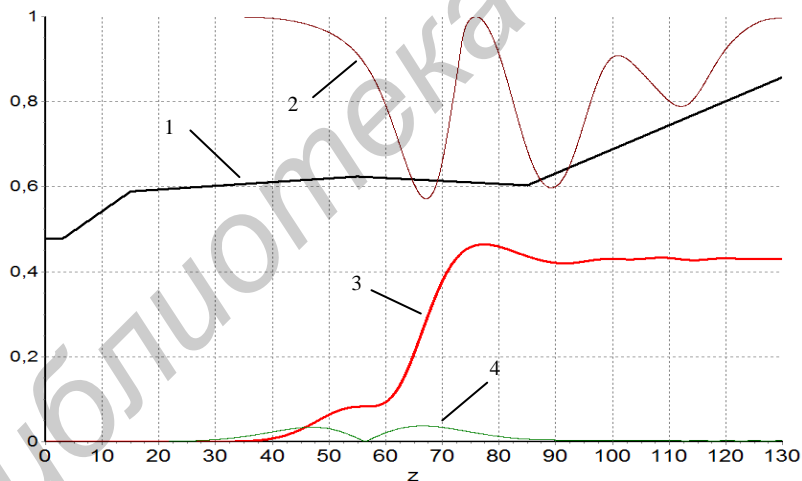


Рис. 5. Интегральные характеристики биконического резонатора (кривая 1 – профиль резонатора, кривая 2 – функция группировки по первой гармонике циклотронной частоты, кривая 3 – КПД, кривая 4 – нормированная напряженность ВЧ электрического поля).

Fig. 5. Integral characteristics of biconical resonator (curve 1 - the cavity profile, curve 2 - function of bunching at the first harmonic of the cyclotron frequency, curve 3 – efficiency, curve 4 - normalized intensity of RF electric field)

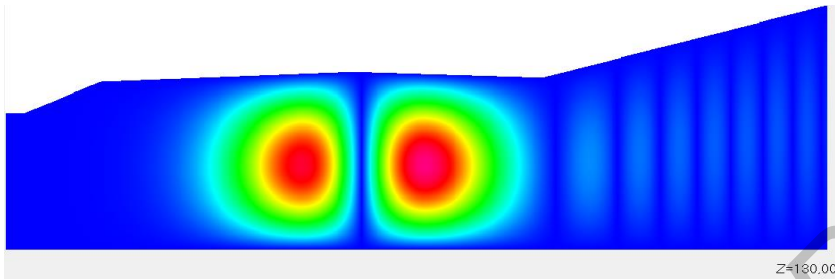


Рис. 6. Продольное сечение распределения электрической составляющей ВЧ электромагнитного поля в биконическом резонаторе.

Fig. 6. Longitudinal section of the distribution of the electric component of the RF electromagnetic field in biconical resonator

Собственная добротность такого резонатора составляет  $Q=4000$ . Рабочий ток равен  $\sigma=0.0000588$  или  $I=79$  мА. Питч фактор  $q=1.84$ . Как видно из этих рисунков в биконическом резонаторе основная мода имеет двугорбую структуру, что напоминает двух каскадный гироклистрон. КПД такого гиротрона достигает 42%, а это гораздо более высокий КПД по сравнению с регулярным резонатором гиротрона, но все же меньше, что КПД гиротрона с коническим резонатором.

## 5. Заключение

Таким образом, в работе исследовано влияние профиля резонатора гиротрона на эффективность его работы. Показано, что конический профиль гиротрона может обеспечить КПД 50%, биконический профиль – 42 %, а это существенно выше КПД гиротрона с регулярным профилем резонатора – 23 %.

## Список литературы

- [1] Кураев А.А., Ковалев И.С., Колосов С.В. Численные методы оптимизации в задачах электроники СВЧ // Изд. «Наука и техника» г.Минск, 1975, 296 с.
- [2] Свидетельство о регистрации компьютерной программы №384. Компьютерный программный комплекс КЕДР / правообладатель БГУИР Авторы: Колосов С.В., Кураев А.А., Синецын А.К., Аксенчик А.В.; заявл.19.01.2012; внесена в реестр Национального центра интеллектуальной собственности БР - 07.02.2012
- [3] Колосов С.В., Кураев А.А., Сенько А.В. Уравнения возбуждения нерегулярных волноводов с конечной проводимостью стенок // Техника и приборы СВЧ, 2009, №2, С. 8-13.

## References

[1] Kuraev A.A., Kovalev I.S., Kolosov S.V. [Numerical methods of optimization problems in the microwave electronics] // Publisher "Science and Technology", Minsk, 1975, 296 p. (In Russian).

[2] Kolosov S.V., Kuraev A.A., Sinitsyn A.K., Aksenchyk A.V. [The certificate of registration of the computer program №384. Computer software package CEDR]. Entered in the register of Belarus National Intellectual Property Center - 07.02.2012. (In Russian).

[3] Kolosov S.V., Kuraev A.A., Senko A.V. [Equations excitation irregular waveguides with finite wall conductance] *Engineering and microwave devices*, 2009, №2, pp. 8-13. (In Russian).

Библиотека БГУИР