

УДК 621.385.6

## СРАВНЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВЫСОКООРБИТНОЙ ГИРО-ЛБВ И ПЕНИОТРОННОГО УСИЛИТЕЛЯ НА $H_{41}$ МОДЕ

С.В. КОЛОСОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 3 октября 2013

Приведены результаты сравнения по КПД, полосе усиления, коэффициенту усиления и начальному угловому разбросу скоростей электронов высокоорбитной giro-ЛБВ и пениотронного усилителя. Показано, что пениотронный усилитель обладает большим КПД и мощностью по сравнению с высокоорбитной giro-ЛБВ, но имеет более узкую полосу усиления.

*Ключевые слова:* высокоорбитный гиротрон, пениотрон.

### Введение

Проблема генерации и усиления электромагнитных колебаний большой мощности на частотах более 200 ГГц остается весьма актуальной задачей в электронике больших мощностей [1]. Дело в том, что эффективность использования гиротронов традиционной конструкции – основных источников высокой мощности в миллиметровом диапазоне – резко понижается в диапазоне субмиллиметровых волн по двум причинам: на первой и даже второй гармониках циклотронной частоты невозможно обеспечить необходимый уровень магнитной индукции магнитного поля, при работе же гиротрона на 3, 4-й и высших гармониках циклотронной частоты КПД резко понижается. На это неоднократно обращалось внимание [2, 3]. Так, если на частотах (100...170) ГГц в квазинепрерывном режиме гиротроны обеспечивают выходную мощность (1,5...2) МВт, то уже на частоте 300 ГГц на гиротроне достигнут уровень выходной мощности 1,75 кВт [4]. Потенциально более перспективным при работе на высоких гармониках представляется пениотрон [5]. Однако непосредственного сравнения эффективности гиротронов и пениотронов на высоких гармониках циклотронной частоты при одинаковых параметрах электронного потока и электродинамической системы не проводилось.

В статье приведены результаты такого сравнения с использованием математической модели, развитой в [6, 7], в которой учтены все значимые факторы: многомодовость ( $E_{1i}$  и  $H_{1i}$  моды), условия согласования на границах области взаимодействия и учет потерь в стенках волновода.

### Результаты расчета giro-ЛБВ

Моделирование процессов в гиротроне и пениотроне осуществлялось с помощью компьютерной программы GYRO-K из программного комплекса «КЕДР» [8].

Поперечное сечение области взаимодействия и распределение модуля электрической напряженности поля для пениотрона и высокоорбитного гиротрона на вращающейся по азимуту  $H_{41}$  моде изображено на рис. 1.

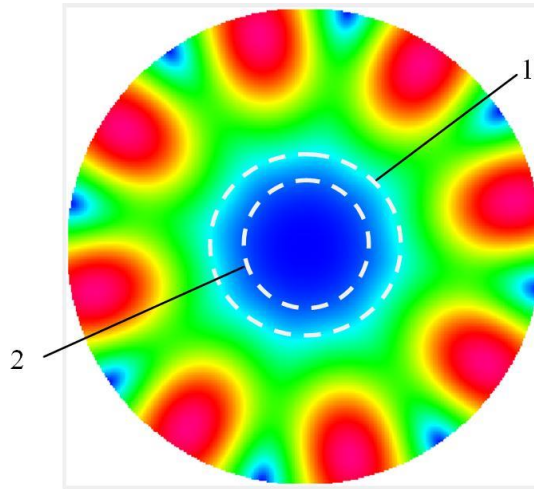


Рис. 1. Распределение модуля напряженности электрического поля в поперечном сечении волновода для моды  $H_{41}$ : 1 – начальные траектории электронов для гиротрона; 2 – траектории электронов для пениотрона

Их конструкции идентичны, различно лишь значение индукции резонансного магнитного поля для азимутального индекса  $n = 4$  электромагнитной волны  $H_{41}$ :

$$- \text{ для гиротрона } B_g^0 \cong \frac{\omega_0 m_0}{4e} \left( 1 - \frac{\beta_0}{\beta_\phi} \right)^{-1} (1 - \beta_0^2)^{-\frac{1}{2}};$$

$$- \text{ для пениотрона } B_p^0 \cong \frac{4}{3} B_g^0.$$

Здесь  $\omega_0$  – опорная угловая частота поля в диапазоне усиления;  $m_0$  – масса покоя электрона;  $e$  – заряд электрона;  $\beta_0 = V_0/c$  – нормированная продольная скорость электронов,  $\beta_\phi$  – продольная фазовая скорость волны  $H_{41}$ ;  $\beta_0$  – полная нормированная скорость электронов.

Как следует из рис. 1, начальный радиус вращения электронов для gyro-LBB больше чем для пениотрона в силу меньшего значения магнитостатического поля, а это значит, что электроны gyro-LBB находятся в более сильном электрическом поле, чем электроны в пениотроне и поэтому для работы gyro-LBB будет требоваться меньший ток, чем для работы пениотрона.

При расчетах были выбраны следующие параметры электронного потока и волновода:

начальная нормированная скорость электронов –  $\beta_0 = 0,5542$ , питч фактор –  $q = \frac{v_\perp}{v_\parallel} = 1,27$ ,

нормированный радиус волновода –  $g = \frac{2\pi b}{\lambda_0} = 5,38$ , нормированная длина волновода –

$$l = \frac{2\pi L}{\lambda_0} = 125,6.$$

Для расчета gyro-LBB значение нормированного магнитостатического поля составляло  $F(z) = \frac{\mu_0 e H_z^0(z)}{\omega_0} = \frac{1,748 \cdot 10^{11} \cdot B_0 [T]}{2\pi \cdot f_0 [Hz]} = 0,2783$ , что почти в 4 раза меньше циклотронного

значения. Для недопущения попадания на вход gyro-LBB возбуждаемой в выходной секции встречной волны по середине волновода была помещена волноводная вставка с поглощающим покрытием с удельным сопротивлением  $1092$  [мкОм·см] длиной  $25$  [рад].

Оптимизация gyro-LBB по рабочему току, магнитостатическому полю и радиусу волновода позволила достигнуть КПД = 19 %, что для четвертой гармоники циклотронной частоты является очень хорошим результатом, с учетом того, что на первой гармонике достигается КПД порядка 45 % для тех же параметров электронного потока. На рис. 2 изображены интегральные характеристики полученного варианта gyro-LBB.

На рис. 2 штриховкой отмечен участок волновода с поглощающим электромагнитную энергию покрытием. Кривые 5 и 6 показывают, что часть энергии, которую отдает электронный поток волне  $H_{41}$ , теряется (около 2%), т.к. одновременно с возбуждением попутной волны возбуждается и встречная волна, которая затем поглощается в волноводной вставке.

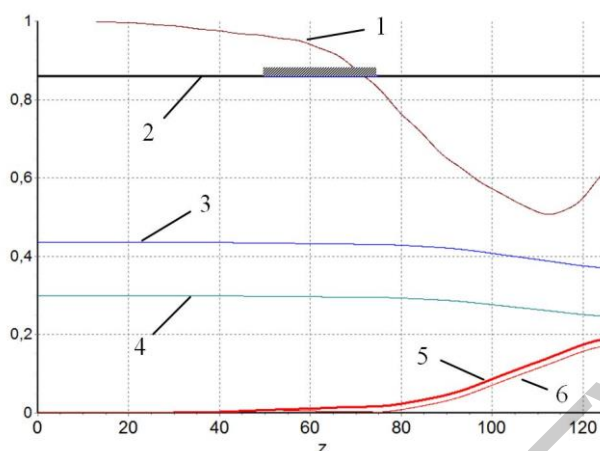


Рис. 2. Интегральные характеристики гиро-ЛБВ:

1 – функция фазовой группировки электронов; 2 – радиус волновода  $b/\lambda$ , 3 – нормированная поперечная скорость электронов; 4 – нормированный средний радиус вращения электронов; 5 – электронный КПД; 6 – волновой КПД

Оптимизированные параметры приняли следующие значения: нормированное значение электронного тока –  $\sigma = \frac{\eta_0 \mu_0}{c} I_0 = 0,73723 \cdot 10^{-3} I_0 [A] = 0,04$ , что соответствует току  $I = 54 [A]$ , радиус волновода –  $g = 5,4082$ , магнитостатическое поле –  $F = 0,27828$ , коэффициент усиления  $K_{yc} = 30\text{дБ}$ .

На рис. 3 приведены фазовые траектории электронов.

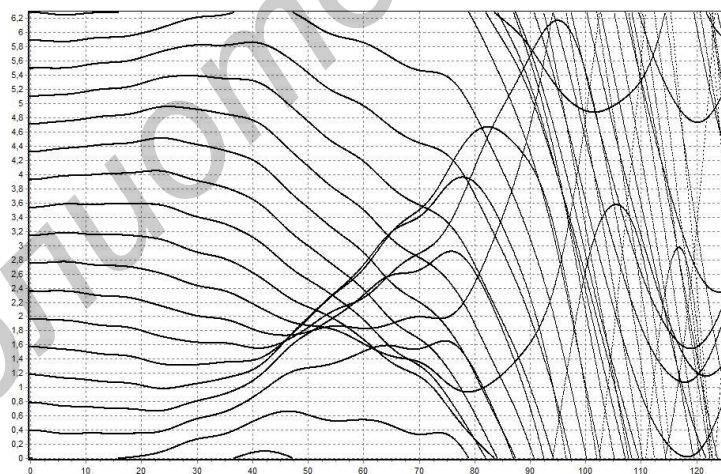


Рис. 3. Фазовые траектории электронов гиро-ЛБВ

Фазовые траектории показывают, как формируется фазовый сгусток электронов, который затем отдает энергию волне и разгруппировывается.

На рис. 4 приведены частотные характеристики гиро-ЛБВ. Из него следует, что полоса усиления гиро-ЛБВ составляет около 3,5% и волновой КПД (КПД-в) немного меньше электронного КПД (КПД-э), т.к. возбуждаемая встречная волна поглощается в средней вставке волновода. Расчеты гиро-ЛБВ с разбросом питч-фактора  $\Delta q/q=0,5$  показали, что КПД при этом снижается до значения 11 %.

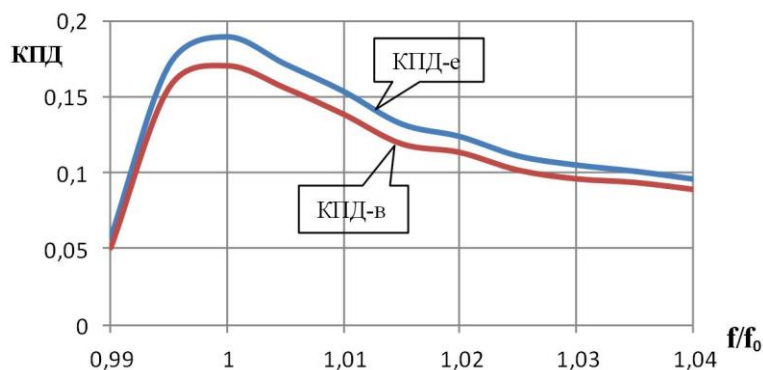


Рис. 4. Частотные характеристики гиро-ЛБВ

### Результаты расчета пениотронного усилителя

Значение нормированного магнитоэстатического поля для пениотрона ( $F$ ) будет приближено к 0,36. Расчеты пениотрона показали, что КПД усилителя может достигать 49 % (рис. 5), причем встречная волна почти не возбуждается электронным потоком. Поэтому наблюдается совпадение волнового и электронного КПД. Однако, в силу уменьшения коэффициента связи электронного потока с электромагнитной волной в пениотроне по сравнению с высокоорбитной гиро-ЛБВ за счет меньшего радиуса вращения электронов, такой результат достигается при большем токе электронного потока и уменьшенном коэффициенте усиления.

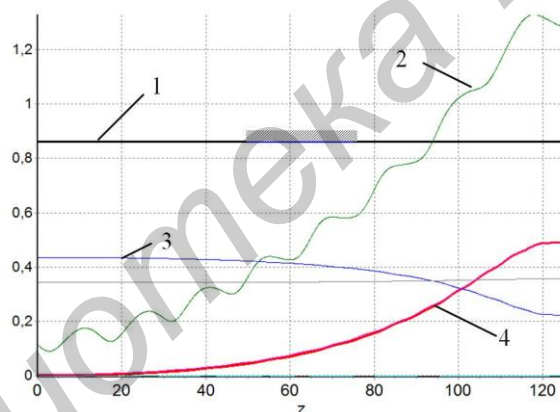


Рис. 5. Интегральные характеристики пениотрона: 1 – радиус волновода  $b/\lambda$ ; 2 – нормированная амплитуда волны  $N_{41}$ ; 3 – нормированная поперечная скорость электронов; 4 – электронный и волновой КПД

В результате оптимизации были получены следующие значения поисковых параметров:  $F = 0,36048$ ,  $g = 5,4122$ ,  $\sigma = 0,3431$ ,  $K_{yc} = 27$  дБ.

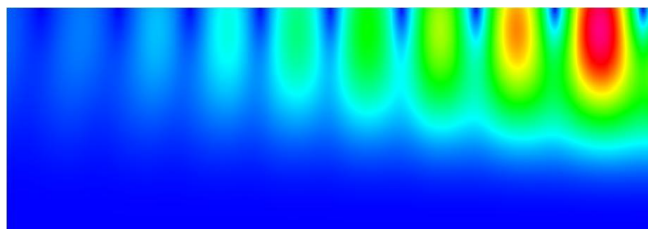


Рис. 6. Распределение модуля напряженности электрического поля в продольном сечении волновода пениотрона

На рис. 6 видно, как возрастает напряженность электрического поля возбуждаемой волны по длине лампы и как она прижата ко внутренней поверхности волновода.

Полоса усиления пениотрона составила 1,5 % (рис. 7), но максимальный КПД достигает 49 %. Расчеты влияния углового скоростного разброса электронов показали, что для  $\Delta q/q = 0,5$  КПД пениотрона снижается до 16 % (рис. 8).

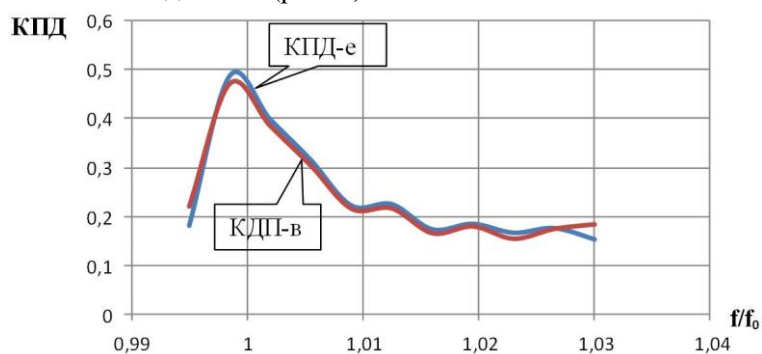


Рис. 7. Частотные характеристики пениотронного усилителя

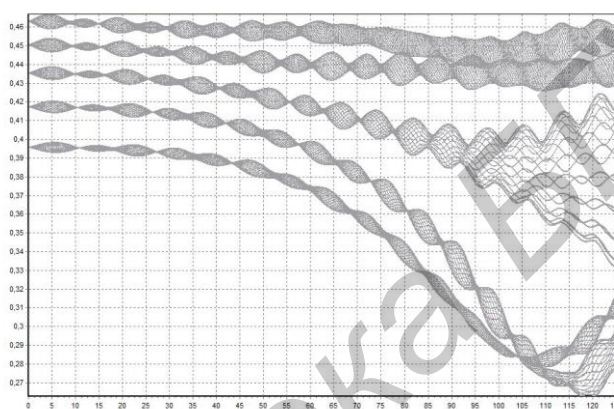


Рис. 8. Распределения нормированных поперечных скоростей электронов по длине прибора для 5-компонентной модели разброса питч-фактора  $q$

Расчеты показали, что даже такой большой угловой скоростной разброс электронов в пучке не приводит к резкому уменьшению КПД, что говорит об устойчивости работы пениотрона по отношению к изменению параметров электронной пушки.

### Заключение

Сравнение результатов расчетов высокоорбитной гиро-ЛБВ и пениотронного усилителя при одной и той же их конструкции показало, что:

- для работы гиро-ЛБВ требуется меньший ток электронного потока (в 8 раз по сравнению с пениотроном) и она обеспечивает коэффициент усиления на 3 дБ выше, чем пениотронный усилитель;
- полоса усиления у гиро-ЛБВ составляет 3,5 %, в отличие от пениотронного усилителя с полосой усиления 1,5 %;
- максимальный электронный КПД пениотронного усилителя достигает 49 %, а КПД высокоорбитной гиро-ЛБВ только 19 %.

Оба варианта усилителей оказались устойчивы к начальному угловому разбросу скоростей электронов. Можно сделать вывод, что высокоорбитная гиро-ЛБВ может применяться в качестве усилителя при выходной мощности порядка 6 МВт, а усилительный пениотрон будет обладать мощностью в 8 раз большей, чем высокоорбитная гиро-ЛБВ. Однако КПД пениотронного усилителя в 2,5 раз больше, чем у высокоорбитной гиро-ЛБВ.

# COMPARISON OF OPPORTUNITIES OF LARGE-ORBIT GYRO-TWT AND PENIOTRON ON MODE $H_{41}$

S.V. KOLOSOV

## Abstract

The results of the comparison in terms of efficiency, the band gain, the gain and the initial angular spread of the electron velocities for large-orbit gyro-TWT and peniotron amplifier are given. It is shown that the peniotron amplifier has a higher efficiency and power compared with large-orbit gyro-TWT, but has a narrower band of amplification.

## Список литературы

1. *Rosker M. J., Wallace H. B.* // IVEC 2008. P. 5–7.
2. *Братман В.Л.* // Тез. лекц. и докл. Саратовской школы по радиофизике и электронике СВЧ. Саратов, 2009.
3. *Глявин М.Ю., Лучинин А.Г., Мануилов В.Н. и др.* // Тезисы лекц. и докл. Саратовской школы по радиофизике и электронике СВЧ. Саратов, 2009.
4. *Zarevalov V. E., Saito T., Nakano T. et al.* // IVEC 2007. P. 345–346.
5. *Кураев А. А.* // Радиотехника и электроника. 1990. Т. 35, № 6. С. 1278–1283.
6. *Колосов С. В., Кураев А. А.* // ЭВиЭС. 1998. Т. 3, № 4. С. 35–44.
7. *Колосов С.В., Кураев А.А., Сенько А.В.* // Техника и приборы СВЧ. 2009. № 2. С. 8–13.
8. *Колосов С.В., Кураев А.А., Сеницын А.К., Аксенчик А.В.* Компьютерный программный комплекс «КЕДР» (CEDR) / Свидетельство о регистрации компьютерной программы № 389.