

УДК 621.385.6

С. В. КОЛОСОВ

## ГИРОКЛИСТРОН – УМНОЖИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники*

*(Поступила в редакцию 30.01.2014)*

**Введение.** Принципы применения излучения на высоких циклотронных гармониках для повышения рабочей частоты изложены в [1–7]. Хорошо известно, что при работе гиротрона даже на основной циклотронной гармонике в спектре его излучения помимо рабочей частоты присутствуют также и составляющие на кратных частотах (подобный эффект имеет место и в других СВЧ-генераторах). Это связано с тем, что электронный пучок является нелинейной средой, которая возбуждает волны не только на рабочей частоте, но и на ее гармониках. Умножитель частоты, основанный на данном эффекте, использует относительно низкочастотный сигнал для организации группировки и последующего высокочастотного излучения на одной из высоких циклотронных гармоник. При этом низкочастотный сигнал может либо поступать в прибор из внешнего источника, либо самовозбуждаться. Очевидно, что такой подход позволяет существенно снизить рабочий ток системы вплоть до очень низких значений в первом случае и до стартового тока низкочастотных колебаний во втором случае. Кроме того, поскольку пространственно-временная структура высокочастотной волны в таком приборе определяется сгруппированным пучком, в значительной мере решается проблема селективности генерации и стабильности частоты.

Следует отметить, что в гироумножителе недостаточно иметь электродинамическую систему, обладающую резонансными свойствами на гармонике низкой частоты, также необходимо, чтобы пространственная структура высокочастотной моды соответствовала пространственной структуре сгруппированного пучка. Эта проблема усугубляется еще и тем, что в случае слаборелятивистской энергии электронов их связь с электромагнитным полем на высоких гармониках является очень слабой и чтобы повысить при этом мощность излучения, приходится использовать высокочастотные электродинамические системы, что приводит к сужению полосы усиления проектируемого прибора.

**Краткое описание используемых математических моделей.** Подробное описание математической модели, используемой в программе *Гуго\_KL*, дано в [8, 9]. Основные принципы построения данной модели приведены ниже.

Расчет фазовых траекторий электронов в гироклистронах проводится на основе метода «крупных» частиц. Их движение разделяется на дрейфовое и орбитальное следующим образом:

$$\dot{r} = r e^{j\Phi} = \dot{r}_0 + \dot{\alpha} = r_0 e^{j\epsilon} + a e^{j\Phi} + O(e^{j2\Phi}). \quad (1)$$

Фазу орбитального движения  $\Phi$  будем рассматривать как сумму  $T + \alpha$ , где  $T = \omega t$  – временная фаза,  $\alpha$  – медленно изменяющееся во времени приращение фазы.

Разделение движения электрона на дрейфовое и орбитальное приводит к увеличению числа уравнений в два раза. Однако оно позволяет провести усреднение уравнений по времени, исключить в правой части уравнений быстроосциллирующие члены и, как следствие, существенно уменьшить численные ошибки при интегрировании дифференциальных уравнений движения электрона.

В программе дрейф ведущего центра не учитывается, так как его учет для гирорезонансных приборов не приводит к заметному влиянию на результаты расчетов. Дрейф следует учитывать

только при расчете высокоорбитных пениотронов, где его влияние является определяющим, а данная программа для этого не предназначена.

В программе Gyro\_KL запись уравнений движения электронов проводится в переменных:

$$\beta_x + j\beta_y = \frac{v_x}{c} + j\frac{v_y}{c} = \hat{\gamma}e^{j\Phi} = \hat{\gamma}e^{j(T+\alpha)}, \quad (2)$$

также предусмотрен учет начального углового разброса скоростей электронов по многокомпонентной модели.

Для резонаторов получены уравнения возбуждения регулярных резонаторов, т. е. когда радиус резонатора постоянный и с двух сторон ограничен проводящими стенками. Параметры резонатора задаются его нагруженной добротностью, отстройкой резонансной частоты от опорной частоты (средней в диапазоне усиления), длиной резонатора и радиальным, фазовым и продольным индексами возбуждаемого в резонаторе типа колебания. Согласование заданного и расчетного полей в резонаторе может осуществляться или улучшенным методом последовательных приближений, или методом Стефенсона. В программе не учитывается провисание полей в трубки дрейфа.

Учет влияния полей пространственного заряда основан на выделении квазистатического поля отдельного цилиндра. Электронный поток представляется набором таких цилиндров. В программе учитывается только поперечное влияние полей пространственного заряда.

Для гироклистронов с высоким коэффициентом усиления первые каскады можно рассчитывать по аналитической модели, построение которой проведено на основе нелинейной модели. В случае многослойного электронного потока каждый слой может иметь свое отношение начальных поперечных и продольных скоростей, но при этом полная энергия электронов сохраняется. В линейном приближении будем считать, что за счет действия ВЧ-электромагнитных полей происходят только незначительные отклонения электронных траекторий от невозмущенных траекторий. Поэтому входящие в уравнения движения электронов фазовые переменные можно представить для  $s$ -го слоя и  $i$ -й траектории следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{is} &= \beta_{\perp s} + \rho_{is}, \\ \alpha_{is} &= \alpha_{0is} + \beta_{is}, \\ w_{is} &= \beta_{\parallel s} + \tilde{w}_{is}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $\rho_{is}$ ,  $\beta_{is}$ ,  $\tilde{w}_{is}$  – малые и медленно изменяющиеся по длине величины.

В программе использованы линеаризованные уравнения возбуждения резонаторов и линеаризованные формулы для учета полей пространственного заряда, но только для первой гармоники рабочей частоты. Она позволяет проводить поиск оптимальной конструкции гироклистрона или гиротристора с использованием программы оптимизации Opti-K, в основу которой заложены методы оптимизации с переменной метрикой.

**Расчет трехкаскадного гироклистрона – множителя частоты.** В качестве прототипа выбран вариант трехкаскадного гироклистрона, опубликованный в [10].

Первый каскад работает на моде  $H_{01}$  и на первой гармонике циклотронной частоты  $f = 47,5$  ГГц. Два последующих каскада работают на моде  $H_{02}$  и второй гармонике гирочастоты  $f = 95$  ГГц. Ускоряющее напряжение электронного потока  $V_0 = 500$  кВ, ток  $I_0 = 45$  А, питч-фактор = 1,5, радиус ведущего центра вращения электронов в радианах  $r_{vc} = 2\pi R_{vc} / \lambda_0 = 1,7$ . Остальные параметры для трех каскадов приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Параметры резонаторов для прототипа гироклистрона

№ п.п.	Холодная нагруженная добротность	Собственная холодная добротность	Отстройка частоты	Длина трубки дрейфа	Длина резонатора	Радиус трубки дрейфа
1	600	2000	0	24,87	3,98	2,83
2	1032	4000	0,0006398	20,79	18,29	2,83
3	740	4000	0,000026	–	10,86	–

Все длины, как параметр  $r_{vc}$ , даны в безразмерном виде в радианах. В результате расчетов данного варианта гироклистрона получен полный КПД 31% при коэффициенте усиления 50 дБ. В [10] расчетный КПД равнялся 33%, что говорит о хорошем совпадении расчетных значений КПД, рассчитанных по разным программам.

Предпринята попытка улучшения данного результата путем поиска оптимальных значений ускоряющего напряжения, тока, добротностей и отстроек резонаторов. Достигнут КПД 45% при напряжении  $V_0 = 126,5$  кВ, токе  $I_0 = 29,5$  А и остальных параметрах, приведенных в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Параметры резонаторов для оптимизированного варианта гироклистрона

№ п.п.	Холодная нагруженная добротность	Собственная холодная добротность	Отстройка частоты	Длина трубки дрейфа	Длина резонатора	Радиус трубки дрейфа
1	600	2000	0	22,6	3,98	2,83
2	1136	4000	0,00156	17,5	12,87	2,83
3	990	4000	-0,0001977	-	10,98	-

Интегральные характеристики гироклистрона приведены на рис. 1, где

$$F_1 = 1 - \left\{ \left[ \sum_{s=1}^{NS} G_s \left( \frac{1}{NE} \sum_{i=1}^{NE} \cos \alpha_{is} \right) \right]^2 + \left[ \sum_{s=1}^{NS} G_s \left( \frac{1}{NE} \sum_{i=1}^{NE} \sin \alpha_{is} \right) \right]^2 \right\},$$

$$F_2 = 1 - \left\{ \left[ 2 \sum_{s=1}^{NS} G_s \left( \frac{1}{NE} \sum_{i=1}^{NE} \sin \alpha_{is} \cos \alpha_{is} \right) \right]^2 + \left[ \sum_{s=1}^{NS} G_s \left( \sum_{i=1}^{NE} (\cos^2 \alpha_{is} - \sin \alpha_{is}) \right) \right]^2 \right\}, C = \frac{\eta_0 \dot{E}_m}{\omega_0 c}.$$

На рисунке видно, как нарастает амплитуда рабочей моды от первого (кривая б) до последнего каскада и в последнем резонаторе электронный поток отдает свою поперечную энергию электромагнитному полю, но при этом значение продольной скорости электронов несколько возрастает (кривые 2, 3).

На рис. 2 показано, как образуются два фазовых сгустка электронов на входе в последний резонатор, что и обеспечивает эффективный отбор энергии у электронов на второй гармонике гирочастоты.

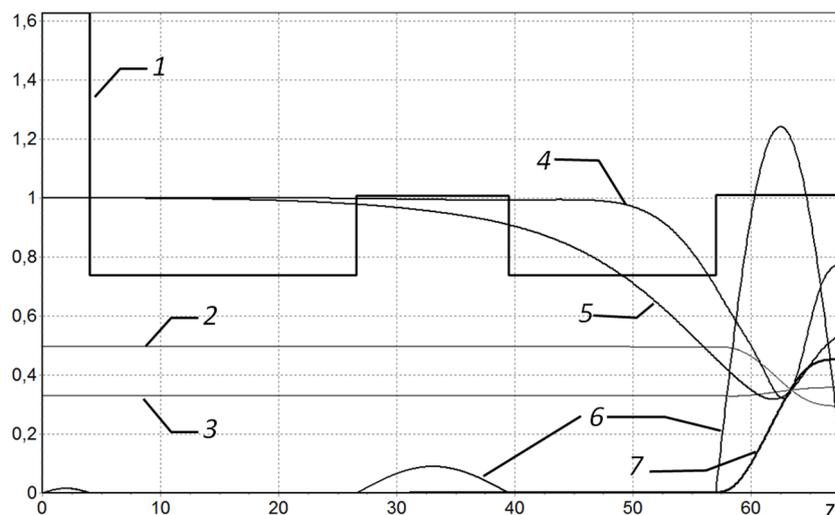


Рис. 1. Интегральные характеристики гироклистрона: 1 – радиус волновода, 2 – усредненная поперечная нормированная к скорости света скорость электронов, 3 – усредненная продольная скорость электронов, 4 – функция поперечной группировки электронов по второй гармонике  $F_2$ , 5 – функция поперечной группировки электронов по первой гармонике  $F_1$ , 6 – нормированная амплитуда волны в резонаторе, 7 – КПД

Для расчетов взята трехкомпонентная модель электронного потока, учитывающая начальный угловой разброс скоростей электронов с весовыми коэффициентами:  $G_1 = 0,25$ ,  $G_2 = 0,5$ ,  $G_3 = 0,25$ . Относительная ширина разброса по поперечным скоростям в данном варианте гироклистрона равна  $\Delta\beta_{\perp} / \beta_{\perp} = 0,047$  (4,7%) (рис. 3). Расчеты показали, что угловой скоростной разброс электронов в трехкаскадном гироклистроне – множителе частоты незначительно влияет на получение высокого КПД.

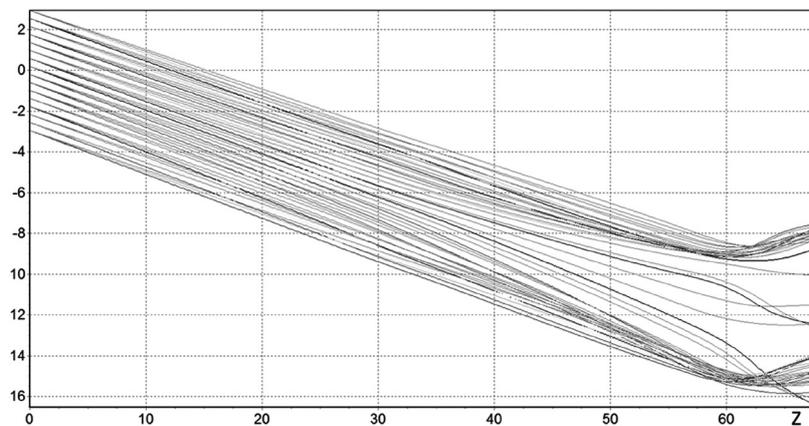


Рис. 2. Фазовые траектории электронов

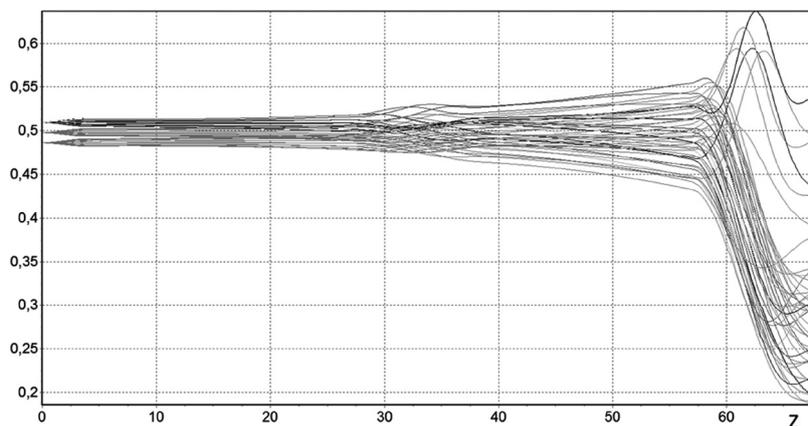


Рис. 3. Поперечные нормированные скорости электронов

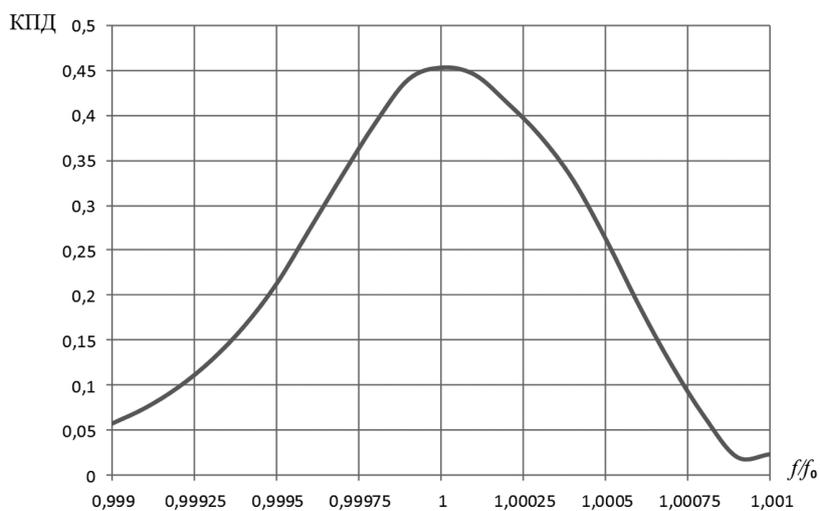


Рис. 4. Частотная характеристика гироклистрона

Исследована частотная характеристика такого прибора, показанная на рис. 4. Из рисунка следует, что полоса усиления прибора составляет  $\Delta f/f_0 \sim 0,001$ . Практически это соответствует полосе пропускания последнего резонатора гироклистрона с  $Q_3 = 990$  (табл. 2) –  $\Delta f/f_0 = 1/Q_3 = 0,00101$ .

Необходимо отметить, что данный вариант гироклистрона – умножителя частоты обладает достаточно высоким КПД. Не каждый гироклистрон, работающий на первой гармонике гирочастоты, обладает таким КПД [11].

**Заключение.** Проведенные оптимизационные расчеты трехкаскадного гироклистрона – умножителя частоты показали, что при выходной частоте гироклистрона 95 ГГц, напряжении пучка 126,5 кВ, токе 29,5 А, правильном выборе добротностей резонаторов, их отстроек от рабочей частоты, длин резонаторов и трубок дрейфа можно добиться КПД прибора 45% при коэффициенте усиления 40 дБ и полосе усиления 95 МГц.

Для расширения полосы усиления можно вместо последнего резонатора использовать волноводную секцию, которая не обладает высокой добротностью и поэтому можно ожидать существенного расширения данной полосы, но при этом возможно увеличение значений тока электронного потока и длины гиротристора.

## Литература

1. Flyagin V. A., Gaponov A. V., Petelin M. I., Yulpatov V. K. // IEEE Trans. MTT. 1977. Vol. MTT-25, N 6. P. 514–521.
2. Rodgers J., Guo H., Granatstein V. L. et al. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1999. Vol. 27, issue 2. P. 412–412.
3. Nusinovich G. S., Dumbrajs O. // Phys. of Plasmas. 1995. Vol. 2. P. 568–577.
4. Nusinovich G. S., Levush B., Dumbrajs O. // Phys. of Plasmas. 1996. Vol. 3, issue 8. P. 3133–3144.
5. Walter M. T., Nusinovich G. S., Lawson W. G. et al. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2000. Vol. 28. P. 688–694.
6. Chu K. R., Guo H., Granatstein V. L. // Phys. Rev. Lett. 1997. Vol. 78. P. 4661–4664.
7. Kolosov S. V., Kurayev A. A. // Electron Device Letters. IEEE. 1997. Vol. 18, issue 6. P. 254–257.
8. Колосов С. В., Кураев А. А., Сенько А. В. // Техника и приборы СВЧ. 2009. № 2. С. 8–13.
9. Свидетельство о регистрации компьютерной программы № 389. Компьютерный программный комплекс КЕДР, правообладатель – БГУИР, авторы – Колосов С. В., Кураев А. А., Сеницын А. К., Аксенчик А. В., дата внесения записи в Реестр зарегистрированных компьютерных программ в национальном центре интеллектуальной собственности РБ – 07.02.2012.
10. Arjona M. R. and Lawson W. // 11<sup>th</sup> European Particle Accelerator Conference (EPAC98). Italy, 2008. P. 1787–1789.
11. Батура М. П., Кураев А. А., Сеницын А. К., Основы теории, расчета и оптимизации современных электронных приборов СВЧ. Мн., 2007.

S. V. KOLOSOV

## GYROKLYSTRON – FREQUENCY MULTIPLIERS

### Summary

The results of a three-stage gyrokylystron – frequency doubler are shown. It is shown that at an gyrokylystron output frequency 95 GGz, beam voltage 126.5 kV, current 29.5 A and the correct choice of the resonator  $Q$ , their offsets from the operating frequency and the resonator lengths and drift tubes can achieve 45% efficiency of the device at a gain of 40 dB and amplification band 95 MHz.