

13

Перестраиваемый магнитным полем генератор отражательного типа на гиролампе бегущей волны

© А.А. Кураев¹, А.А. Короновский^{2,3}, С.В. Колосов¹,
А.О. Рак¹, А.Е. Храмов^{2,3}

¹ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

² Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., Саратов, Россия,

³ Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

E-mail: hramovae@gmail.com

Поступило в Редакцию 26 июня 2014 г.

Показана возможность достижения полосы перестройки генератора отражательного типа на гиролампе бегущей волны (гино-ЛБВ) с помощью магнитостатического поля в пределах 6–7% с использованием четырехзвенного фильтра при типичных для гиро-ЛБВ значениях электронного КПД порядка 30%.

Обычный гиротрон из-за трудности или невозможности перестройки волноводного резонатора не может использоваться как перестраиваемый по частоте магнитным полем генератор. Такая возможность существует в гиролампе бегущей волны (гино-ЛБВ), где резонансная система отсутствует. Однако эффективность взаимодействия электронного потока с встречной волной невысока из-за неоптимального распределения поля вдоль рабочей области [1]. В гиро-ЛБВ, наоборот, распределение поля близко к оптимальному (амплитуда поля возрастает к концу области взаимодействия), что принципиально обеспечивает выигрыш в КПД взаимодействия [2].

Генератор на гиро-ЛБВ может быть реализован за счет отраженной от входа области взаимодействия встречной волны, возбуждаемой в конце области взаимодействия. Эта волна и образует положительную обратную связь в генераторе отражательного типа. Отражения могут быть реализованы с использованием многозвенного катодного фильтра,

имеющего достаточно широкую полосу заграждения. В этой полосе возможна перестройка гиро-ЛБВ отражательного типа за счет изменения индукции магнитостатического поля B_0 (т. е. циклотронной частоты электронов).

В работе поставлена задача анализа и оптимизации гиро-ЛБВ с четырехзвенным фильтром. Для расчета гиро-ЛБВ использовалась программа Гуго-К из комплекса КЕДР (CEDR) [3,4]. Основу математической модели подсистемы Гуго-К составляет метод преобразования координат, который заменяет решение проблемы возбуждения нерегулярного волновода задачей возбуждения регулярного волновода единичного радиуса с изменяемой метрикой пространства [5]. Этот метод позволяет свести трехмерную задачу к одномерной, что существенно сокращает время расчетов по сравнению с такими пакетами программ, как CST Particle Studio [6], Karat [7] и другие, где используются сеточные методы для решения краевых задач электродинамики.

В расчетах приняты следующие параметры электронного потока: $\beta_0 = v/c = 0.436$; $\sigma = \frac{\eta_0 I_0}{c} = I_0 \cdot 0.737 \cdot 10^{-3}$ — безразмерный токовый параметр, I_0 [A]; пинч-фактор $q = V_{\perp}/V_z = 0.96$; магнитостатическое поле считается постоянным (однородным) вдоль оси z

$$F(z) = \frac{eB_z^0(z)}{m\omega_0} = \frac{\omega_n}{\omega_0} = \frac{1.748 \cdot 10^{11} B_0 [T]}{2\pi f_0 [\text{Hz}]} = \text{const} = 0.996, \quad \omega_n = \frac{eB_0}{m};$$

радиус ведущего центра

$$r_{lc} = \frac{2\pi R_{lc}}{\lambda} = 1.85;$$

длина прибора

$$z = \frac{2\pi L}{\lambda} = 128 \text{ rad.}$$

Интегральные характеристики (суммарные по периоду $T_0 = 2\pi/\omega_0$ характеристики ансамбля N крупных частиц) оптимального варианта такого гиро-ЛБВ приведены на рис. 1, а. КПД гиротрона составляет 33%, поскольку электронный поток имеет пинч-фактор $q < 1$, возможна его рекуперация на коллекторе, которая может повысить общий КПД

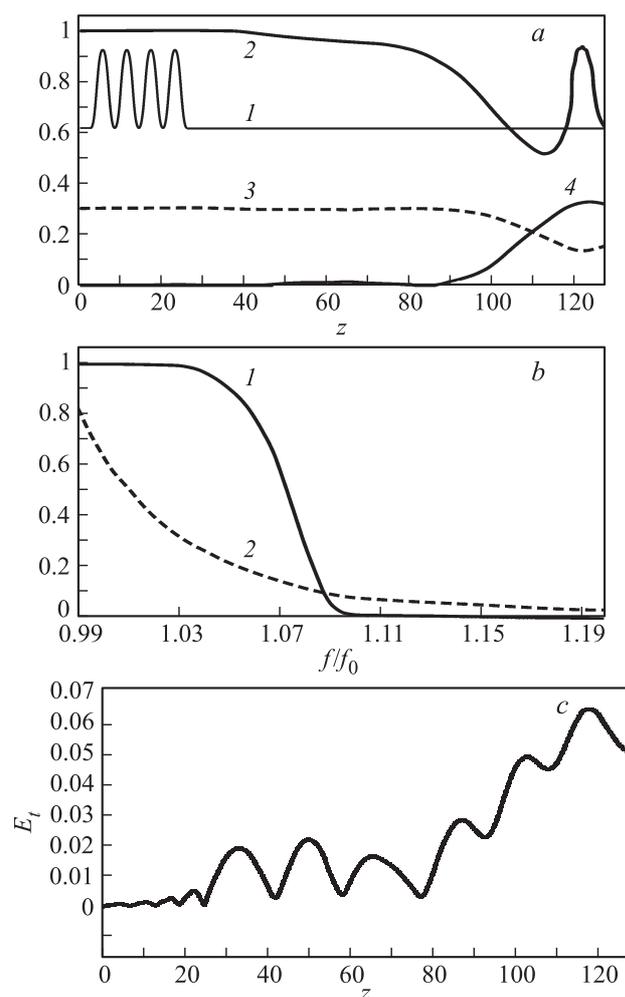


Рис. 1. *a* — интегральные характеристики исследуемой конструкции giro-ЛБВ, где 1 — R_w/λ (R_w — радиус волновода, λ — длина волны), 2 — F_1 , 3 — β_{\perp} , (средняя поперечная скорость электронов в потоке), 4 — КПД генератора. *b* — частотные характеристики фильтров по отраженной мощности волны H_{01} , где 1 — четырехзвенный фильтр, 2 — однозвенный фильтр. *c* — распределение нормированной результирующей амплитуды электрической напряженности E_t поля волны H_{01} в giro-ЛБВ.

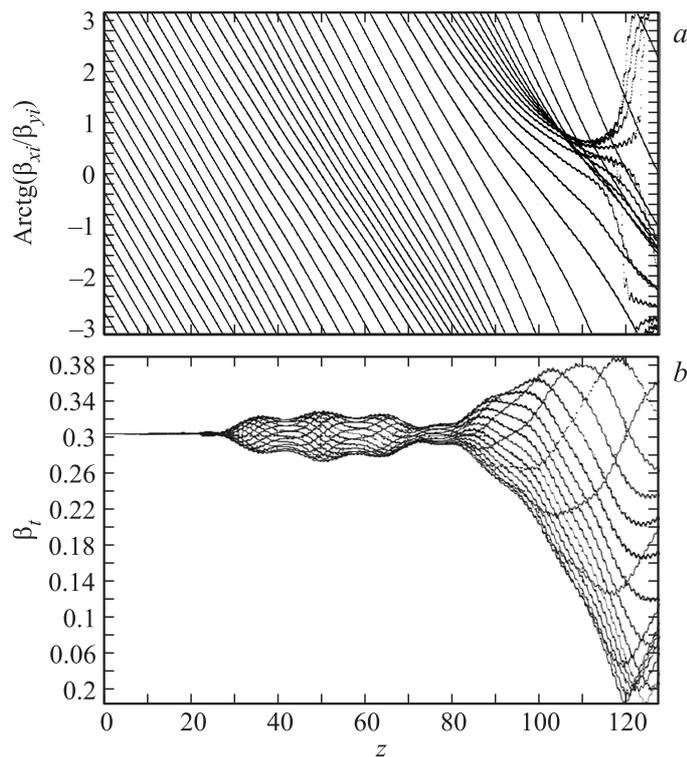


Рис. 2. Фазовые траектории (а) и распределения поперечных скоростей (б) электронов в ходе поперечной группировки в гиро-ЛБВ.

прибора до 80%. Здесь

$$F_1 = 1 - \left[\left(\sum_{i=1}^{N_e} \sin(-\arctg(\beta_{xi}/\beta_{yi}) - t_i) \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{N_e} \cos(-\arctg(\beta_{xi}/\beta_{yi}) - t_i) \right)^2 \right]$$

— функция глубины фазовой поперечной группировки электронного потока по первой гармонике циклотронной частоты.

В начале волновода располагается четырехзвенный фильтр, который обладает коэффициентом отражения 0.998.

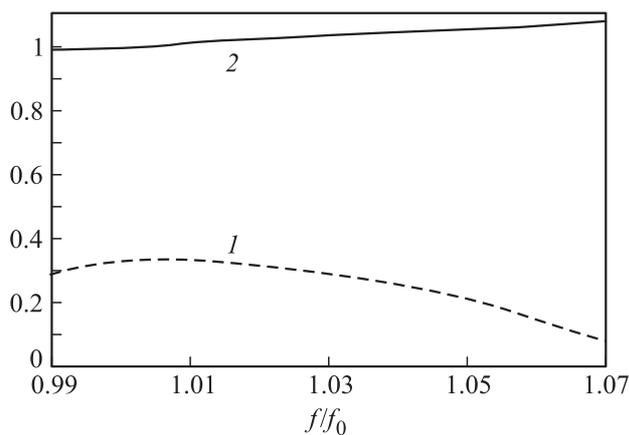


Рис. 3. КПД гирогенератора (кривая 1) и значение нормированного магнитостатического поля F (кривая 2) в зависимости от относительной частоты f/f_0 .

Полосовые свойства этого фильтра показаны на рис. 1, *b*. Этот рисунок показывает, что можно перестраивать рабочую частоту рассматриваемого гироприбора магнитостатическим полем в пределах 6–7%.

На рис. 1, *c* показано распределение результирующей амплитуды электрической напряженности суперпозиции учитываемых в расчете волн. В расчете учитывались 8 типов волн от H_{01} до H_{08} . Это распределение близко к оптимальному для гирорезонансного взаимодействия [2].

Из анализа рис. 1, *c* следует, что после отражающей секции поле H_{01} имеет вид стоячей волны, т. е. на отражающий фильтр приходит встречная волна, которая от него отражается, что и создает характерную картину стоячего поля. На выходе же из рабочей области преобладает бегущая вправо волна.

На рис. 2, *a* изображены фазовые траектории электронов, поясняющие процессы поперечной группировки в рассматриваемом варианте, на рис. 2, *b* — соответствующие распределения поперечных скоростей электронов.

На рис. 3 приведены перестроечные характеристики генератора на гиро-ЛБВ, а именно КПД и значение нормированного магнитостатического поля F в зависимости от относительной частоты f/f_0 .

Таким образом, в работе показано, что можно создавать перестраиваемые по частоте gyro-ЛБВ-генераторы в полосе 6–7% с отражательными фильтрами на волне H_{01} с максимальным электронным КПД 30% и полным КПД $\sim 80\%$.

Работа поддержана грантом РФФИ (проект 12-02-33071), Президентской программой поддержки молодых докторов наук (проект МД-345.2013.2) и Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках реализации государственного задания в сфере научной деятельности.

Список литературы

- [1] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. М.: Физматлит, 2004. С. 67–68.
- [2] Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. Т. 1. Стационарные процессы / Под ред. А.А. Кураева и Д.И. Трубецкого. М.: Физматлит, 2009. С. 58–59.
- [3] Kolosov S.V., Kurayev A.A., Senko A.V. // Proc. of IVEC-2010. P. 115–116.
- [4] 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.
- [5] Колосов С.В., Кураев А.А., Сенько А.В. // Техника и приборы СВЧ. 2009. № 2. С. 8–13.
- [6] Complete Technology for 3D EM Simulation / CST Computer Simulation Technology AG — Режим доступа: <http://www.cst.com/> —24.02.2012.
- [7] Tarakanov V.P. User's manual for Code KARAT. Springfield, VA: Berkley Research Associates, Inc., 2010. P. 13–15.