

КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА GYRO-K ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИРОРЕЗОНАНСНЫХ ПРИБОРОВ СВЧ

Программа Gyro-K предназначена для расчета и оптимизации широкого класса микроволновых электронных приборов с азимутальной симметрией электродинамической системы: ЛБВ, гиротронов, гиро-ЛБВ, гиро-ЛОВ, гиро-клистронов, гиротонов и пениотронов. Она обладает повышенной скоростью расчетов по сравнению с такими известными программами как MAGIC, MAFIA, KARAT, MAGY за счет сведения решения трех мерной самосогласованной электродинамической задачи к одномерной.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Математическая модель процессов, происходящих в гирорезонансных приборах, состоит из двух взаимосвязанных систем дифференциальных уравнений: уравнения возбуждения электромагнитных волн в осесимметричном продольно нерегулярном волноводе релятивистским электронным потоком и уравнения движения электронов в заданных электромагнитных полях.

Уравнения возбуждения нерегулярного волновода были построены на основе метода преобразования координат А. Г. Свешникова [1, 2]. Он состоит в замене задачи возбуждения нерегулярного волновода задачей возбуждения регулярного волновода с единичным радиусом. Вместо обычных полярных координат r, φ, z используется система таких криволинейных координат ρ, φ, s , для которых единичные направляющие вектора по этим координатам имеют вид:

$$\begin{aligned} a_\rho &= b \cdot r_0, a_\varphi = \rho \cdot b \cdot \varphi_0, \\ a_s &= \rho \cdot \frac{\partial b}{\partial z} \cdot r_0 + z_0, \end{aligned} \quad (1)$$

где b — внутренний радиус волновода.

Уравнения Максвелла в новых координатах (ρ, φ, s) в ковариантной форме записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} H' &= \xi_0 \cdot \hat{g} \cdot \frac{\partial E'}{\partial t} + \hat{g} \cdot J', \\ \operatorname{rot} E' &= -\mu_0 \cdot \hat{g} \cdot \frac{\partial H'}{\partial t}. \end{aligned} \quad (2)$$

Метрический тензор в (2) выглядит следующим образом:

$$\hat{g} = \begin{pmatrix} 1 + \rho^2 \cdot \left(\frac{\partial \bar{b}}{\partial z} \right)^2 & 0 & -\rho \cdot \bar{b} \cdot \frac{\partial \bar{b}}{\partial z} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\rho \cdot \bar{b} \cdot \frac{\partial \bar{b}}{\partial z} & 0 & \bar{b}^2 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $\rho = r/b, \bar{b} = 2\pi b/\lambda_0, z = 2\pi Z/\lambda_0$.

Теперь в системе координат (ρ, φ, s) уравнение боковой поверхности рассматриваемого волновода имеет простой вид: $\rho = 1$.

Это позволяет искать решение волновых уравнений в виде разложений по системе базисных функций регулярного цилиндрического волновода.

Для решения уравнений Максвелла используется метод Галеркина [3]. Этот метод также называется методом ортогонализации и состоит в том, что коэффициенты разложения поля по собствен-

ным базисным функциям определяются из условия ортогональности невязок уравнений (2) этим собственным базисным функциям [2]. В результате мы получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений для коэффициентов разложения, которые зависят только от продольной координаты. Такой подход позволяет свести трехмерную задачу возбуждения нерегулярного волновода к одномерной задаче, зависящей только от продольной координаты.

В программе использованы релятивистские уравнения движения заряженных частиц в электромагнитном поле нерегулярного волновода и неоднородном магнитостатическом поле [4].

В математической модели учитываются и омические потери в стенках волновода на основе граничных условий Щукина-Леонтовича [5].

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ

Метод, изложенный в этой статье, сводит трехмерную задачу к одномерной. Это резко повышает как скорость, так и точность решения краевой задачи. Известные программы MAGIC [6], MAFIA [7], KARAT [8], MAGY [9] и другие не имеют такой скорости сходимости при решении краевых задач, и они не могут решить задачу оптимизации

профиля волновода гирорезонансных приборов за приемлемое время.

Прямое решение задачи Коши для системы уравнений движения электронов и возбуждения волн в нерегулярном волноводе обычными методами интегрирования (например, Рунге-Кутты) невозможно, если учесть наличие критических типов волн. Система уравнений очень нестабильна. Граничные условия для полученной системы дифференциальных уравнений на входе волновода задавались путем подачи мощности на одной из мод волновода, а остальные моды были согласованы только на отраженный сигнал. По условиям согласования отраженные волны на выходе волновода отсутствуют. Для решения такой краевой задачи был использован метод блочной матричной прогонки [10]. Для самосогласованного решения задачи возбуждения волновода и уравнений движения электронов в заданных электромагнитных полях используется итерационный метод последовательной нижней релаксации.

Разработанная математическая модель использована в качестве основы для компьютерной программы Gyro-K расчета и оптимизации процессов взаимодействия релятивистских электронных потоков с полями нерегулярных круглых волноводов [11]. Оптимальные параметры электронных приборов находятся на основе методов оптимизации с переменной метрикой с использованием программы Opti-K.

ВОЗМОЖНОСТИ И ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММЫ GYRO-K

Программа Gyro-K предназначена для расчета и оптимизации широкого класса микроволновых электронных приборов с азимутальной симметрией электродинамической системы (ЛБВ, гиротронов, гиро-ЛБВ, гиро-ЛОВ, гиро-клинтронов, гиротонов и пениотронов), но без расчета электронной пушки и коллектора.

Программа может работать в трех режимах:

- расчет электродинамики без учета электронного потока;
- расчет прибора с учетом электронного потока;
- расчет стартовых токов генерации при изменении магнитостатического поля и/или при изменении рабочей частоты.

При расчете прибора можно учитывать любое множество типов мод, как для TE типов волн, так и для TM типов мод. В программе предусмотрен большой набор функций для реализации профиля нерегулярного волновода и распределения магнитостатического поля.

Можно задавать и оптимизировать следующие параметры прибора:

- ток электронного потока;
- ускоряющее напряжение электронного потока;
- питч-фактор как отношение начальной поперечной скорости электронов к продольной;
- радиус ведущего центра ларморовской орбиты электронов;
- длину прибора;
- входную мощность усиливаемого сигнала;
- распределение магнитостатического поля;
- распределение профиля волновода;
- распределение удельного сопротивления стенок волновода;
- рабочую частоту;
- начальные значения амплитуд полей для каждого типа волны и частоты.

Список выходных файлов и графиков, создаваемых программой Gyro-K:

- файл входных параметров;
- файл с интегральными характеристиками прибора;
- файл результатов оптимизации;
- файл значений электронных траекторий на выходном конце прибора;
- график интегральных характеристик прибора;
- фазовые траектории электронов;
- график распределения электронов по скоростям;
- график частотной характеристики прибора;
- график стартовых токов генерации в зависимости от значения магнитостатического поля и частоты;

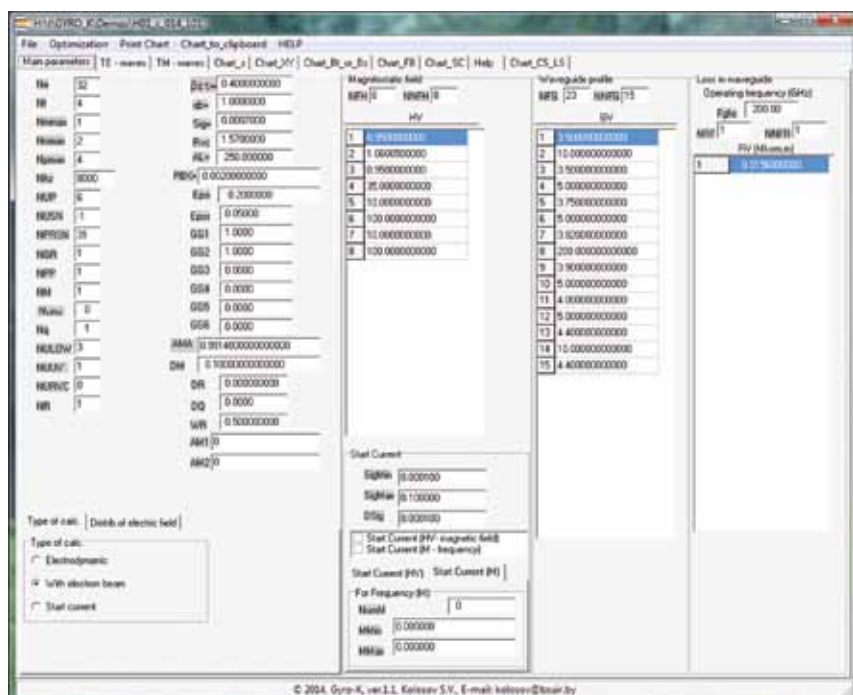
- график и файл поперечной проекции электрической напряженности поля при заданном значении продольной координаты Z;
- график и файл продольной проекции электрической напряженности поля при заданном значении азимута φ .

Ограничения программы:

- число электронных траекторий не более 400;
- число опорных частот при расчете полосы усиления не более 61;
- азимутальный индекс волны не более 32;
- радиальный индекс волны не более 10;
- все параметры задаются в нормированном безразмерном виде, что позволяет результаты расчетов легко переносить на любой частотный диапазон.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВОГО РАСЧЕТА

В качестве примера рассмотрим результаты расчета гиротрона на конусообразном волноводе с перемещающимся вдоль волновода участком магнитостатического поля, соответствующего гирорезонансу. Отнесенная к скорости света начальная скорость электронов $\beta = 0,4$; питч-фактор $q = 1$; ток $I_0 = 0,95$ А. Нормированный радиус ведущего центра электронных ротаторов $r_{01} = 1,57$. Число электронных траекторий 128. Число шагов по продольной координате 8000. Число итераций для получения самосогласованного решения 31. В расчете учитываются четыре волновые моды — TE_{01} , TE_{02} , TE_{03} и TE_{04} , что позво-



▲ Рис. 1. Основная форма программы Gyro-K

ляет корректно учесть преобразования волн на нерегулярностях волновода.

На основной форме на первой странице многостраничного блокнота задаются основные параметры рассчитываемого прибора (рис. 1). На страницах TE-waves и TM-waves указывается набор учитываемых в расчете волновых мод. Все остальные страницы предназначены для вывода результатов расчета.

На рис. 2 верхняя кривая показывает распределение магнитостатического поля вдоль оси прибора, ниже показана кривая, учитывающая фазовую группировку электронов на ларморовской ор-

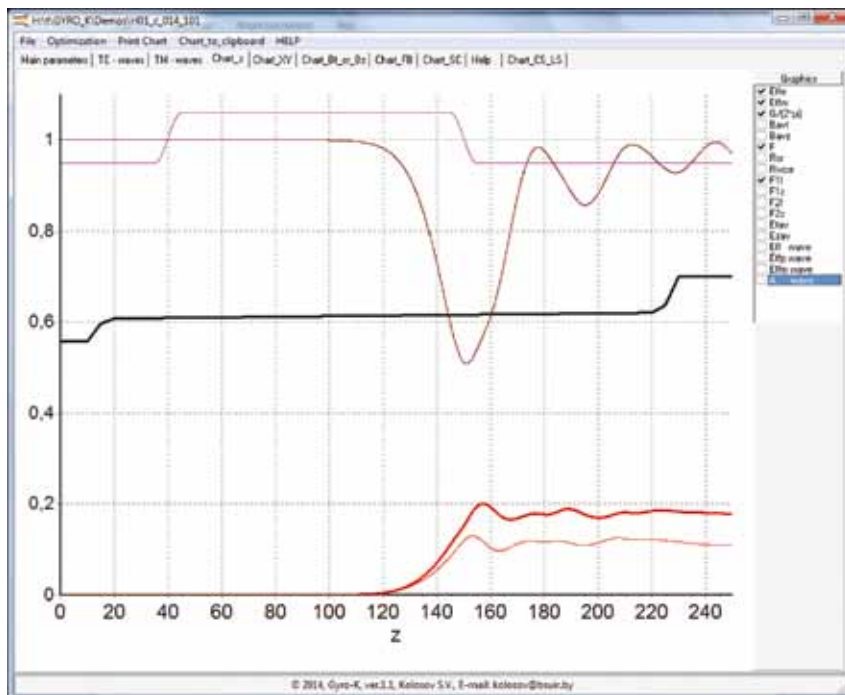
бите, затем идет кривая для внутреннего радиуса волновода, ниже приведены кривые для электронного и волнового КПД. Заметно, что мощность выходящей из волновода волны существенно меньше мощности, отданной этой волне электронным потоком. Это объясняется учетом омических потерь в стенках волновода на частоте 200 ГГц. С правой стороны страницы указан перечень кривых, которые можно наблюдать на ней.

Рис. 3 показывает, как зарождается и затем выходит из волновода возбуждаемая электронным потоком волна TE_{01} . В средней части конусообразного

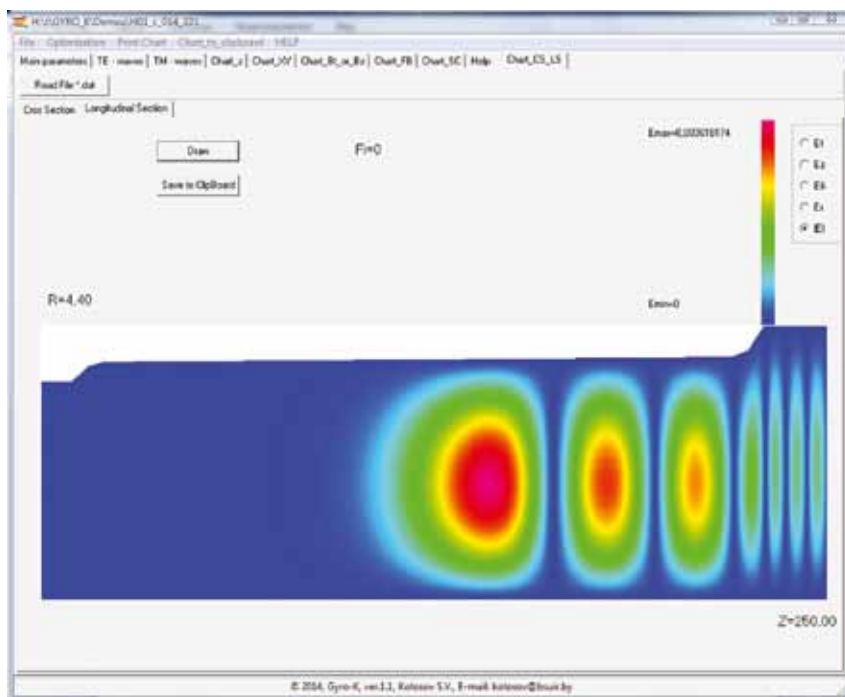
волновода наблюдается низкодобротный резонанс на относительной частоте $\omega/\omega_0 = 0,9914$.

Расчет данного варианта гиротрона на персональном компьютере с тактовой частотой 2,5 ГГц занимает по времени 22 минуты при 31 итерации для получения самосогласованного режима. Расчеты проводились при 8000 шагов по продольной координате, 4 учитываемых модах и 128 электронных траекториях. В таких известных программах, как MAGIC, MAFIA, KARAT, MAGY и др. для получения той же точности расчетов необходимо по всем трем координатам задать сетку из $8000 \times 8000 \times 8000$ точек, что практически невозможно, и время расчета превысит все мыслимые пределы.

Интерфейс программы Гуго-К очень простой (рис. 1) и исходные данные задаются всего в одном файле, построенном на основе оператора NAMELIST из алгоритмического языка Fortran. Программа написана на языке визуального программирования Delphi и поставляется в виде одного установочного файла на компакт-диске или флешке. —



▲ Рис. 2. Интегральные характеристики гиротрона



▲ Рис. 3. Продольный разрез распределения амплитуды электрической напряженности поля

ЛИТЕРАТУРА

1. Свешиников А. Г. К обоснованию метода расчета распространения электромагнитных колебаний в нерегулярных волноводах // Журнал вычислительной математики и математической физики, 1963. Т. 3, № 2.
2. Колосов С. В., Кураев А. А., Сенько А. В. Уравнения возбуждения нерегулярных волноводов с конечной проводимостью стенок // Техника и приборы СВЧ, 2009, № 2.
3. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галеркина // М. Мир, 1988.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля // М. Наука, 1988.
5. Никольский В. В. Теория электромагнитного поля // М. Высшая школа, 1961.
6. Ludeking L. MAGIC, User's manual // L. Ludeking et al. // Mission Research Corporation. March, 1999.
7. MAFIA, User's Guide, Version 4.0, CST GmbH, Lanteschlagerstr, 38, 64285, Darmstadt, Germany.
8. Tarakanov V. P. User's manual for Code KARAT // V. P. Tarakanov. — Springfield, VA: Berkley Research Associates. 1992.
9. Betton M. MAGY: a time-dependent code for simulation of slow and fast microwave devices // M. Betton et al. // IEEE, Trans. Plasma Sci. June, 1998.
10. Свидетельство о регистрации компьютерной программы № 384. Компьютерный программный комплекс КЕДР/правообладатель БГУИР. Авторы: Колосов С. В., Кураев А. А., Сеницын А. К., Аксентич А. В.; заявл. 19.01.2012; внесена в реестр Национального центра интеллектуальной собственности БР — 07.02.2012.