

УДК 621.385.624

КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ КЛИСТРОННОГО ТИПА

В. Е. Родякин¹, В. М. Пикунов¹, В. Н. Аксенов^{1,2}

¹ Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН - филиал
Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский
центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук»,
140700, Московская область, г. Шатура, Святоозерская, 1

² Физический факультет и международный Лазерный центр, МГУ им.М.В.Ломоносова,
119991, Москва, Ленинские горы, 1

Статья поступила в редакцию 31 мая 2019 г.

Аннотация. Приведено описание численных алгоритмов программного комплекса PARS, разработанного для численного анализа физических процессов в мощных электровакуумных приборах клистронного типа. Комплекс программ предназначен для исследования и разработки таких приборов, как клистроны, твистроны, клистроны с распределенным взаимодействием и др. Комплекс программ имеет модульную структуру и позволяет решать спектральные электродинамические, электронно-оптические и электронно-волновые задачи и проводить расчет прибора от катода до коллектора. В алгоритмах используется самосогласованный метод квазитрехмерного численного анализа динамики заряженных частиц в электромагнитных полях. В работе представлены результаты сравнения численных расчетов мощного клистрона DESY 150 МВт, выполненных с помощью программ разработанного комплекса, с экспериментальными данными и результатами расчетов с помощью других известных программ.

Ключевые слова: комплекс программ, электронный пучок, клистрон, электронная пушка, резонатор, коллектор, уравнение Пуассона, уравнения Максвелла, модель частица в ячейке, фокусирующее магнитное поле.

Abstract. We present the description of the PARS computer code algorithms, developed for the numerical analysis of physical processes in the high power vacuum electronic devices of klystron type, such as klystron, twystron, extended interaction klystron etc. The computer code is high-performance 2D analysis software package

for researching and designing of devices from the cathode to the collector. It includes frequency-domain solver, electron optics module and beam-wave interaction time-domain solver. The algorithms use a self-consistent methods of numerical analysis of the charged particles dynamics in electromagnetic fields. Results of numerical simulation by computer code PARS of the high power klystron DESY 150 MW are presented. PARS simulation, experimental and other well-known computer codes results are in a good agreement.

Key words: computer code, electron beam, klystron, electron gun, cavity, collector, Poisson equation, Maxwell equations, particle in cell model, focusing magnetic field.

1. Введение

В течение последних десятилетий вакуумная СВЧ электроника характеризуется высокими темпами развития, которые поддерживаются постоянно расширяющейся областью применения мощных генераторов и усилителей СВЧ излучения. Развитие данных приборов идет по пути улучшения рабочих характеристик приборов в уже освоенных областях рабочих частот, а также по пути продвижения в коротковолновую часть СВЧ диапазона. Одними из наиболее перспективных традиционных приборов, которые успешно адаптируются на этом пути, являются многорезонаторные клистронные усилители.

Теория мощных электровакуумных приборов СВЧ в общем случае строится на принципах классической электродинамики и сводится к решению совместной системы уравнений Максвелла и уравнений движения заряженных частиц в областях сложной конфигурации. Прямое решение данной системы в общей постановке требует использования нестационарных трехмерных численных моделей электронного потока и электромагнитных полей. Такое решение является весьма трудоемким, требует значительных вычислительных затрат, и применяется только в полных компьютерных кодах [1,2].

В алгоритмах разработанного комплекса программ, с учетом особенностей физических процессов в различных частях клистрона применяются различные модели, позволяющие упростить нахождение решения совместной системы

полевых уравнений и уравнений движения заряженных частиц и значительно сократить время численных расчетов приборов и оптимизации их параметров. В силу аксиальной симметрии решаемых задач во всех частях клистрона используется цилиндрическая система координат (r, z, ψ) , ось z которой направлена вдоль оси симметрии прибора.

2. Алгоритмы комплекса программ PARS

В общей постановке алгоритмы разработанного комплекса программ предназначены для теоретического анализа процессов формирования, транспортировки и взаимодействия электронных потоков с электромагнитными полями системы взаимодействия электровакуумных приборов клистронного типа. Уравнения Максвелла для электромагнитных полей свободных электронов, движущихся в вакууме, имеют вид:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} - \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E} = \mathbf{j}, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} + \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{H} = 0, \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \quad (3)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{H} = 0. \quad (4)$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t} = -e \mathbf{E} - e [\mathbf{v} \mathbf{B}], \quad (5)$$

Здесь \mathbf{E} - напряженность электрического поля, \mathbf{H} - напряженность магнитного поля, ρ - плотность пространственного заряда электронного пучка, $\mathbf{j} = \rho \mathbf{v}$ - плотность конвекционного тока электронов, \mathbf{v} - скорость заряженных частиц, e , m_0 , и $\mathbf{p} = m_0 \gamma \mathbf{v}$ - заряд, масса покоя и импульс отдельного электрона,

$\gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$ - релятивистский фактор, c – постоянная скорости света в вакууме,

\mathbf{B} - индукция магнитного поля. Система уравнений (1)-(5) является нелинейной, поскольку электромагнитные поля, действующие на частицы,

зависят от распределений плотности заряда и тока, которые, в свою очередь, определяется движением частиц. Поэтому стационарное решение самосогласованных уравнений во всех частях клистрона находится численно итерационным методом. Итерации продолжаются, пока сходимость результатов к стационарному решению не будет достигнута. Численное интегрирование уравнений движения проводится методом Рунге-Кутты 4-ого порядка с контролем точности. Для нахождения компонент фокусирующего магнитного поля используется метод, основанный на аналитическом продолжении функции осевого распределения [3].

Для анализа работы прибора в статическом режиме, в котором процессы во всех частях прибора не зависят от времени, используются алгоритмы модуля PARSTATIC комплекса программ PARS, предназначенного для решения задач электронной оптики. При этом расчет прибора по программе PARSTATIC может быть проведен от катода до коллектора, как единой электронно-оптической системы, включающей в себя электронную пушку, систему взаимодействия и коллектор. На практике для обеспечения необходимой точности анализ работы прибора в статическом режиме проводится для различных областей отдельно. Сначала проводится расчет электронной пушки (область 1 на рис.1) для части прибора $z \in [z_0, z_1]$. Полученные выходные данные для полей, координат и импульсов электронов в сечении $z = z_1 - 2r_T$, используются в качестве граничных и начальных условий для расчета системы взаимодействия (область 2). После расчета второй области $z \in [z_1 - 2r_T, z_2]$ выходные данные в сечении $z = z_2 - 2r_T$, используются в качестве граничных и начальных условий для расчета коллектора (область 3) $z \in [z_2 - 2r_T, z_3]$. Таким образом, последовательный анализ прибора осуществляется с перекрытием областей. Это необходимо для уменьшения погрешностей, вызванных влиянием условий на виртуальных границах, возникающих при разбиении всего прибора на области. Описанный процесс последовательного численного анализа в различных областях усилителя с последующей стыковкой граничных

и начальных данных на границах областей используется как при анализе статического, так и динамического режима работы прибора. Дискретизация электронного потока осуществляется в программе PARSTATIC на основе модели «трубок тока».

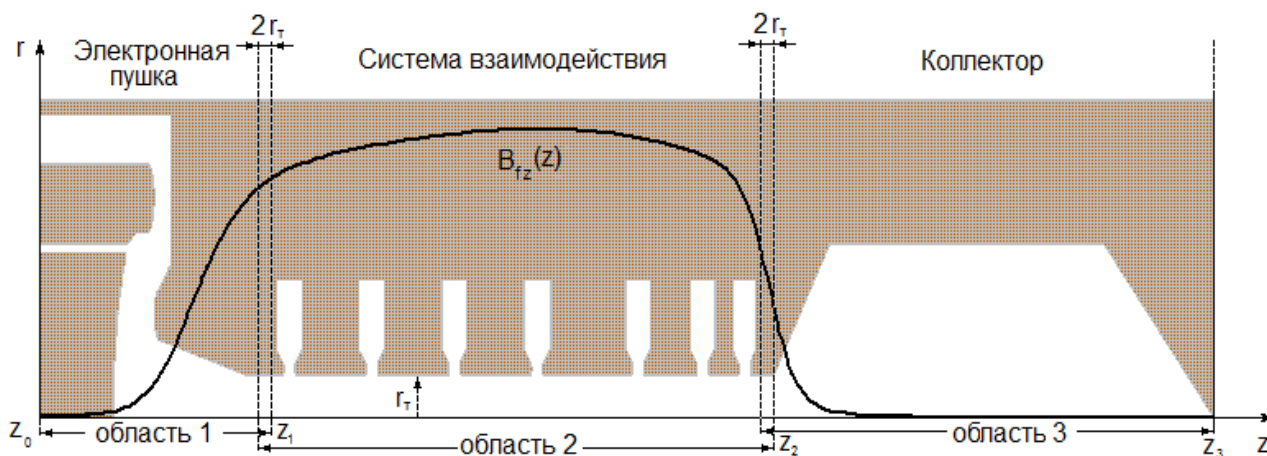


Рис. 1. Области расчета клистрона.

Для решения уравнения Пуассона в аксиально-симметричных областях сложной формы используется алгоритм, предложенный в работе [4], особенностью которого является дискретизация интегральной формы уравнения Пуассона:

$$\int_S \vec{n} \nabla \varphi \, dS = -\frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho d\tilde{V} \quad (6)$$

где \vec{n} - единичный вектор внешней нормали к поверхности S , ограничивающей объем \tilde{V} , внутри которого ищется распределение φ , Граничные условия 1-го либо 2-го рода задаются на кривой, ограничивающей исследуемую область и состоящей из отрезков прямых линий и дуг окружностей. Применение прямого метода решения полученной в результате дискретизации системы разностных уравнений Пуассона позволяет избежать тех трудностей, которые возникают со сходимостью решений при использовании итерационных методов. Использование интегральной формы уравнения позволяет понизить порядок дифференциального уравнения задачи, что обеспечивает совместно с тщательным описанием приграничных элементов

увеличение точности расчета по сравнению с обычными разностными методами.

Анализ процессов группирования и отбора энергии в системе взаимодействия, работающей в динамическом режиме, относится к динамическим задачам электронно-волнового взаимодействия, решения которых имеют периодическую зависимость от времени. Алгоритмы решения таких задач реализованы в модуле PARSDYNAM комплекса программ PARS. Решение задач электронно-волнового взаимодействия в системах взаимодействия СВЧ приборов в общей постановке задачи требует нахождения нестационарного решения системы нелинейных уравнений (1)-(5) в областях со сложной формой граничной поверхности (область 2 на рис. 1). Большинство конструкций приборов клистронного типа удовлетворяет условиям квазистационарности [8], что позволяет исключить из рассмотрения переходные процессы и перейти от анализа нестационарного режима к нахождению квазистационарного решения задачи (1)-(5). Квазистационарное решение этой задачи в системах взаимодействия клистронных усилителей имеют периодическую зависимость от времени, в основном определяемую частотой СВЧ сигнала f .

Область проникновения электромагнитных полей резонаторов в трубы дрейфа обычно ограничивается длиной зазора резонатора d и участками трубы дрейфа по обе стороны зазора длиной, равной диаметру трубы дрейфа (рис. 2а). Для учета излучаемых полей в клистродах используется вариационный метод [8], который в квазистационарном приближении позволяет перейти к эквивалентным цепям представления резонаторов, введя понятия комплексных наведенных токов $I_{\text{нав } n}$, напряжений на зазорах V_n и электронной проводимости Y_n . Для этого система взаимодействия разбивается на область, ограниченную радиусом трубы дрейфа (рис. 2б), и области собственно резонаторных полостей. Такой подход позволяет перейти от анализа системы взаимодействия со сложной формой граничной поверхности (рис. 2а) к исследованию

эквивалентной ей схемы с простой формой круглого волновода радиуса r_T (рис.2б).

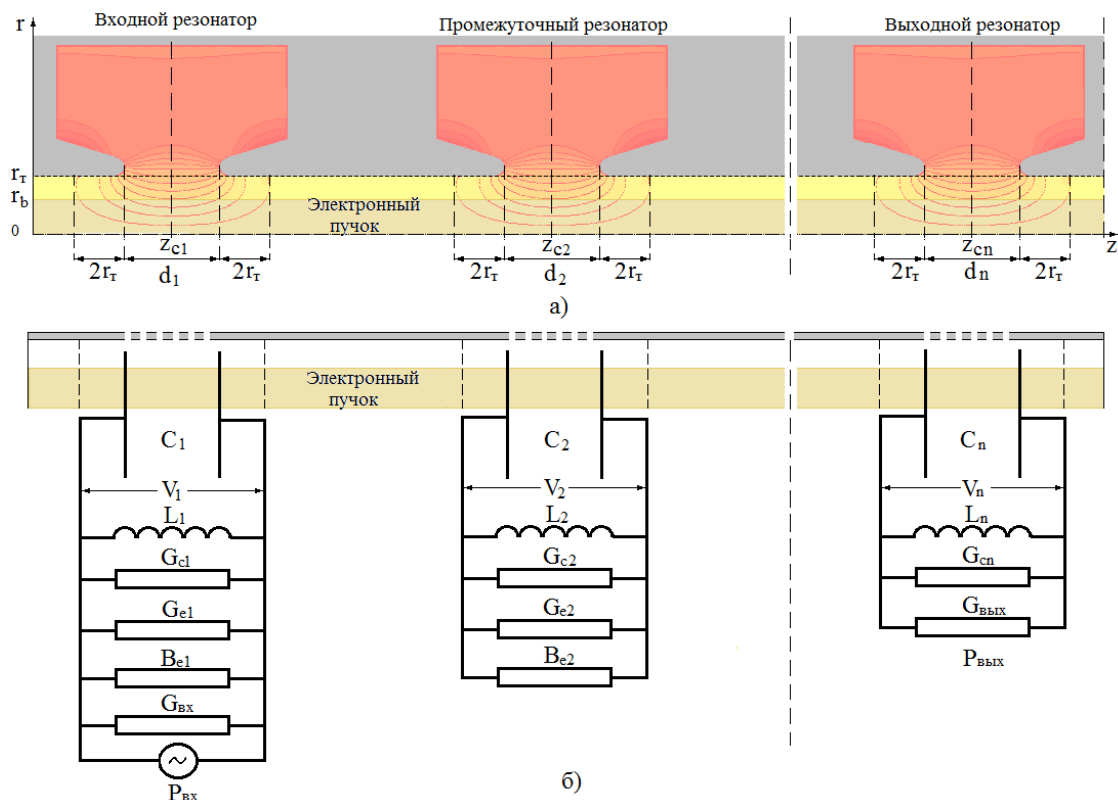


Рис. 2. а) Схема системы взаимодействия; б) Эквивалентная схема системы взаимодействия.

Предполагается, что структура электромагнитных полей резонатора не изменяется электронным пучком и совпадает со структурой одного из собственного вида колебаний резонатора. Эта структура для каждого резонатора может быть задана либо аналитическими формулами, либо из решения уравнений Максвелла на собственные значения, полученного из расчетов по отдельной программе (например, по программе PARSPECTR комплекса программ PARS). Для вычисления амплитуд напряжений на зазорах резонаторов (кроме входного) применяется нелинейный подход, при котором используется теория Шокли-Рамо [10], а напряжение в зазоре резонатора определяется итерационным методом через мощность взаимодействия:

$$P(t) = \int_{V_{gn}} \mathbf{E}_{gn} \mathbf{j} d\tilde{V}_{gn}, \quad (7)$$

где \tilde{V}_{gn} - объем области взаимодействия электромагнитного поля n-ого

резонатора $\mathbf{E}_{gn} = \frac{\mathbf{V}_n}{d_n} \{F_m, 0, F_{zn}\}$ с электронным пучком, $F_m(r, z)$ и $F_{zn}(r, z)$ - двумерные нормированные функции распределений радиальной и продольной компонент рабочего вида колебаний резонатора. При этом на каждом периоде колебаний поля в резонаторе $T = \frac{1}{f}$ проводится вычисление реальной и мнимой части комплексного наведенного тока:

$$\operatorname{Re} \mathbf{I}_{\text{наб } n} = \frac{2}{Td_n} \int_0^T dt \iiint_{\tilde{\mathbf{V}}_{gn}} [j_r(r, z, t)F_m(r, z) + j_z(r, z, t)F_{zn}(r, z)] \sin(\omega t + \alpha_n) d\tilde{\mathbf{V}}_{gn} \quad (8)$$

$$\operatorname{Im} \mathbf{I}_{\text{наб } n} = \frac{2}{Td_n} \int_0^T dt \iiint_{\tilde{\mathbf{V}}_{gn}} [j_r(r, z, t)F_m(r, z) + j_z(r, z, t)F_{zn}(r, z)] \cos(\omega t + \alpha_n) d\tilde{\mathbf{V}}_{gn} \quad (9)$$

Амплитуда и фаза напряжения на $k+1$ периоде (итерации) определяется из следующего выражения:

$$\mathbf{V}_n^{k+1} = \sqrt{\frac{\mathbf{I}_{\text{наб } n} \mathbf{V}_n^k}{\mathbf{Y}_n}} \quad (10)$$

Итерации продолжаются до сходимости значений амплитуды и фазы напряжения на зазоре резонатора к стационарному значению. Разработанный нелинейный метод анализа позволяет учесть в квазистационарном квазитрехмерном приближении нелинейные эффекты взаимодействия интенсивных электронных потоков с электромагнитными полями в зазорах резонаторов, в том числе и выходных.

При решении динамических задач электронный поток представляется "крупными частицами", имеющими форму колец и дисков. Начальные значения импульсов и фаз влета частиц задается либо по результатам численного анализа предыдущих подобластей, либо по идеализированным распределениям. В случае, если предыдущей подобластью является электронная пушка, инжекция "частиц" в систему взаимодействия производится с регулярными временными интервалами и соответствует в продольном направлении немодулированному

электронному пучку.

Модель предполагает, что размеры частицы остаются неизменными во время ее прохождения через исследуемую область. Влет электронов в область расчета осуществляется последовательно в течение нескольких периодов ВЧ колебаний. Общее количество наблюдаемых частиц ограничивается возможностями ЭВМ и составляет несколько десятков тысяч. Уравнения движения решаются для центров "частиц". На каждом временном шаге происходит пересчет полей, зарядов и токов.

Для определения плотностей заряда и тока в узлах разностной сетки используется аналог метода "взвешивания по площадям" [11]. Для этого применяется вспомогательная разностная сетка, которая имеет те же шаги по координатам, что и основная, но сдвинута относительно основной сетки на половину шага. Данный алгоритм распределения зарядов крупных частиц по узлам разностной сетки позволяет обеспечивать соблюдение закона сохранения заряда, а в сочетании с линейной интерполяцией электрических полей на сетке, и закона сохранения энергии.

Анализ системы взаимодействия прибора проводится для эквивалентной области взаимодействия, представляющей собой отрезок волновода. Увлекаемые электромагнитные поля локализованы вблизи движущихся зарядов и экспоненциально затухают при удалении от них. Представление о локализации полей вблизи равномерно движущихся сгустков позволяет заменить частные производные по времени, входящие в уравнения Максвелла, на производные по пространственным координатам и использовать для расчета собственных полей электронного потока неполный метод Галеркина с ортогонализацией [12]. Данный алгоритм позволяет существенно сократить время расчетов и расширить возможности моделирования и оптимизации электровакуумных приборов клистронного типа по сравнению с известными методами.

Определение структуры собственных электромагнитных полей резонатора относится к спектральным задачам электродинамики, при

решении которой рассматриваются поля, изменяющиеся во времени по гармоническому закону. Алгоритмы решения таких задач для азимутально-однородных видов колебаний реализованы в модуле PARSPECTR комплекса программ PARS. В электродинамических структурах приборов клистронного типа для реализации продольного взаимодействия с электронными потоками используются собственные колебания E-типа. Нахождение азимутально-однородных собственных видов колебаний E-типа в цилиндрической системе сводится к решению следующего уравнения на собственные значения k относительно функции $\zeta(r, z) = r\Gamma_{\psi}^m(r, z)$ [13]:

$$r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \zeta}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial z^2} + k^2 \zeta = 0, \quad (11)$$

где $\Gamma_{\psi}^m(r, z)$ угловая компонента магнитного вектора Герца. Граничные условия для функции $\zeta(r, z)$ на идеально проводящей металлической стенке резонатора имеют вид:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial \mathbf{n}} = 0 \quad (12)$$

На оси симметрии резонатора ($r = 0$) граничные условия записываются, как:

$$\zeta = 0; \quad \frac{\partial \zeta}{\partial r} = 0 \quad (13)$$

Дискретизация уравнения (11) с учетом граничных условий (12) и (13) на разностной сетке осуществляется через его интегральную форму. В результате для каждого узла сетки составляется разностный аналог уравнения (11):

$$L_{ij} \zeta_{i-1,j} + R_{ij} \zeta_{i+1,j} + B_{ij} \zeta_{i,j-1} + T_{ij} \zeta_{i,j+1} + D_{ij} \zeta_{i,j} = A \zeta_{i,j}, \quad (14)$$

Где $A = k^2$. Составленные таким образом разностные уравнения для всех внутренних узлов сетки образуют систему линейных алгебраических уравнений порядка $N = N_r N_z$, которая имеет блочную трёхдиагональную матрицу коэффициентов \mathbf{A} размерности $N \times N$. Собственное значение,

соответствующее найденному собственному вектору $\mathbf{X}^{(m)}$ на m -ой итерации вычисляется с использованием частного Рэля:

$$\Lambda^{(m)} = \frac{\mathbf{X}_T^{(m)} \mathbf{A} \mathbf{X}^{(m)}}{\mathbf{X}_T^{(m)} \mathbf{X}^{(m)}}, \quad (15)$$

где $\mathbf{X}_T^{(m)}$ - собственный вектор строка. Итерации продолжаются до выполнения критерия сходимости собственных значений с заданной точностью δ :

$$\left| 1 - \frac{\Lambda^{(m-1)}}{\Lambda^{(m)}} \right| \leq \delta \quad (16)$$

Найденные значения $\omega = c\sqrt{\Lambda}$ и ζ_{ij} являются значениями собственной частоты и собственной функции основного вида колебаний. Определенная на разностной сетке собственная функция $\zeta(r, z)$ позволяет вычислить распределения собственных электрического и магнитного полей резонатора:

$$\begin{aligned} E_r(r, z) &= \frac{j\omega\mu_0}{r} \frac{\partial \zeta(r, z)}{\partial z}, & H_r(r, z) &= 0, \\ E_z(r, z) &= -\frac{j\omega\mu_0}{r} \frac{\partial \zeta(r, z)}{\partial r}, & H_z(r, z) &= 0, \\ H_\psi(r, z) &= \frac{k^2}{r} \zeta(r, z), & E_\psi(r, z) &= 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Найденные распределения используются в программе PARSDYNAM в качестве нормализованных функций $F_r(r, z)$, $F_z(r, z)$ для численного моделирования динамических процессов в системе взаимодействия прибора. Для вычисления высших видов колебаний используется также метод последовательной верхней релаксации. При этом на каждой итерации проводится ортогонализация вектора \mathbf{X} ко всем найденным собственным векторам низших видов колебаний. Найденные собственная частота и распределения собственных полей рабочего вида колебаний позволяют определить волновое сопротивление резонатора, а также с помощью

импедансных граничных условий Шукина-Леонтовича вычислить его собственную добротность.

3. Результаты численных расчетов клистрона DESY 150МВт

Для проверки точности алгоритмов разработанного комплекса программ PARS были проведены численные расчеты мощного клистрона для линейного электрон-позитронного коллайдера DESY (Германия). Этот семи-резонаторный релятивистский клистрон сантиметрового диапазона с выходной мощностью 150 МВт был разработан и создан в Национальной ускорительной лаборатории SLAC (Стэнфорд, США) в 1994 году [15]. В работе [16] приведены подробные экспериментальные данные для данного прибора, а также представлены сравнительные результаты численных расчетов, проведенных с помощью известных компьютерных программ CONDOR, FCI и MAFFIA-TS2. Последняя из программ впоследствии была включена в пакет программ CST. Это позволило провести сравнение точности расчетов разработанного комплекса PARS не только с экспериментальными данными, но и с результатами расчетов по другим известным программам.

А. Электронная пушка

На рис.3 представлены форма электродов электронной пушки клистрона DESY 150МВт, траектории электронов и эквипотенциали электростатического поля, рассчитанного с помощью программы PARSTATIC комплекса программ PARS для ускоряющего напряжения 511кВ. Установившееся в результате сходимости итераций распределение плотности тока эмиссии по радиусу катода представлено на рис.4а. Интервал изменения плотности тока с катода составил от 3 A/cm^2 на оси до 5.5 A/cm^2 на краю катода.

Значение силы полного тока эмиссии с катода составило 650 А, что с точностью до 1% соответствует экспериментальному значению 656 А. Поперечные распределения плотности тока в сформированном пушкой электронном пучке приведены на рис.4б.

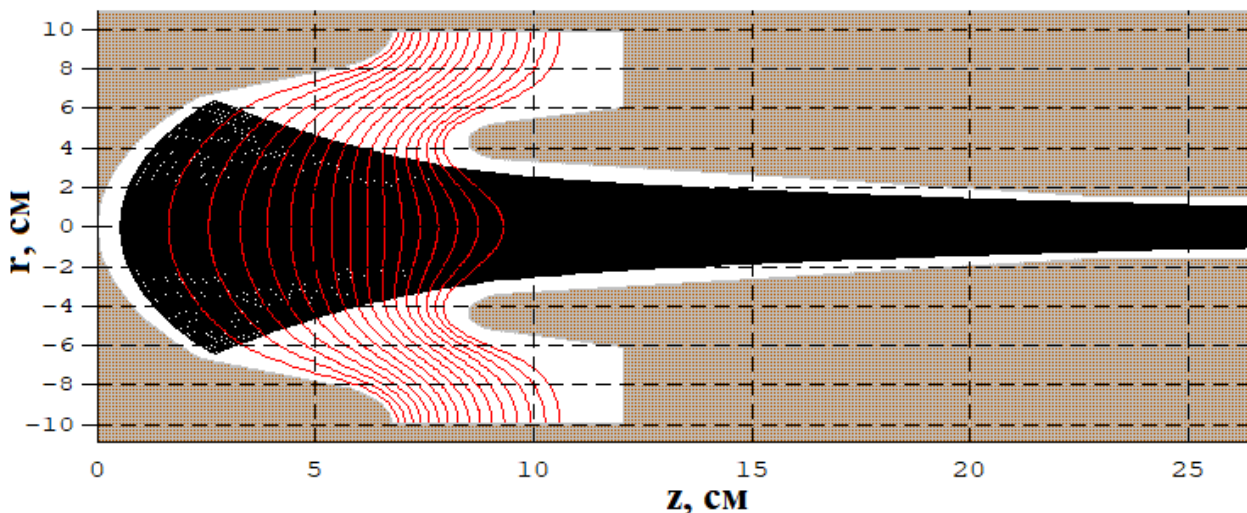


Рис. 3. Форма электродов, рассчитанные траектории электронов и эквипотенциали в электронной пушке клистрона DESY 150МВт.

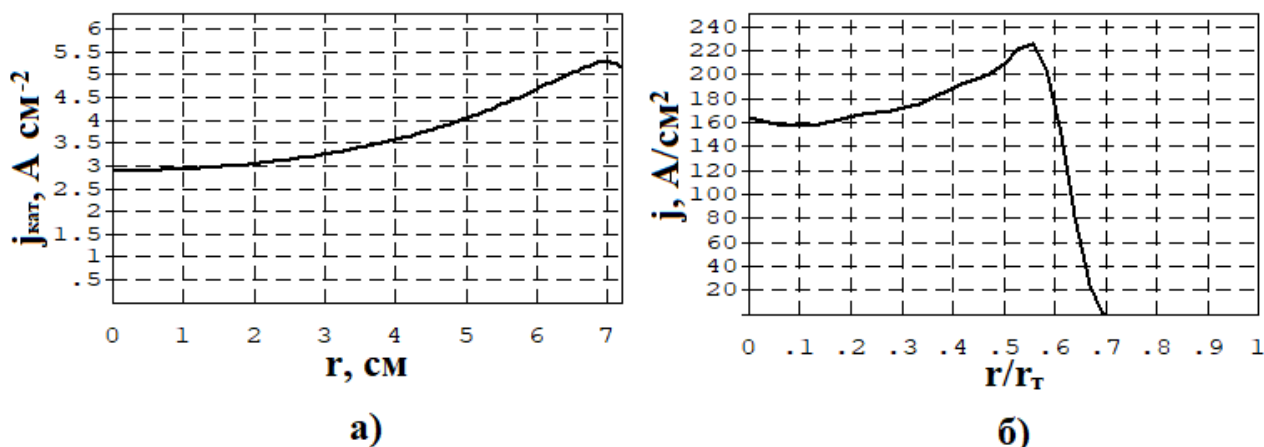


Рис. 4. Рассчитанные поперечные распределения плотности тока электронного пучка на катоде (а), и в выходном сечении электронной пушки (б).

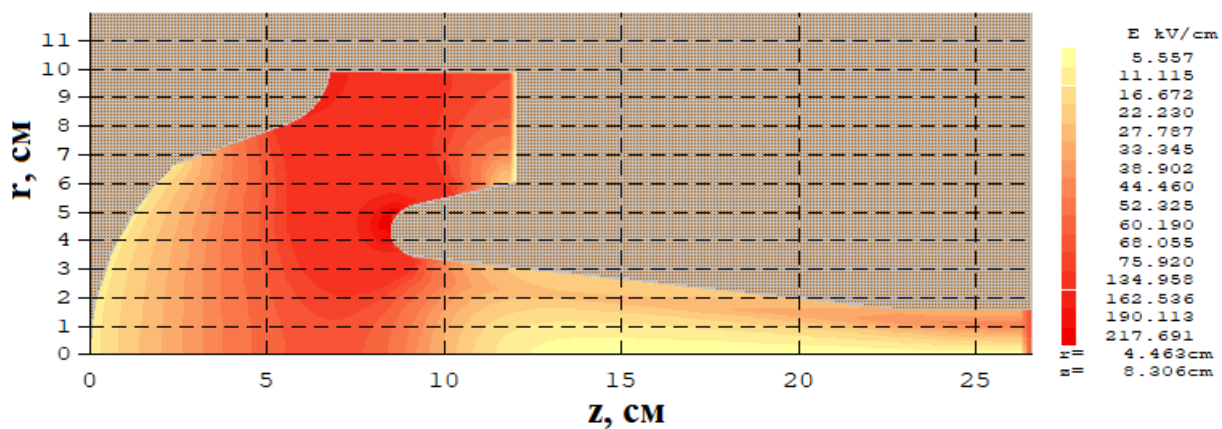


Рис. 5. Рассчитанная структура электрического поля в электронной пушке.

Пространственное распределение напряженности установившегося в результате итераций электрического поля в электронной пушке приведено на рис.5. В данной конструкции электронной пушки максимальная напряженность поля 218 кВ/см создается на закругленной кромке анода.

В работе [16] приведены экспериментальные данные полученных значений силы тока для интервала ускоряющих напряжений от 480кВ до 527кВ. На рис.6 приведены экспериментальные и рассчитанные по программе PARSTATIC зависимости силы тока от ускоряющего напряжения.

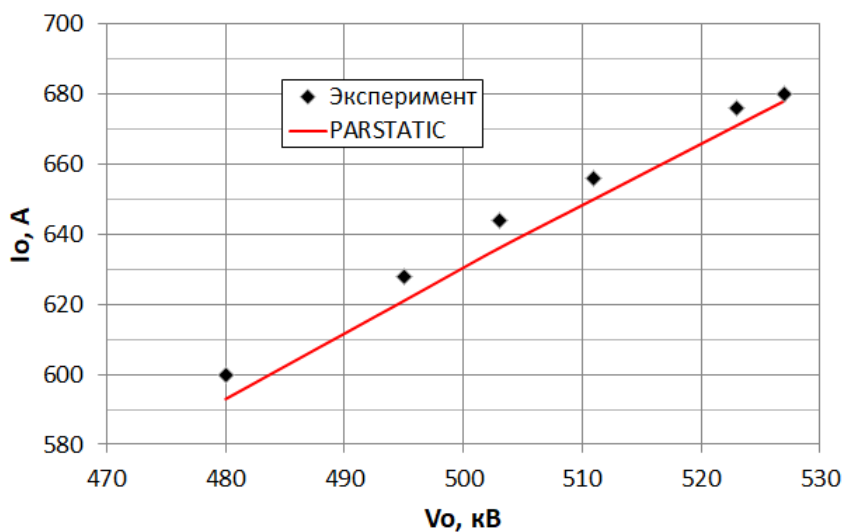


Рис. 6. Экспериментальные и рассчитанные зависимости силы тока от ускоряющего напряжения.

Как видно из рисунка, рассчитанные по программе PARSTATIC значения силы тока совпадают с экспериментальными значениями с точностью до 1%. Используемые в работе [16] для расчета электронной пушки известные программы EGUN и SuperSAM обеспечили точность расчета силы тока в пределах 2%, что несколько хуже, чем точность расчета по программе PARSTATIC.

Для исследования устойчивости сформированного электронной пушкой электронного потока во всем приборе был проведен численный анализ транспортировки пучка через систему взаимодействия и коллектор в статическом режиме. Для фокусировки электронного потока в клистроне DESY 150МВт используются соленоиды. Экспериментально измеренное

распределение продольной компоненты фокусирующего магнитного поля на оси клистрона DESY 150МВт приведено на рис.7а.

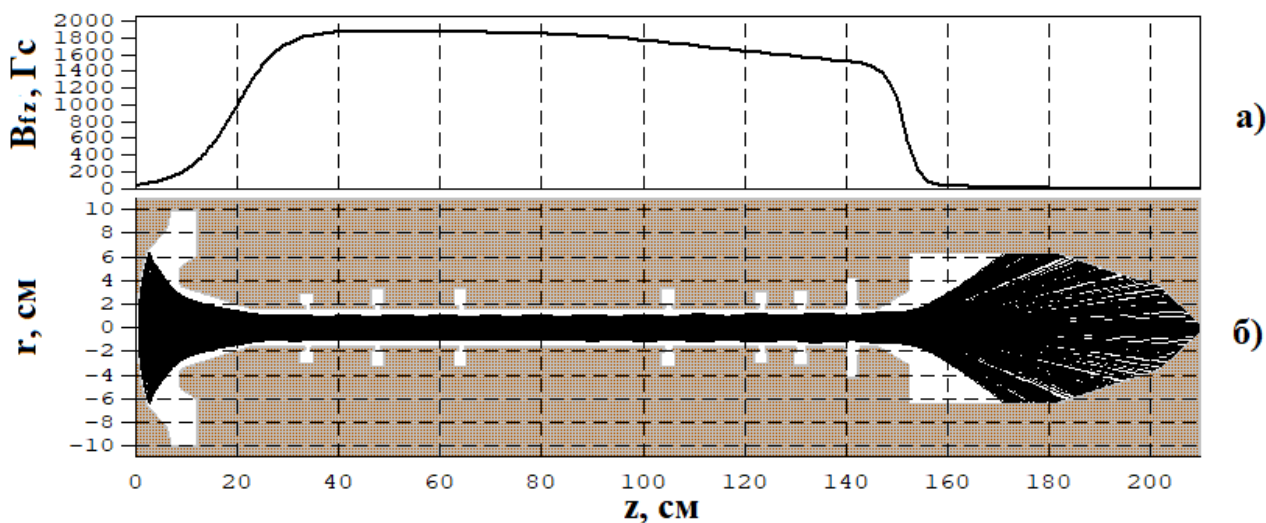


Рис. 7. Распределение продольной компоненты фокусирующего магнитного поля на оси клистрона (а); Конструкция клистрона и рассчитанные траектории электронов в статическом режиме (б).

Рассчитанные программой PARSTATIC траектории электронов представлены на рис.7б. Изображенные на рисунке траектории показывают, что в системе взаимодействия клистрона не происходит оседания электронов на стенки трубы дрейфа, а все электроны достигают коллектора и оседают на его стенки. Таким образом обеспечивается 100% токопрохождение сформированного электронного потока в статическом режиме.

Б. Резонаторы

Клистрон DESY 150 МВт имеет семь резонаторов (см. рис.7). В работе [16] приведены экспериментальные данные для параметров входного и выходного резонаторов. Параметры промежуточных пяти резонаторов рассчитывались с помощью известных программ SUPERFISH, SuperLANS и MAFIA-E. Сравнение параметров входного и выходного резонаторов не проводилось, поскольку элементы ввода и вывода энергии нарушают аксиальную симметрию этих резонаторов и не позволяют провести их точный расчет с помощью двумерных программ. Параметры резонаторов, использовавшиеся в работе [16] для сравнения различных программ, приведены в таблице 1. В ней же представлены результаты расчетов параметров резонаторов по программе

PARSPECTR.

Таблица 1. Параметры резонаторов.

Резонатор	Частота f_c , ГГц		Волновое сопротивление R/Q , Ом		Нагруженная добротность Q	
	Эксперимент расчет	PARSPECTR	Эксперимент расчет	PARSPECTR	Эксперимент и расчет	PARSPECTR
1	3.0000	--	87	--	127	--
2	3.0093	3.0140	89	86	8200	8222
3	3.0290	3.0423	91	88	8300	8314
4	3.1768	3.1810	107	104	8900	8992
5	3.4478	3.4612	98	94	8700	8632
6	3.3848	3.4060	127	121	9500	9613
7	2.9980	--	117	--	14	--

Сравнение результатов, приведенных в таблице 3, показывает, что отличие собственных частот и добротностей промежуточных резонаторов, рассчитанных по программе PARSPECTR, от аналогичных параметров, полученных с помощью известных программ, составляет меньше 1,5%. Отличие же в значениях волнового сопротивления составляет 3-5%, и может быть объяснено тем, что данный параметр не является инвариантным и зависит от способа определения, используемого в той или иной программе.

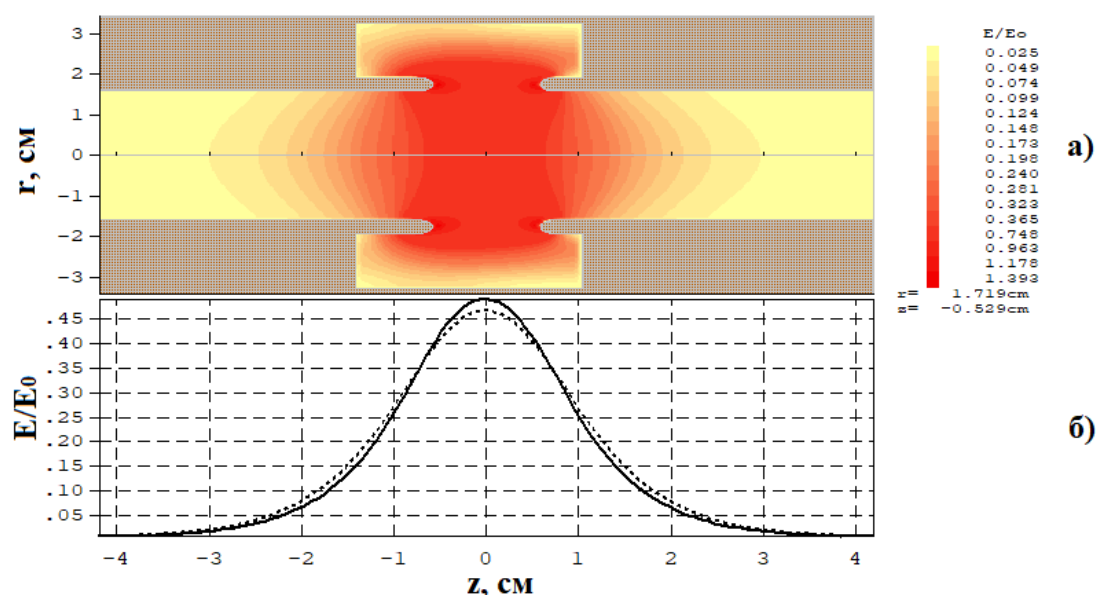


Рис. 8. Рассчитанные структура электрических полей основного вида колебания (а) и распределения продольной компоненты электрического поля на оси и на краю электронного пучка (б).

Нормированные распределения продольной компоненты электрического поля третьего резонатора на оси и на краю электронного потока представлены на рис.8б.

В. Система взаимодействия

Выходные данные для электронов потока, полученные в результате расчетов по программе PARSTATIC электронной пушки клистрона, были использованы в качестве входных данных для численного анализа системы взаимодействия по программе PARSDYNAM. Также при анализе системы взаимодействия использовались данные для структуры электромагнитных полей основных видов колебаний резонаторов, вычисленных с помощью программы PARSPECTR. Значения экспериментальных параметров клистрона, для которых проводилось сравнение, представлены в таблице 2.

Таблица 2. Рабочие параметры клистрона DESY 150МВт.

Параметр	Значение
Ускоряющее напряжение	511 кВ
Сила тока	656 А
Центральная частота	3.002 ГГц
Выходная мощность	>140 МВт
Коэффициент усиления	54 Дб
КПД	42%

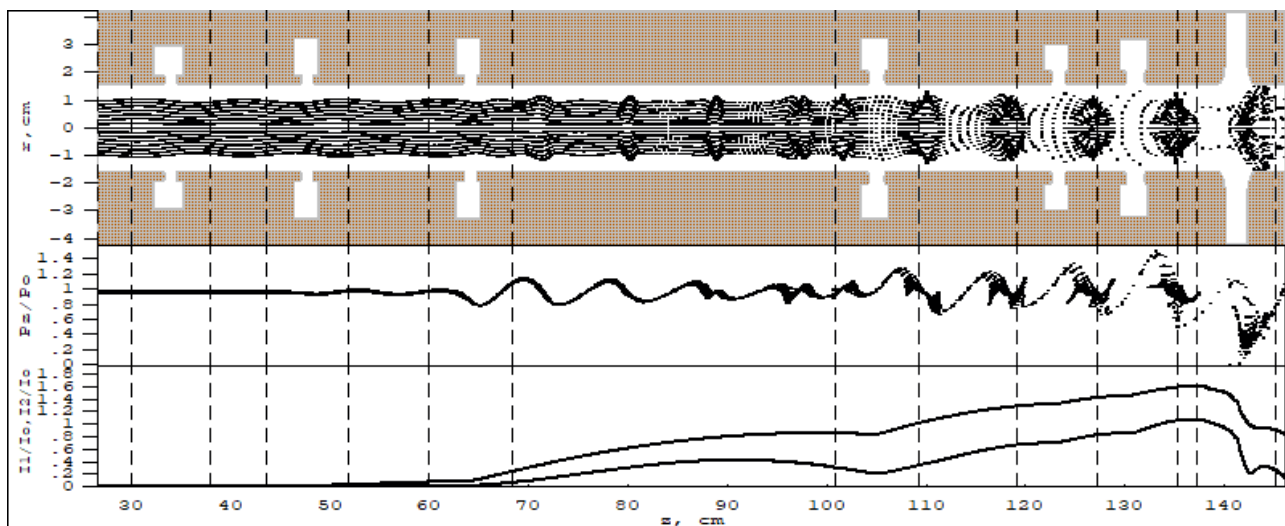


Рис. 9. Динамика крупных частиц в системе взаимодействия клистрона в установившемся режиме и продольное распределение первой и второй гармоник тока в пучке.

Для просмотра анимации кликните на изображении.

При расчетах для моделирования электронного потока использовалось 480 «крупных» частиц на период. Результаты расчета работы клистрона в динамическом режиме на центральной частоте входного сигнала мощностью 300 Вт приведены на рис.9. В верхней части рисунка представлена динамика крупных частиц в системе взаимодействия клистрона в установившемся режиме.

Электроны пучка модулируются по скорости слабым электромагнитным полем входного резонатора и начинают группироваться в сгустки, которые в свою очередь возбуждают поля в промежуточных резонаторах. Электромагнитные поля промежуточных резонаторов усиливают модуляцию электронов по скорости (средняя часть рисунка), что приводит к дальнейшему уплотнению сгустков заряда. Об этом свидетельствует постепенное увеличение на длине прибора амплитуд первой и второй гармоник тока в пучке, приведенных в нижней части рис. 9. В выходном резонаторе электроны сгруппированных сгустков, взаимодействуя с электромагнитным полем в тормозящей фазе, теряют свою скорость, отдавая свою энергию полю. Усиленный таким образом мощный электромагнитный сигнал выводится из выходного резонатора в нагрузку. Значение рассчитанного электронного КПД составило 46%, коэффициент усиления 57дБ, а значение выходной мощности 155кВт. Полученные результаты с хорошей точностью соответствуют экспериментальным данным. Превышение рассчитанной мощности экспериментально полученного значения на 4-5% объясняется тем, что программа рассчитывает электронный КПД, не учитывая потери энергии при ее выводе через выходное окно выходного резонатора.

На рис.10 приведены экспериментальная и рассчитанные различными программами зависимости выходной мощности от входной для клистрона DESY 150МВт с рабочими параметрами, указанными в таблице 2. К графикам, приведенным в работе [16], добавлены данные, полученные по результатам расчетов программой PARSDYNAM.

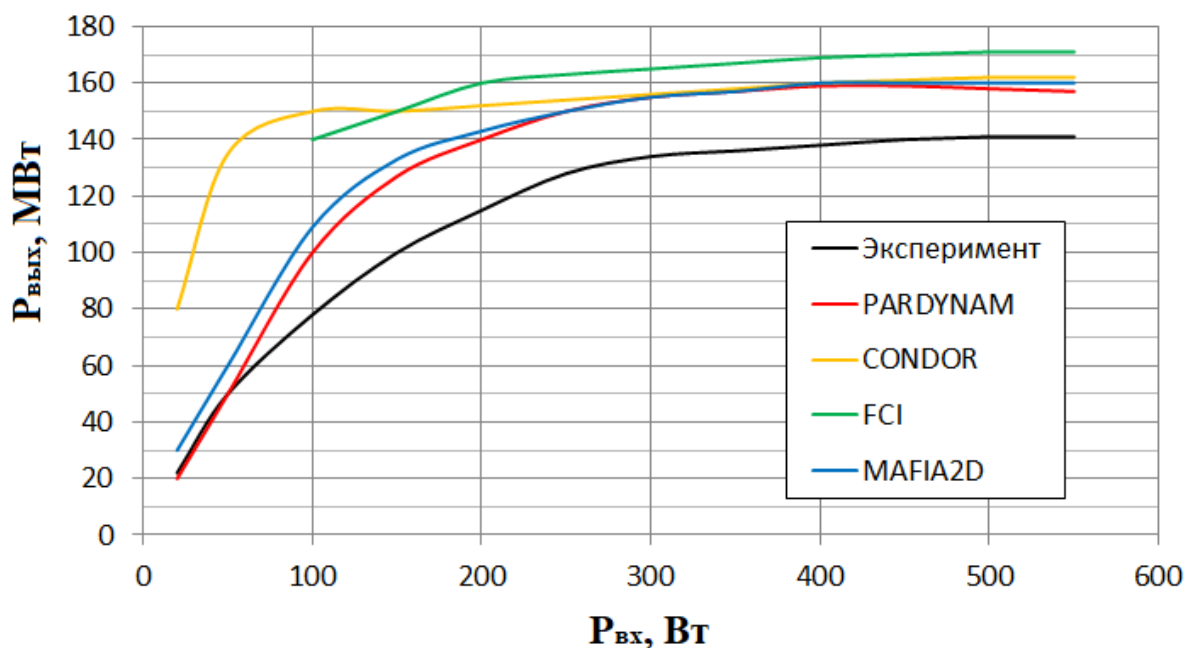


Рис. 10. Экспериментальная и рассчитанные различными программами выходные характеристики клистрона DESY 150 МВт.

Как видно из сравнения этих зависимостей, наиболее близкие к экспериментальным данным показывают результаты, полученные программами PARDYNAM и MAFIA.

4. Заключение

Приведено описание алгоритмов, разработанных для численного анализа мощных электровакуумных приборов с продольным взаимодействием. Алгоритмы объединены в комплекс программ PARS.

Разработанные алгоритмы позволяют проводить теоретические исследования в различных узлах приборов в квазитрехмерном приближении. Комплекс программ PARS включает в себя модули для решения электронно-оптических, электронно-волновых и электродинамических задач.

Представлены результаты тестирования программ комплекса для решения аналитических задач и расчета узлов клистрона DESY 150 МВт, для которого имеются данные эксперимента и результаты расчета с помощью известных программ. Получено хорошее соответствие результатов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

Литература

1. T. Weiland. Time domain electromagnetic Field computation with Finite Difference Methods. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 1996, Vol.9, pp. 259-319.
2. Goplen B., Ludeking D., Smithe D., Warren G. User-configurable MAGIC code for electromagnetic PIC calculation. *Comput. Phys. Commun.*, 1995, Vol.87, pp.54-86.
3. Молоковский С.И., Сушков А.Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. Л., Энергия, 1972, 271 с.
4. Сандалов А.Н., Родякин В.Е. Комплексная программа анализа динамики электронного потока в клистроне. *Межвузовский сборник "Вопросы электронной техники"*, Саратов, 1988, 15 с.
5. Годунов С.К., Рябенький В.С. Разностные схемы. М, Наука, 1978, 440 с.
6. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М., Сов. радио.1966, 454 с.
7. Гинзбург В.Л. Теоретическая физика и астрофизика. М., «Наука», 1981, 504 с.
8. Канавец В.И., Лопухин В.М., Сандалов А.Н. Нелинейные процессы в мощных многорезонаторных клистродах и оптимизация их параметров. *Лекции по электронике СВЧ (3-я зимняя школа-семинар инженеров)*, книга VII, изд. СГУ, 1974, 253 с.
9. Хайков А.З. Мощные усилители на многорезонаторных клистродах. М., Связь, 1964, 168 с.
10. Ramo S. Currents induced by electron motion. *Proc of IRE*, Sept. 1939, p. 584.
11. Рошаль А.С. Моделирование заряженных пучков. М., Атомиздат, 1979, 214 с.
12. Пикунов В.М., Родякин В.Е., Сандалов А.Н. Структура электромагнитных полей релятивистского электронного сгустка в трубе дрейфа. В кн. «Физика и прим. Микроволн», Изд. МГУ, 1991, ч. 2, с. 177-180.

13. Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ. М., Высшая школа, 1990, 334 с.
14. Ильин В. П. Численные методы решения задач электрофизики. М. Наука, 1985, 336 с.
15. Лебедев И.В. Техника и прибора СВЧ, ч. I. М., Выс. школа, 1970, 440 с.
16. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. М., Сов. радио, 1957, 440 с.
17. Sprehn D., Phillips R.M., Caryotakis G. The Design and Performance of 150-MW S-Band Klystrons, SLAC-PUB-6677, Stanford Accelerator Center, September 1994.
18. Becker U., Dohlus M., Lütgert S., Sprehn D., Weiland T. Comparison of CONDOR FCI and MAFIA Calculations for a 150 MW S-Band Klystron with Measurements", Proc. 1995 Particle Accelerator Conference, 1995, vol. 4, pp. 2190-2192.

Для цитирования:

В. Е. Родякин, В. М. Пикунов, В. Н. Аксенов. Комплекс программ для численного анализа электровакуумных приборов клистронного типа. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun19/4/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.6.4