

УДК 681.7

Моделирование электронных приборов клистронного типа

А. В. Трегубов

ЗАО "КуэлСофт", Санкт-Петербург, Россия

В. Ф. Трегубов

ЗАО "Солвер", Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрен программный комплекс ТАУ (траекторный анализ универсальный), предназначенный для моделирования систем формирования электронных потоков. ТАУ использует интегральный метод для расчета электрических и магнитных полей и алгоритм переходного процесса для траекторного анализа. Благодаря высокой точности и универсальности алгоритмов ТАУ позволяет рассчитывать системы формирования электронных потоков для самых различных электровакуумных приборов. Приводятся несколько примеров, демонстрирующих возможности ТАУ в моделировании электронных приборов клистронного типа.

Предложены алгоритмы программного комплекса TAU и применение его для моделирования электронных приборов клистронного типа. TAU — эффективный инструмент для инженеров-разработчиков электронных приборов и установок, он используется также в научных исследованиях для моделирования физических полей и потоков заряженных частиц. TAU* формировался в течение многих лет в соответствии с заказами электронных предприятий России и других стран. Все алгоритмы TAU объединены следующими принципами: интегральный метод для расчета электрических, магнитных и тепловых полей, использование доменов для описания сложных границ, алгоритм переходного процесса для траекторного анализа, стабильный входной язык и файловая структура входной и выходной информации. Эти принципы гарантируют высокую эффективность решения двумерных и трехмерных задач.

Алгоритмы и уравнения TAU

Электрические поля

$$U_m = \sum_{i=1}^N G_{i,m}^0 q_{ij}$$

В двумерном случае (осевая симметрия):

$$G_{i,m} = \frac{\frac{1}{l_{a,b}} \int_a^b G_{i,m}^0 |dl| + \frac{1}{l_{b,c}} \int_b^c G_{i,m}^0 |dl|}{(l_{a,b}(2r_b + r_a) + l_{b,c}(2r_b + r_c)) / 6}, \quad (1)$$

здесь U — потенциал электрода;

q — заряд на участке поверхности электрода;

$G_{i,m}$ — функция источника, полученная интегрированием функции Грина G^0 вдоль двойного участка поверхности электрода (между точками a, b и c);

l и r — длина участка и радиальная координата.

В трехмерном случае вместо (1) используется функция источника, полученная интегрированием функции Грина по равномерно заряженной поверхности прямоугольника площади S :

$$G_{i,m} = \frac{1}{S} \iint G_{i,m}^0 dx dy$$

Магнитные поля

$$\vec{B}_m = \sum_{i=1}^N \vec{G}_{i,m} \vec{j}_i, \quad (2)$$

здесь \vec{B}_m — вектор магнитной индукции в центре домена;

\vec{j} — вектор тока на грани домена;

$$\vec{j} = \text{rot } \vec{M}; \quad (3)$$

\vec{M} — вектор намагниченности в центре домена;

\vec{G} — матрица функции источника;

* Tregubov V. F. Simulation of magnetic fields in electron devices by integral method. Proceedings of International University Conference "Electronics and Radiophysics of Ultra-High Frequencies". St.-Petersburg. 1999.

$$G_z = \int \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rA) dS, \quad G_r = \int \frac{\partial}{\partial z} (A) dS,$$

A — векторный магнитной потенциал, интегрирование — по грани домена.

В трехмерном случае соотношения (2) и (3) преобразуются в более удобное выражение:

$$\vec{B}_m = \sum_{i=1}^N \vec{G}_{i,m} \vec{M}_{o,i}.$$

Уравнения движения

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = q(\vec{E} + [\vec{v} \times \vec{B}]); \quad \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}; \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

здесь q и m — заряд и масса частицы, соответственно;

\vec{v} и \vec{r} — скорость и радиус-вектор частицы, соответственно;

\vec{E} и \vec{B} — напряженность электрического поля и магнитная индукция, соответственно;

m_0 — масса покоя частицы;

c — скорость света.

Динамический траекторный анализ клистрона

ТАУ позволяет моделировать движение заряженных частиц как в статических, так и в переменных полях. Поле зазора резонатора определяется следующим соотношением:

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)_1 U_m \sin(\omega t + \varphi); \quad \frac{\partial U}{\partial r} = \left(\frac{\partial U}{\partial r} \right)_1 U_m \sin(\omega t + \varphi),$$

здесь U_m , ω и φ — амплитуда, круговая частота и фаза напряжения на зазоре.

При расчете напряжения на зазоре на каждом временном шаге определяются:

$$A = \sum_k q_k (\vec{v}_k \vec{E}^1) \cos(\omega t); \quad B = \sum_k q_k (\vec{v}_k \vec{E}^1) \sin(\omega t),$$

здесь q_k и v_k — заряд и скорость частицы, соответственно;

$\vec{E}^1 = -\frac{\text{grad } U}{U}$ — единичная напряженность поля в зазоре.

В конце каждого периода вычисляются амплитуда I_m и фаза φ_i наведенного тока:

$$I_m = \frac{2}{N} \sqrt{A^2 + B^2}; \quad \varphi_i = \arctg\left(\frac{B}{A}\right),$$

здесь N — число временных шагов на период.

Напряжение на резонаторе равно

$$\dot{U}_{res} = \frac{\dot{I}_{nav}^0}{\dot{Y}_{res} + \dot{Y}_b^{k-1}},$$

где $\dot{Y}_b^{k-1} = \frac{\dot{I}_{ind}^0 - \dot{I}_{ind}^{k-1}}{\dot{U}_{res}^{k-1}}$ — электронная проводимость, рассчитанная на предыдущем периоде;

i_{ind}^0 — наведенный ток, рассчитанный при малом напряжении на зазоре;
 U_{res}^{k-1} — наведенный ток и напряжение на зазоре на предыдущем периоде.

Приложения TAU

Кластрон (рис. 1)

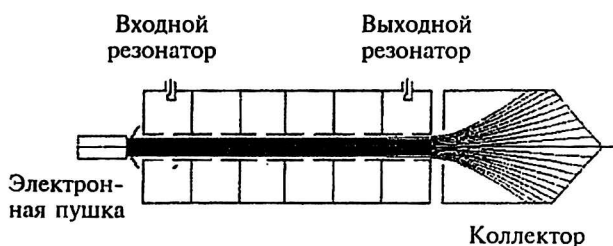


Рис. 1. Схема кластрона

TAU использует оригинальный алгоритм матричной функции источника для расчета электрического поля потока. Для вычисления поля потока матрица умножается на вектор зарядов в ячейках сетки. Время расчета поля потока этим методом менее 1 с. Динамический траекторный анализ производится в реальном магнитном поле. Определяются все параметры прибора, включая распределение мощности на стенках канала. Электронный поток в выходной секции канала показан на рис. 2 для четырех фаз. Можно видеть плотный сгусток электронов (КПД данного прибора близок к 60 %). В этом примере некоторые электроны отражаются переменным полем выходного резонатора и двигаются обратно.

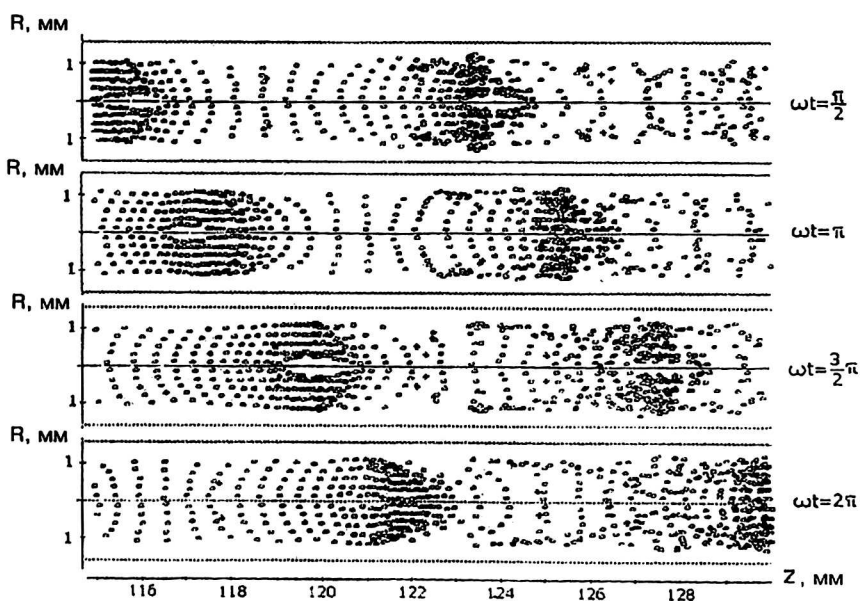


Рис. 2. Электронный поток в выходном резонаторе кластрона:
 • — большие частицы, движущиеся назад

С помощью ТАУ проводилось исследование оригинальной методики настройки резонаторов широкополосного клистрона, предложенной профессором Ю. Бобровским. Результаты показаны на рис. 3.

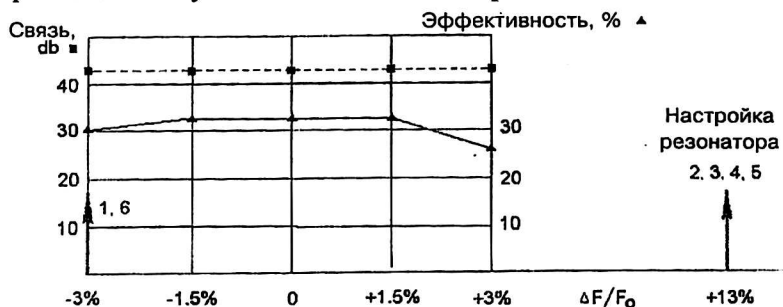


Рис. 3. Амплитудная характеристика широкополосного клистрона

Клистрод

Основная особенность клистрода (рис. 4) — управление катодным током в пушке. Электронная пушка формирует плотные сгустки электронов, которые отдают энергию выходному резонатору. На рис. 5 показан электронный поток в клистроде в четырех фазах.

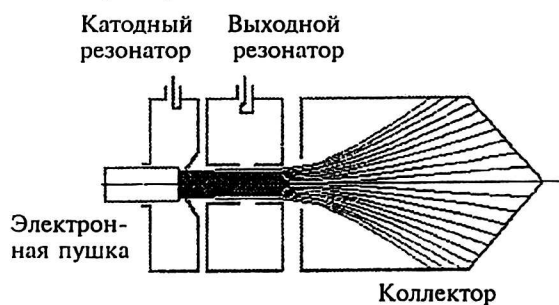


Рис. 4. Схема клистрона

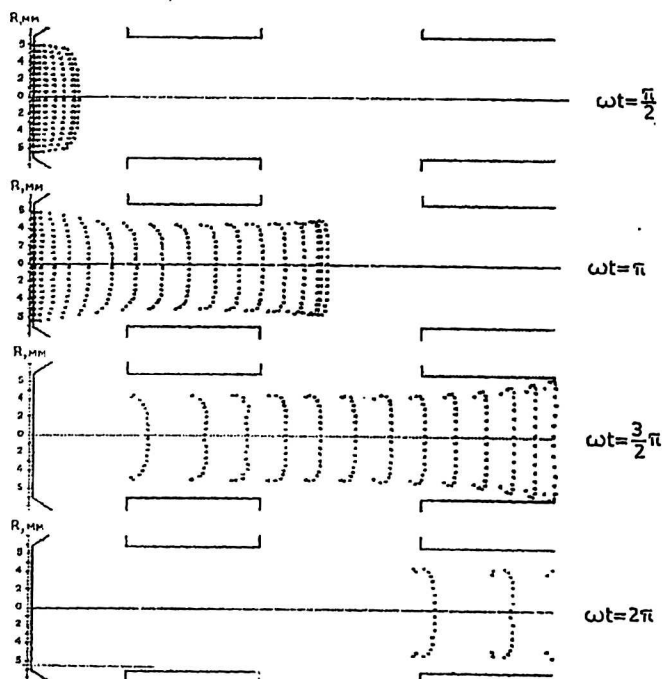


Рис. 5. Электронный поток в клистродe

Ретрон

Основной недостаток клистрода — малый коэффициент усиления, для управления током в клистроде необходима большая мощность. Следующий шаг в усовершенствовании клистрода — триод-клистрон, но усиление триод-клистрода всего на 4—10 децибел больше, чем у клистрода. Иное решение этой проблемы было получено с помощью ТАУ. Был предложен регенеративный прибор, названный нами ретроном (рис. 6). Его конструкция подобна конструкции триод-клистрода, но входной сигнал подается на промежуточный резонатор. Часть выходной мощности по линии обратной связи поступает на сетку электронной пушки. Исследования показали, что для 10-лучевого прибора на частоте 500 МГц, при анодном напряжении 2000 В, сеточном смещении -20 В и сопротивлении автоматического смещения 1000 Ом режим усиления вполне стабилен. Коэффициент обратной связи при этом $K_{b-s} < 0,005$.

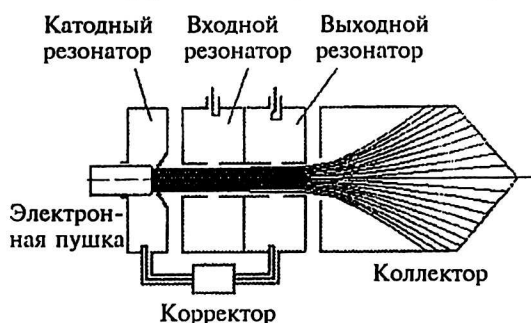


Рис. 6. Схема ретрона

Амплитудная характеристика ретрона показана на рис. 7 (линия 1). Для входного сигнала 200 В усиление по мощности равно 39 дБ, КПД — более 66 %. Разработчик может корректировать амплитудную и частотную характеристики ретрона в линии обратной связи. Амплитудная характеристика прибора, скорректированная с помощью нелинейного сопротивления, показана на рис. 7 линией 2. Величина переменного коэффициента обратной связи для этого режима показана линией 3.

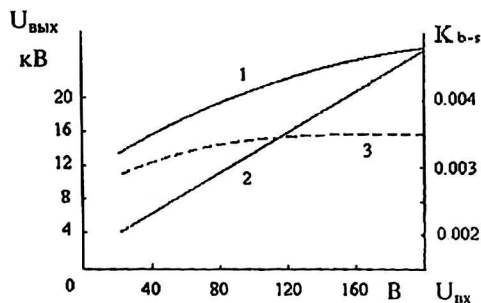


Рис. 7. Амплитудная характеристика ретрона:
1 — $K_{b-s} = 0,0035$; 2 — для переменного K_{b-s} ;
3 — величина переменного коэффициента связи K_{b-s} .

Примеры применения ТАУ показывают, что он позволяет получить важную информацию о потоках заряженных частиц в приборах клистронного типа. Эта информация необходима для проектирования и модернизации старых приборов (клистронов и клистридов) и для исследования новых типов приборов (например ретрона).

Simulation of electronic devices of a klystron type

A. V. Tregubov

QualSoft, Inc., St.-Petersburg, Russia

V. F. Tregubov

Solver, Inc., St.-Petersburg, Russia

The TAG (Trajectory Analysis Generalpurpose) programmatic complex is surveyed. It is intended for simulation of systems of forming the electronic streams. TAG is using an integral method for calculation electrical both magnetic fields and algorithm of transient process for the trajectory analysis. Due to a split-hair accuracy and universality of algorithms TAG allows to calculate systems of forming the electronic streams for most different electrovacuum devices. Reduced are some examples demonstrating the TAG capability in simulation of electron devices of a klystron type.