

# АЛГОРИТМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ РАБОТЫ ОРОТРОНОВ И ИХ МОДИФИКАЦИЙ

Гуревич А. В.

Кафедра вычислительных методов и программирования, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь  
E-mail: gurealex@bsuir.by

*Разработана методика расчета электронного потока в оротронах и их модификациях, предоставляющая гибкие возможности для визуализации траекторий электронов и оптимизации работы прибора в целом и отдельных его элементов.*

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с развитием компьютерной техники, при проектировании СВЧ приборов все шире применяется численное моделирование с автоматической оптимизацией параметров. При этом современные технологии предоставляют невиданные прежде возможности для визуализации полученных результатов.

К числу перспективных генераторов и усилителей СВЧ колебаний миллиметрового и субмиллиметрового диапазона относятся оротрон и его модификации – орбитрон и клиноорбитрон. Исследования и расчеты этих приборов уже в течение длительного времени ведутся на кафедре ВМиП БГУИР. Для этой цели здесь разработан ряд программ, среди которых следует отметить программу «Proptim» и ее усовершенствованную модификацию «Klinotron». Первоначальные версии программы «Proptim» последовательно разрабатывались коллективом авторов на кафедре ВМиП БГУИР и применялись при подготовке ряда статей и докладов на конференциях [1,2]. При этом, однако, не описывались детально алгоритмы и программные средства, используемые для численного моделирования электронного пучка.

Последние версии обсуждаемой программы были разработаны докладчиком (включая создание ее варианта «Klinotron») и предоставляют пользователям новые возможности: учет взаимодействия между электронами пучка; визуализация траекторий отдельных частиц и слоев; моделирование усложненных схем СВЧ приборов, в т.ч. клиноорбитрона. Результаты работы некоторых из них нашли применение в [3–6].

## 1. СХЕМА РАСЧЕТА

Для расчета работы прибора необходимо решить самосогласованную задачу расчета полей в рабочем объеме прибора и проходящего через них электронного пучка. При этом поле представляет собой сумму поля электромагнитной СВЧ волны, постоянного магнитного поля (создаваемого внешним магнитом) и поля электронного пучка.

Электронный поток, как и в предыдущих версиях программы, разбивается на условные «крупные частицы» [5]. Исследуется нерелятивистский случай, поэтому рассматривается действие на электроны лишь электрического поля и постоянного внешнего магнитного поля. При этом взаимодействие между электронами считается статическим, но не чисто кулоновским, т.к. необходим учет зарядов, наводимых электронным пучком в проводниках (соблюдение граничных условий).

Расчет полей выполняется методом сеток [7], отдельно для СВЧ поля волны (основной гармоники) и для статического поля крупной частицы. Чтобы сократить время расчета, поля вычисляются заранее и записываются в файлы, при этом перебираются всевозможные положения крупной частицы (с учетом симметрии системы).

Далее движение крупной частицы описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями (ОДУ) на основе законов электродинамики. Поля интерполируются по ближайшим узлам сетки. При выходе частицы за пределы рабочего объема (столкновения с внутренней поверхностью прибора) она считается поглощенной. В программе предусмотрен контроль на случай, если отдельные частицы затормозятся практически полностью (что означало бы выход за границы применимости модели). Решение ОДУ выполняется методом Рунге-Кутты 4-го порядка [7].

В качестве независимой переменной ОДУ, как и в предыдущих работах [1,2], выбрана координата по оси движения электронного пучка, время же становится вычисляемой переменной для каждой частицы. Такой выбор не только упрощает расчет влияния поля, но и позволяет ограничиться рассмотрением лишь тех крупных частиц, которые вошли в прибор за один период СВЧ волны: в последующие периоды установившееся движение частиц будет точно таким же. Зато он усложняет расчет взаимодействия частиц: обе взаимодействующие частицы должны рассматриваться в один и тот же момент времени. Поэтому для частиц, воздействующих на рассматриваемую, приходится вычислять их поло-

жение в соответствующий момент времени. При этом вычислении их скорости считаются постоянными, что вполне допустимо для таких коротких интервалов. Если разность времен оказывается больше периода волны, берется ее часть, меньшая периода (т.е. пренебрегается взаимодействием далеких частиц, пролет которых разделен временем, большим периода волны).

Энергия, теряемая частицами при взаимодействии с СВЧ полем волны, полагается равной энергии, приобретаемой этим полем. А энергия, приобретаемая полем за период его колебаний, должна быть равна полной энергии поля, деленной на заданную добротность – что позволяет замкнуть самосогласованную задачу [3].

В программе предусмотрена автоматическая оптимизация параметров прибора, при этом в качестве целевой функции оптимизации выбирается КПД – определяемый как доля энергии пучка, переданная полю. Оптимизация выполняется методом Нелдера-Мида.

## II. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассматриваемая программа разработана с помощью IDE Borland Delphi. Большинство исходных параметров модели хранится в файле и выводится на экран в виде таблиц. Пользователь может менять их в интерактивном режиме перед каждым запуском моделирования. Результаты расчетов выводятся на экран в виде текста и графиков. На рис. 1 приведен пример основной вкладки программы.

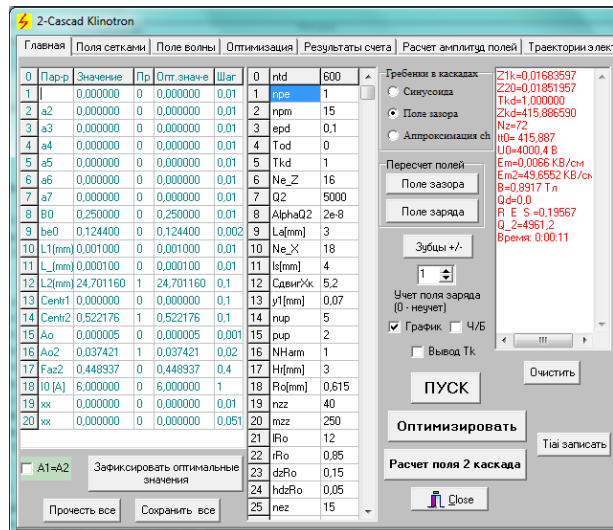


Рис. 1 – Ввод данных и вывод результатов

Программа позволяет визуализировать траектории отдельных «крупных частиц» в форме разноцветных кривых. Ввиду большого количества этих частиц, пользователю предоставляется возможность выбирать номера интересующих его частиц либо целых слоев пучка, тип выводимой информации, а также увеличивать масштаб любого участка построенного графика с помощью мыши (см. рис. 2). Подобная информация дает возможность оценивать эффектив-

ность прибора не только в целом, но и на отдельных этапах (участках гребенки, фазах поля и т.д.), что открывает дополнительные возможности для его усовершенствования.

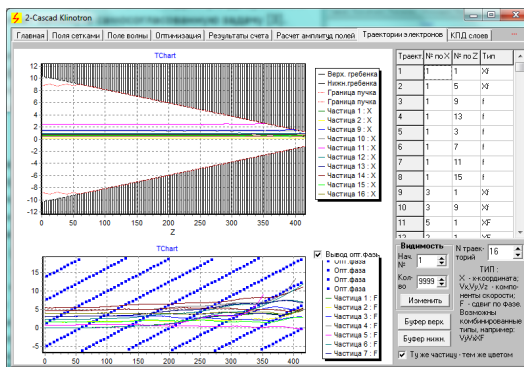


Рис. 2 – Визуализация выбранных траекторий электронов

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные вычислительные алгоритмы и интерактивные методы графической визуализации результатов реализованы программно. Доказана их пригодность для моделирования, ручной и автоматической оптимизации параметров ряда СВЧ приборов, в т.ч. оротронов, орбитронов и клиноорбитронов. В перспективе, возможно расширить их применение и для разработки других типов СВЧ приборов.

1. Кравченко, В. Ф. Оптимизация закона изменения фазовой скорости волны вдоль гребенки оротрона на основе атомарных функций / В. Ф. Кравченко, А. А. Кураев, А. К. Сینیцын, А. И. Шакирин // Электроматнитные волны и электронные системы. – 1999. – Т. 4, № 5. – С. 33–37.
2. Еремка, В. Д. Атомарные функции в задаче оптимизации по КПД двухпучкового оротрона с нерегулярной сдвоенной гребенкой / В. Д. Еремка, В. Ф. Кравченко, А. А. Кураев, В. И. Пустовойт, А. К. Сینیцын // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 2000. – № 3. С. 58–62.
3. Гуревич, А. В. Двухкаскадный орбитрон – усилитель и умножитель частот / А. В. Гуревич, В. Д. Еремка, В. Ф. Кравченко, А. А. Кураев, А. К. Сینیцын // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – № 10. – С. 64–69.
4. Yeryomka, V. D. Klinoorbictron –terahertz range oscillator / V. D. Yeryomka, A. V. Gurevich, A. A. Kurayev, A. K. Sinityn // 2010 INTERNATIONAL KHARKOV SYMPOSIUM ON PHYSICS AND ENGINEERING OF MICROWAVES, MILLIMETER AND SUBMILLIMETER WAVES. – IEEE, 2010. – С. 1-3.
5. Еремка В. Д. Орбитрон-генератор: модель и результаты расчета в диапазоне 180 ГГц / В. Д. Еремка, А. А. Кураев, А. К. Сینیцын // Радиофизика и электроника. – 2013. – Т. 4 (18), № 4. – С. 63–72.
6. Ерёмка В. Д. Применение клиноорбитронного эффекта в вакуумных источниках терагерцевых электромагнитных колебаний / В. Д. Ерёмка, О. Ф. Пишко // Радиофизика та електроніка. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 9–39.
7. Сینیцын, А. К. Современные информационные технологии. Проекционно-сеточные методы решения уравнений математической физики. / А. К. Сینیцын. – Минск: БГУИР, 2004. – 55 с.