

## Алгоритмы и инструментальные средства проектирования мощных клистронов

В.Я. Иванов, А.Е. Левичев, А.М. Бвряков

<sup>1</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

**Аннотация:** В работе изложены методы, алгоритмы и программные комплексы для проектирования мощных многорезонаторных пролётных клистронов. Приведены результаты спроектированного и построенного в ИЯФ СО РАН 50-мегаваттного клистрона S-диапазона. Проведено сравнение расчётных и экспериментальных данных для прототипа 2 данного клистрона. Даны характеристики разработанных оригинальных комплексов программ для моделирования клистронов.

**Ключевые слова:** клистроны, группирование пучков, системы питания ускорителей

### 1. Введение

Клистроны мощностью 50 – 100 мегаватт являются основным источником высокочастотного питания современных ускорителей заряженных частиц. В России клистроны такой мощности ранее не производились. Максимальная импульсная мощность многолучевого клистрона, разработанного в НИИ «Исток» составляла 30 МВт, в то время, как типовая мощность была не более 6 МВт [1]. Клистроны для питания ускорителей приобретались за рубежом, где основными производителями считались фирмы Toshiba, Thales и CPI. В настоящее время, в связи с санкционной политикой Запада, проблема разработки и производства мощных клистронов в России становится особенно актуальной.

В настоящее время ИЯФ СО РАН участвует в строительстве синхротрона 4-го поколения «СКИФ». Также стоит упомянуть проект создания Супер С-тау фабрики [2]. Потребность в клистромах для этих проектов исчисляется десятками, что вызвало необходимость разработки собственного клистрона.

Аналитическая теория клистронов в режиме малого сигнала была разработана в 50-х годах прошлого века. Нелинейная теория мощных клистронов требует привлечения численных методов. История разработки клистронов отражена в обзоре Кариотакаса [3]. Отмечается, что использование аналитических моделей в малосигнальном приближении принципиально непригодно для проектирования мощных клистронов.

Полный цикл проектирования клистронов состоит из многих этапов, среди которых можно выделить следующие:

1. Предварительное проектирование. На этом этапе на основе технического задания, содержащего заданные параметры - рабочая частота, входная мощность ВЧ питания группирователя, выходная мощность клистрона, - определяются основные характеристики прибора – количество резонаторов, габариты клистрона, ток, диаметр и начальная энергия пучка, величина сопровождающего магнитного поля, к.п.д. прибора. Для этого используются аналитические методы проектирования.
2. Оптимизация проектного решения, полученного при предварительном проектировании. На этом этапе определяются расстройки резонаторов группирователя, длины и диаметр трубок дрейфа, полоса рабочих частот, коэффициент усиления, конструкция ввода и вывода мощности, а также допуски на основные варьируемые параметры. Здесь используются упрощённые

- численные модели, которые учитывают продольную и поперечную динамику группируемых сгустков.
3. Детальный расчёт, который включает расчёты электромагнитных полей, оптики заряженных частиц с учётом их собственных полей, тепловые расчёты и расчёты упругих деформаций, как при настройке резонаторов, так и под воздействием тепловых нагрузок. Эти расчёты должны включать такие физические процессы, как мультипактор и темновые токи, которые включают механизмы автоэмиссии и вторичной электронной эмиссии с поверхностями прибора. Такие расчёты требуют предельных параметров вычислительной системы по используемой оперативной памяти и времени расчёта.
  4. Информация, получаемая на каждом этапе проектирования может затем использоваться для новых циклов проектирования при уточнённых входных данных до получения желаемых результатов или получения информации о пределах допустимого варьирования исходных данных.

## 2. Инструментальные средства проектирования клистронов

Клистрон состоит из электронной пушки, системы группирования пучка, магнитной системы и коллектора. Расчёты пушек в двумерном приближении обычно производят с помощью программ EGUN [4], POISSON-2 [5] или SAM [6], созданной позднее на основе POISSON-2. Для трёхмерной геометрии используют MAGIC [7], MICHELLE [8], POISSON-3 [9] или CST Microwave Studio [10]. При расчётах нелинейных магнитных систем можно использовать специализированные программы FEMM [11], ELCUT [12] или универсальные COMSOL [13] и CST Microwave Studio. Для расчёта характеристик резонаторов можно использовать программы MAXWELL-2 [14], SUPERFISH [15], ANSYS HFSS [16] или те же COMSOL и CST Microwave Studio. Расчёты нестационарных электромагнитных полей совместно с движением макрочастиц осуществляют программы KARAT [17], MAXWELL-T [18], MAFFIA [19], а также COMSOL и CST Microwave Studio. Для численного моделирования процессов группирования сгустков заряженных частиц в клистронах разработано множество специализированных программ, обзор которых представлен в работе Лингвуда [20], где приводятся сравнительные данные существующих программных средств, которые реально или потенциально подходят для моделирования параметров клистронов. Из множества этих программ в открытом доступе есть лишь программа AJDISK [21]. Новые методы проектирования клистронов отражены также в работах [22-23].

Это побудило авторов к разработке оригинального комплекса программ для проектирования клистронов. В данный комплекс входят программы POISSON-2 – для расчёта пушек и магнитной системы, MAXWELL-2 – для расчёта параметров резонаторов (обе на основе метода граничных элементов), KlyAnal – для расчёта клистронов на основе нелинейной аналитической теории, KlyOptim – для многомерной оптимизации параметров клистронов на основе метода адаптивного случайного поиска, VIDISK – для расчёта системы группирования пучка на основе одномерной модели движущихся дисков.

В Таблице 1 представлен результат оптимизации параметров клистрона S-диапазона 5045 мощностью 50 МВт путём варьирования частот 4-х резонаторов (в МГц) и длин 5-ти трубок дрейфа (в мм) программой KlyOptim. На Рисунке 1 показана оптика релятивистского пучка с током 415 А и энергией 350 эВ, рассчитанная пакетом POISSON-2, а на Рисунке 2 показан процесс группирования сгустков.

Таблица 1. Оптимизация параметров клистрона

F2opt	F3opt	F4opt	F5opt	L1opt	L2opt	L3opt	L4opt	L5opt	Pout
2854	2876	2835	2938	59.58	59.50	55.24	284.85	90.35	51.19

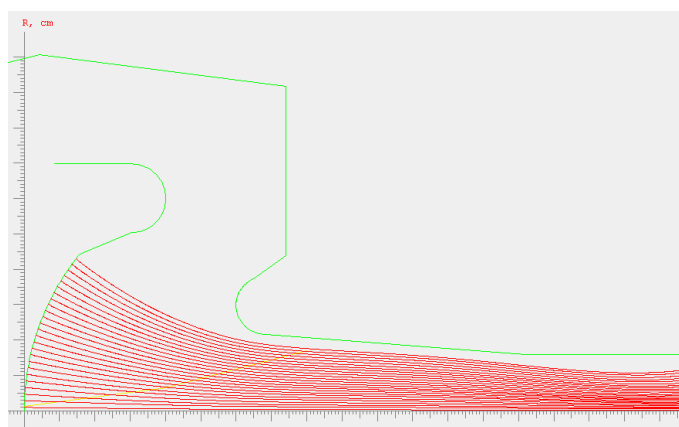


Рисунок 1. Траектории пучка в электронной пушке клистрона.

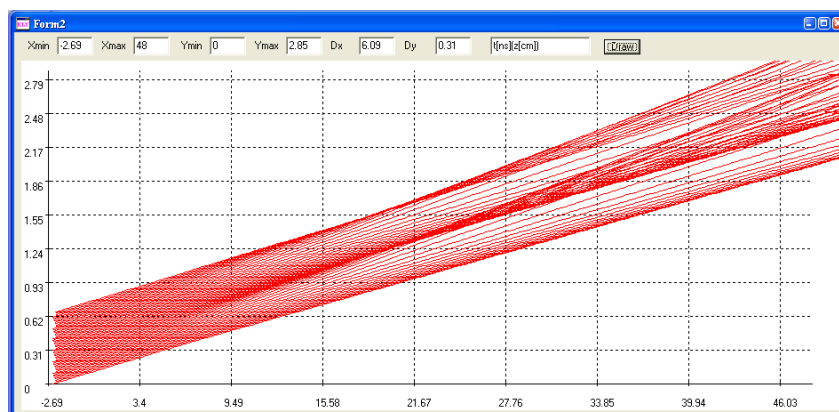


Рисунок 2 Процесс пространственной группировки пучка в сгустки зарядов, рассчитанный программой VIDISK.

В ИЯФ СО РАН были изготовлены два прототипа клистрона 5045, показавшие выходную мощность свыше 50 МВт. На Рисунке 3 показаны сравнительные данные для полосы частот, рассчитанные разными программами. Для прототипа II приведены также результаты экспериментальных измерений.

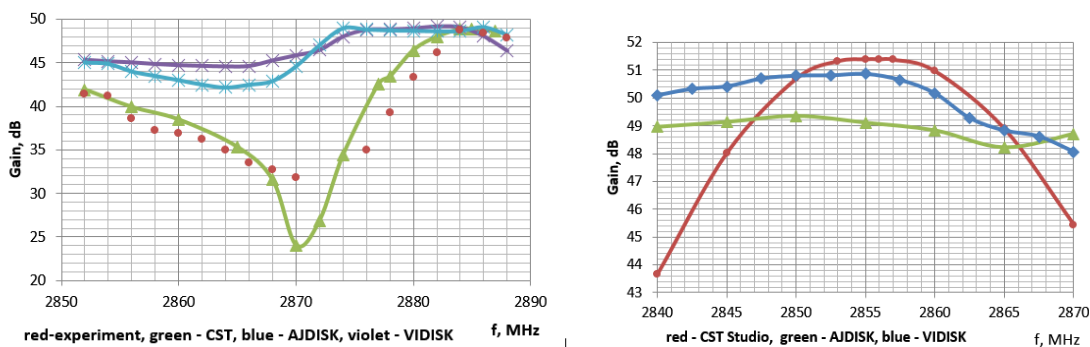


Рисунок 3. Данные для коэффициента усиления клистрона прототипа II (слева) и прототипа III (справа), рассчитанные разными программами.

На Рисунке 4 представлен результат моделирования клистрона в трёхмерном приближении с помощью трёхмерной программы, а на Рисунке 5 показана полоса частот клистрона, рассчитанная с помощью программы KlyAnal.

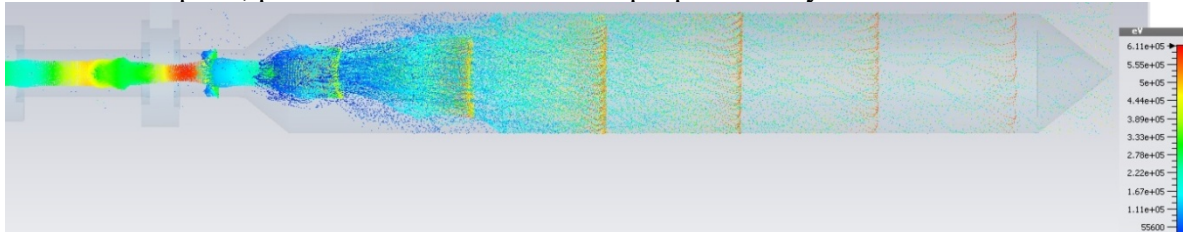


Рисунок 4. Моделирование клистрона от катода до коллектора методом «частиц-в-ячейке».

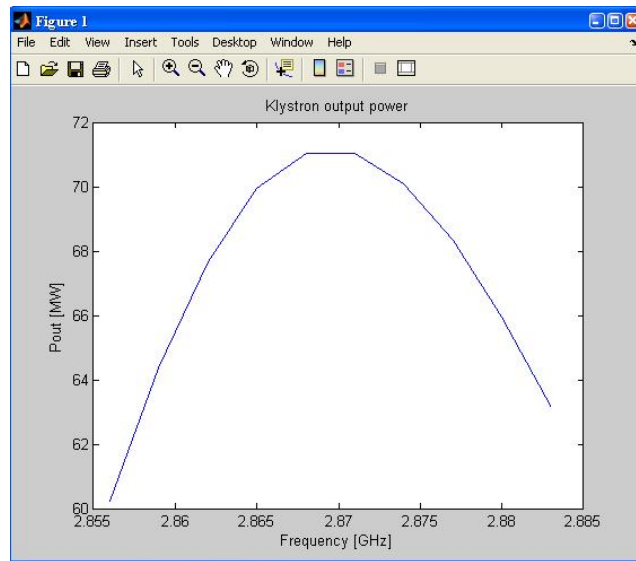


Рисунок 5. Полоса рабочих частот прототипа III мощного клистрона.

### 3. Заключение

Созданные оригинальные пакеты программ в объединении с известными коммерческими программами показывают высокую эффективность проектирования клистронов на всех этапах, включая нахождение оптимальных режимов работы приборов и допусков на варьирование любых его геометрических и физических параметров. Это позволило разработать и изготовить мощный клистрон, который может служить типовым источником СВЧ-энергии для современных отечественных ускорителей заряженных частиц.

#### Список литературы

1. Борисов Л., Щелкунов Г.. Мощные и сверхмощные СВЧ-источники: От клистронов до нового класса приборов// Электроника, 4 (00118) 2012.- С. 102-107.
2. <https://ctd.inp.nsk.su/c-tau/>.
3. Caryotakis G. // High Power Klystrons: Theory and Practice at the Stanford Linear Accelerator Center// SLAC-PUB 10620, 2005, 139 PP.
4. Herrmannsfeld W.B., EGUN an Electron Optics and Gun Design Program// SLAC-Report-331, 1988.
5. Астрелин В.Т., Иванов В.Я. Пакет программ для расчета характеристик интенсивных пучков релятивистских заряженных частиц//Автометрия, 1980, №3.- С.92-99.
6. Тиунов М.А., Фомель Б.М., Яковлев В.П.. SAM — интерактивная программа для расчёта электронных пушек на мини-ЭВМ// Препринт 89-159, Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР. — 66 с.
7. User-Configurable MAGIC for electromagnetic PIC calculations// Computer Physics Communications, 78 (1995) 54-86.

8. Petillo J. et al. The MICHELLE Three-Dimensional Electron Gun and Collector Modeling Tool: Theory and Design// IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 30, no. 3, pp. 1238–1264, June 2002.
9. Ivanov V., Krasnykh A., 3D method for the design of multi or sheet beam RF sources //Proc. Particle Accelerator Conf., Chicago, Illinois, June 18-22, 2001.-p.1213.
10. SCT Microwave Studio. <https://www.mathworks.com/>
11. <https://cxem.net/software/finiteElementMethodMagnetics.php>
12. [http://elcut.ru/feat\\_r.htm](http://elcut.ru/feat_r.htm)
13. <https://www.comsol.ru/video/modeling-magnetic-fields-using-comsol-multiphysics-webinar-ru>
14. Иванов В.Я., В.Е. Теряев, М.М. Карлинер, В.М. Яковлев. Применение метода граничных интегральных уравнений для расчёта ВЧ-резонаторов// ЖТФ, **12**. 1986. – С..1900-1905.
15. Halbach K. and Holsinger R. F., "SUPERFISH -- A Computer Program for Evaluation of RF Cavities with Cylindrical Symmetry// Particle Accelerators 7 (4), 213-222 (1976).
16. <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>
17. Tarakanov V.P., User's Guide for the Code KARAT/Berkeley Research Inc., 1997.
18. Ivanov V.. Full relativistic 2.5D PIC code "MAXWELL-T", Version 2.5. User's Guide, SLAC, 2001.
19. Bartsch M., *et al*, MAFIA release 3: the new version of the general purpose electromagnetic design code family// DESY Internal Report M-90-05K, Deutsches Elektronen-Synchrotron, Hamburg, Germany (1990).
20. Lingwood C., Klystron Simulations. Review/comparison existing tools, Lancaster University, 2015.
21. Jensen A., Fazio M., Neilson J., Scheitrun G.. Developnig Sheet Beam Klystron Simulation Capability in AJDISK// SLAC-PUB-15879, 2002.
22. Егоров Р.В., Гузилов И.А., Масленников О.Ю., Саввин В.Л. БАК-клистроны. Новое поколение клистронов в вакуумной электронике. ВМУ. Сер.3. Физика, автономия, 2019, **1**. С. 36-39.
23. Байков А.Ю. Методы достижения предельных значений КПД в мощных вакуумных резонансных СВЧ приборах О-типа. Дисс. на соискание учёной степени доктора физико-математических наук. Москва, 2017.