

Применение алгоритмов масштабирования при проектировании мощных клистронов

В.Я. Иванов

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск

Аннотация: в Успехи в создании клистронов ИЯФ СО РАН S-диапазона с выходной мощностью 60 МВт поставили перед коллективом новую задачу создания клистронов С-диапазона, поскольку общемировая практика разработки современных ускорителей заряженных частиц имеет тенденцию перехода в сторону более высоких частот. Проектируемый клистрон С-диапазона имеет вдвое большую рабочую частоту 5712 МГц. Использование опыта, накопленного при разработке клистронов на 2856 МГц позволило значительно ускорить этап проектирования нового клистронов применением процедуры масштабирования параметров прибора вместо полного цикла проектирования с дальнейшим применением алгоритма оптимизации ввиду нелинейности процессов группирования пучка.

Ключевые слова: мощные клистроны, алгоритмы проектирования, оптимизация параметров.

1. Введение

В ИЯФ СО РАН разработан клистрон S-диапазона с рабочей частотой 2856 МГц и выходной импульсной мощностью 50 МВт [1]. Весь цикл работ от проектирования до тестирования прибора занял около 7 лет. Так возникло понимание, что разработка столь сложного прибора требует накопления опыта проектирования, тщательных расчётов отдельных узлов и поиска оптимальных режимов работы прибора в целом. Созданный далее софтвер [2] содержал программы, реализующие аналитическую теорию нелинейного каскадного группирования пучка в клистроне [3] – программу анализа [4], программу многомерной оптимизации параметров клистронов [5] и программу на основе одномерной модели движущихся заряженных дисков, представляющих группированный пучок [6]. Предварительные этапы проектирования заканчиваются более детальными расчётами с помощью программы Microwave CST Studio, которые требуют привлечения значительных ресурсов вычислительных систем. В конечном итоге, клистрон был изготовлен и протестирован [7]. Он показал параметры, заявленные в техническом задании, после чего были изготовлены ещё несколько образцов с выходной мощностью 60 МВт для использования их в проекте синхротрона 4-го поколения «СКИФ» [8].

Успехи в создании собственного клистронов S-диапазона поставили перед коллективом новую задачу создания клистронов С-диапазона. Проектируемый клистрон имеет вдвое большую рабочую частоту 5712 МГц. Использование опыта, накопленного при разработке клистронов на 2856 МГц, имеет определённую специфику:

- 1) Вдвое меньшие размеры прибора предъявляют повышенные требования к точности технологии изготовления отдельных элементов СВЧ-тракта (проблема допусков);
- 2) Меньшие габариты при тех же требованиях к импульсной выходной мощности означают большую плотность энергии, что значительно осложняет проблему охлаждения прибора. Это снижает длину импульса и частоту повторения, что, в свою очередь, снижает среднюю мощность на выходе;

Меньшие габариты прибора означают меньший радиус пучка на входе в систему группирования, что требует создания пушки с большей компрессией пучка. Это

неизбежно повышает величину поперечного эмиттанса пучка. Кроме того, при заданной энергетике пучка это означает большую плотность тока, что значительно повышает роль поперечных движений частиц в сравнении с продольными.

2. Предварительное проектирование системы группирования

Перенос опыта проектирования клистронов в область более высоких частот с сохранимем структуры прибора в части числа резонаторов и системы питания целесообразно начинать с процедуры масштабирования основных параметров пучка на входе и параметров резонаторов системы группирования. Такой подход позволяет получить неплохое приближение для основных параметров клистрона на основе простых аналитических формул.

3. Масштабирование параметров клистрона

Если известны параметры работающего клистрона, проектирование нового клистрона с другой рабочей частотой начинается с процедуры масштабирования. Ввиду нелинейности режима работы последних каскадов группирования клистронов большой мощности такая процедура не гарантирует высокой точности и согласованности всех параметров, но является неплохим приближением для начального этапа проектирования.

Процедуру масштабирования начнём с вычисления параметров резонаторов группирующей системы. Для расчёта параметров клистрона на основе одномерной модели движущихся дисков требуется знать 5 основных параметров каждого резонатора: длину зазора d , частоту основного типа колебаний f , собственную добротность Q , волновое сопротивление ρ , коэффициент k , характеризующий формураспределение поля $E(z)$ на оси.

Чтобы понять общие принципы масштабирования рассмотрим начнём с цилиндрического резонатора длиной h и радиусом b . Его собственная добротность выражается формулой $Q = Z_0 \frac{\nu_{01}}{2} \frac{h/b}{1+h/b} \sqrt{\frac{\omega_0}{2\sigma}}$, где Z_0 – волновое сопротивление вакуума равное 376.73 Ом, ν_{01} – первый корень функции Бесселя $J_0(x)$, $\omega_0 = 2\pi f$, σ – проводимость стенок резонатора.

При пропорциональном уменьшении всех размеров резонатора собственная частота его колебаний для основной моды увеличивается обратно пропорционально радиусу, а добротность уменьшается как $1/\sqrt{b}$, поскольку увеличивается поверхностное сопротивление [9] (с. 178). В книге Кацмана [3] (с.339) формулы для с параметрами: длиной h , зазором d , радиусом пролётной трубки a , внешним радиусом r_1 и внутренним радиусом r_2 (Рисунок 1).

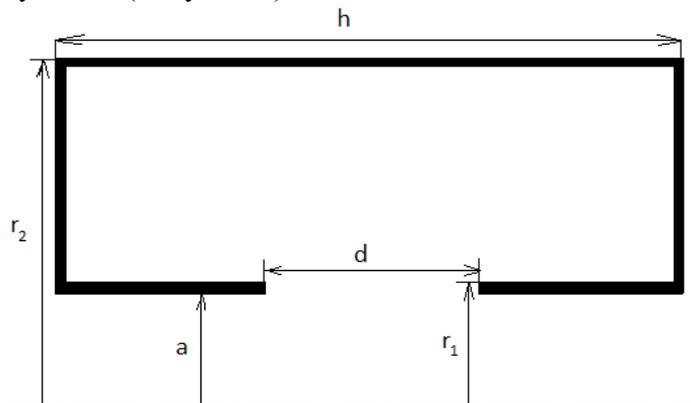


Рисунок. 1. Геометрия торцевого резонатора.

Параметры этого резонатора вычисляются по формулам

$$C = K \frac{r_1^2}{3.6d} + \frac{r_1}{1.8\pi} \left(1 + \ln \frac{2l_c}{d} \right) \quad (1)$$

$$L = 2h \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2)$$

$$l_c = \frac{r_1}{4} \sqrt{\frac{h^2}{r_1^2} + 4 \left(\frac{r_2}{r_1} - 1 \right)^2} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{2\pi c}{\omega} = 2\pi c \sqrt{LC} = \pi a \sqrt{\frac{2h}{d} \left(1 + 4 \frac{d}{a} \ln \frac{h}{d} \right)} \quad (4)$$

$$\rho = Z_0 \sqrt{\frac{L}{C}} = Z_0 \sqrt{\frac{2h \ln \frac{r_2}{r_1}}{K \frac{r_1^2}{3.6d} + \frac{r_1}{1.8\pi} \left(1 + \ln \frac{2l_c}{d} \right)}} \sim Z_0 \sqrt{\frac{hd}{r_1^2}} \quad (5)$$

Здесь коэффициент $K=1$ для зазора с сеткой или $a/r_1 \leq 0.4$ и $K=0.75$ для бессеточного зазора или $d/a = a/r_1 = 0.8$. При проектировании резонатора можно выбрать величины h , r_1 , d и по заданному значению длины волны определить r_2 . Подставив (1)-(3) в (4), получим уравнение

$$\ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{\lambda^2}{8\pi^2 h \left\{ \frac{r_1^2}{4d} K + \frac{r_1}{2\pi} \left[1 + \sqrt{\frac{h^2}{r_1^2} + 4 \left(\frac{r_2}{r_1} - 1 \right)^2} \right] \right\}} \quad (6)$$

Это нелинейное уравнение решается итерационным методом, задав для $x = \frac{r_2}{r_1}$ начальное приближение x_0 и решая уравнение $x_{n+1} = \exp [B(x_n)]$, где $B(x)$ — правая часть уравнения (6).

Коэффициент $k = \frac{\beta_e}{2\sqrt{-\ln M}}$, где M — коэффициент связи электронного потока с резонатором, $M_i = m^* M_{ab}$, $m = \frac{\sin \frac{\zeta_{d0}}{2}}{\frac{\zeta_{d0}}{2}}$, $\zeta_{d0} = \frac{\omega_i d_i}{v_z}$. Угол пролёта зазора ζ_{d0} пропорционален произведению частоты резонатора на длину зазора, поэтому при одновременном изменении этих величин на одну и ту же величину коэффициента масштабирования он изменяется незначительно, в связи с чем можно вначале коэффициент k для проектируемого клистрона взять тем же, что и для исходного, и уточнить его в процессе расчёта нового клистрона после вычисления угла пролёта всех резонаторов.

Масштабирование длин трубок дрейфа осуществляется на основе пропорции $\frac{l_1}{l_2} = \frac{f_2}{f_1}$, где индексы 1 и 2 относятся к исходному и проектируемому клистроном. Подобная пропорция используется при масштабировании частот расстройки группирующих резонаторов $\frac{f_{i,1} - f_{0,1}}{f_{0,1}} = \frac{f_{i,2} - f_{0,2}}{f_{0,2}}$, где i — номер резонатора, а второй индекс обозначает исходный и проектируемый клистроны.

4. Масштабирование параметров клистрона 5045 с рабочей частотой 2856 МГц на частоту 5712 МГц.

Основные геометрические параметры резонаторов исходного клистрона в мм представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры резонаторов

№	h	$2r_1$	$2r_2$	d
1	30.51	55.02	46.70	8.73
2	22.14	63.00	50.68	7.15
3	25.31	61.22	49.80	8.29
4	27.07	63.89	51.13	11.16
5	25.31	66.72	51.92	11.95
6	24.4	66.72	44.5	16.55

При масштабировании параметры h , d , r_1 уменьшались в 2 раза, а величина x вычислялась из уравнения (6). Для исходных параметров 1-го резонатора отношение $x = r_2 / r_1 = 1.15$ уравнение (6) даёт значение r_2 равное 26.85 мм. Рассчитанное по формуле (4) значение частоты равно величине 3592 МГц, что значительно отличается от исходной величины 2856 МГц. Эта частота достигается по аналитической модели при значении $r_2 = 30.17$ мм. Данная картина свидетельствует о том, что форма тороидального резонатора, представленная в книге Кацмана плохо соответствует форме резонатора реального клистрона, поэтому для расчёта клистрона на 5712 МГц необходимы численные расчёты параметров всех резонаторов.

Проведенные расчёты клистрона по аналитической модели для заданных частот и длин труб дрейфа дали значение выходной мощности клистрона 5.5 МВт.

Далее работает программа оптимизации с варьированием частот пассивных резонаторов 2-5.

Результат: $P_{out} = 34.6$ MW при $f_2=5685$, $f_3=5744$, $f_4=5733$, $f_5=5939$. Этот результат можно улучшить, если одновременно варьировать длины труб дрейфа, но такие расчёты нельзя считать достаточно достоверными до получения более надёжных данных о параметрах отмасштабированных резонаторов.

Примеры расчётов полосы частот клистрона ($f_0=5712$ MHz, $I=300$ АА, $U=400$ kV) с помощью программы KlyAnal представлены на Рис. 2 слева. Видно, что процедура масштабирования даёт весьма грубые приближения для частот расстройки резонаторов. Это связано с тем, что сама процедура представляет собой линейное преобразование, тогда как в двух последних каскадах клистрона значительны нелинейные эффекты из-за высокой плотности зарядов сгустков. После оптимизации с варьированием частот резонаторов характеристики клистрона значительно улучшились в части выходной мощности, коэффициента усиления и КПД прибора. На Рис.2 справа показаны те же выходные параметры оптимизированного клистрона: $f_2=5641$, $f_3=5731$, $f_4=5734$, $f_5=6110$ MHz, $L_1=28.39$, $L_2=27.48$, $L_3=27.50$, $L_4=131.10$, $L_5=46.39$ mm.

Эти данные находятся в хорошем соответствии с расчетами более полной модели по программе CST Microwave Studio, приведенными ниже. Заметим, что увеличение радиуса пучка с 5.1 мм до 6 мм и труб дрейфа с 5.75 мм до 7.5 мм дают возможность увеличения выходной мощности клистрона более чем на 20%.

Одномерная модель, на самом деле, позволяет предсказать максимально достижимую выходную мощность клистрона в предположении, что траектории частиц пучка «вморожены» в магнитное поле, т.е. в отсутствие поперечных пульсаций пучка. Если учитывать эти движения, необходимо подобрать такой профиль сопровождающего магнитного поля, при котором потери частиц на стенках канала

группирования были бы минимальными.

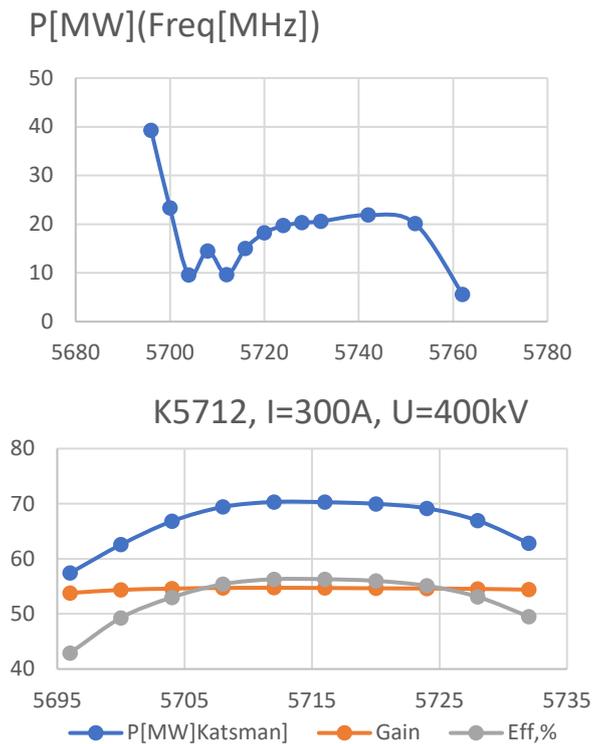


Рисунок 2. Полоса частот для набора отмасштабированных частот резонаторов, рассчитанная программой KlyAnal [5] (слева) и для оптимизированных частот резонаторов и длин труб дрейфа, рассчитанная программой KlyOptim [6] (справа). Выходная мощность – голубой цвет, коэффициент усиления – оранжевый, КПД – серый.

5. Заключение

Расчеты системы группирования методом «частиц-в-ячейке» показывают, что поперечный фазовый объем пучка получается достаточно большим вследствие дробового шума. При увеличении напряженности сопровождающего магнитного поля с целью уменьшения токооседания на стенках поперечный фазовый объем перекачивается в продольный, что ухудшает группирование пучка и приводит к уменьшению выходной мощности. В данной ситуации наиболее приемлемым было бы объединение использования метода «трубок тока» для расчета пучка в пушке и метода «частиц-в-ячейке» для расчета динамики пучка в системе группирования. Это становится возможным при создании программного «комбайна», объединяющего возможности программы POISSON-2 [2], основанной на использовании алгоритмов метода интегральных уравнений для расчета полей и метода трубок тока для расчета релятивистских пучков с программой MAXWELL-T [11], реализующей расчеты системы уравнений Максвелла методом конечных разностей и метода «частиц-в-ячейке» для релятивистских пучков заряженных частиц.

Список литературы

1. Levichev A., Barnyakov A., Samoylov S., Nikiforov D., Ivanov V., Arsenyeva M., Chermenev D., Pavlov O., Pivovarov I. Development of the S-band klystron at BINP SB RAS. XXVIII Int. Conf. RuPac'23, 11-15 Sept., 2023, Novosibirsk, Russia.
2. Иванов В. Я. Алгоритмы проектирования и программы для расчёта многорезонаторных пролётных клистронов. – Препринт ИЯФ 2023-03. – Новосибирск, 2023. – 36 с.
3. Кацман Ю.А. Приборы сверхвысоких частот. Т. 2. Высшая школа. М.: 1974.

4. Иванов В.Я., Программа на ЭВМ KlyAnal для численного моделирования мощных пролётных клистронов на ранних этапах проектирования. Сертификат гос. регистрации №2024614467.2024.
5. Иванов В.Я., Программа на ЭВМ KlyOptim для многомерных задач оптимизации на основе метода адаптивного случайного поиска. Сертификат гос. регистрации №2024669039.13.08.2024.
6. Иванов В.Я., Программа VIDISK для расчёта параметров клистронов по одномерной модели движущихся дисков. Сертификат государственной регистрации № 2024682165.18.09.2024.
7. Levichev A., Barnyakov A., Samoylov S., Nikiforov D., Ivanov V., Arsenyeva M., Chekmenev D., Pavlov O., Pivovarov I. Development and testing of high-power S-band klystron at BINP SB RAS. Nuclear Science and Techniques, **35**, 7, 2024. DOI:10.1007/s41365-024-01471-9.
8. Andrianov A., Arsenyeva M., Barnyakov A., Chekmenev D., Levichev et al. 200 MeV Linac Development for the SKIF Light Source Injector. XXVIII Int. Conf. RuPac'23, 11-15 Sept., 2023, Novosibirsk, Russia.
9. Григорьев А.Д., Электродинамика и техника СВЧ. – М.: Высшая школа, 1990.
10. Colby E., Ivanov V., Li Z., Limborg C., Simulation Issues for RF Photoinjectors. SLAC-PUB-11494, Sep 26, 2005.