

Многолучевые клистроны: численный анализ предельно достижимых значений электронного КПД

Д.А. Комаров, Е.П. Якушкин, Ю.Н. Парамонов

АО «НПП «Горий»

Аннотация: в работе представлены результаты численного моделирования 6-и резонаторного 30-и лучевого клистрона. Показано, что использование классической схемы, без резонаторов второй и третьей гармоники, позволяет получить электронное КПД не хуже 82%. Предложен аналог тейперинга и способ управления третьей гармоникой конвекционного тока для получения оптимального сгустка электронного пучка.

Ключевые слова: многолучевые клистроны, КПД, резонаторы, СВЧ

1. Введение

В самое последнее время наметился большой интерес к вопросам повышения КПД сверхмощных клистронных усилителей гражданского применения. В ряде работ рассматриваются новые методы группировки электронного потока, использование резонаторов не только второй, но и третьей гармоники и т.д. (к примеру, [1]). Появление новых методов группирования пучка, безусловно, представляет интерес в СВЧ электронике, однако необходимо отметить, что предложенные способы не всегда могут быть использованы в принципе в многолучевых клистроны (МЛК). Действительно, радиальные размеры МЛК определены не столько электродинамическими свойствами резонатора, сколько необходимыми требованиями на катодный узел: плотность тока катода не может превышать 20 А/см^2 . Этот важный параметр сразу же определяет диаметр катода МЛК, а необходимость конструктивного запаса для конструкций с числом лучей более 18 накладывает жесткие ограничения на диаметр обоймы. В подобных условиях конструктивно создать резонатор второй гармоники сложно, а третьей почти невозможно. Кроме того, используемые, как правило, кольцевые резонаторы не имеют сколь-нибудь эффективных методов настройки прибора в динамическом режиме, но имеют жесткие допусковые требования на значения частоты. Минимальные отклонения приводят, фактически, к исключению данных резонаторов из пространства взаимодействия и резкому спаду КПД. В этой связи большой интерес представляет анализ предельного КПД для классической схемы клистрона, под которой будем подразумевать пространство взаимодействия с резонаторами только основной частоты.

2. Постановка задачи

Численный анализ пролетного клистрона осуществлен в программе KLYS-5.63. Программа KLYS-5.63 предназначена для расчета выходных характеристик одно- и многолучевых пролетных клистронов с одноззорными (ОЗР) и симметричными двухззорными (ДЗР) резонаторами. Конструкции рассчитываемых клистронов могут содержать 15 тороидальных и кольцевых резонаторов, собственные частоты которых могут располагаться в диапазонах первых трех гармоник входного сигнала, каждый резонатор может иметь многозвенную фильтровую систему.

Принцип действия клистрона (далее везде подразумевается пролетный клистрон) заключается в том, что заряженные частицы прямоточного электронного луча (или совокупность лучей), ускоренные постоянным напряжением U_0 , двигаются в

пролетном канале и последовательно взаимодействует с СВЧ полями в зазорах каждого резонатора. При своем движении частицы (каждого СВЧ периода) постепенно группируются и в каждом i -ом зазоре наводят ток $I_{\text{нав } i}$, который возбуждает в резонаторе СВЧ поле, пропорциональное наведенному напряжению $U_{\text{нав } i}$. Амплитуда поля тем больше, чем выше степень группировки частиц.

Программа KLYS-5.63 реализует достаточно сложный и разветвленный алгоритм расчета. Используется одномерная дискретная трехпериодная модель электронного пучка с независимой переменной время t . Частицы электронного пучка представляют собой диски конечной толщины, на длине λ одного периода располагается N_{part} частиц (максимально $N_{\text{part}} = 200$). На каждом шаге λ/N_{stp} (максимально $N_{\text{stp}} = 250$) интегрирования релятивистского уравнения движения для каждой частицы рассчитываются внутреннее (кулоновское) $E_q(t_0, t)$ и внешнее $E_i(t_0, t)$ электрические поля. Кулоновское поле вычисляются из решения 2-мерного уравнения Пуассона методом быстрого преобразования Фурье для двух дисков, отстоящих друг от друга на длине 3λ и, затем, суммируется (с учетом периодизации) по всем частицам, учитывая их взаимное расположение. По мере увеличения времени t , пучок частиц из 3-х периодов продвигается от первого резонатора к последнему, при этом последовательно в каждом i -м резонаторе ($1 \leq i \leq N_{\text{рез}}$) решается задача определения самосогласованных значений наведенных токов $I_{\text{нав } i}$ и напряжений $U_{\text{нав } i}$ на его зазорах. Если электродинамические характеристики резонаторной системы (резонатор с учетом наличия фильтра, внешней нагрузки и источника входного сигнала) моделировать с помощью схем с сосредоточенными элементами, то самосогласованная задача сводится к итеративному решению матричного уравнения. В наиболее простом случае (для возбуждения промежуточного резонатора) это уравнение имеет вид закона Ома:

$$U = Z \cdot I \quad (1)$$

Использование модели электронного пучка с независимой переменной время t позволяет рассматривать возвратные и колебательные движения частиц в выходном резонаторе. Это, с одной стороны, усложняет сходимость итерационного процесса, но, с другой стороны, повышает точность и достоверность расчета КПД клистрона при больших амплитудах в выходном резонаторе, что подтверждено многолетней положительной практикой использования KLYS-5.63 в разработках, осуществляемых АО «НПП «Торий».

В качестве модельного клистрона была выбрана 6-и резонаторная схема, позволяющая обеспечить коэффициент усиления более 50 дБ. Величина микропереванса на луч была ограничена значением 0.3, что определялось необходимой предельной плотностью тока катода. В типичных конструкциях электронных пушек катоды располагаются аксиальносимметрично относительно продольной оси симметрии пушки и общее число катодов (при «плотной упаковке») выбирается из следующего ряда: 6, 12, 18, 36, 60... т. е. в каждом следующем ряду число катодов увеличивается на 6. При этом увеличение числа рядов свыше двух-трех нежелательно, так как это приводит к увеличению перепада характеристического сопротивления между рядами электронных лучей и снижению эффективности группирования в клистроне. Исходя из этих соображений, было выбрано для проектируемого клистрона двухрядное расположение катодов с их общим числом равным 30 (12 катодов в одном ряду и 18 во втором). Такое количество электронных лучей позволяет работать в интервале анодных напряжений (95 – 97) кВ с величиной плотности тока катода не более 20 А/см² и суммарным током катода 264 А.

Выбранные параметры электрического режима на данном этапе расчетов позволяют определить внутренние диаметры труб дрейфа и ширину ВЧ зазоров

резонаторов.

Исходя из опыта разработки подобных клистронов, указанные размеры резонаторов выбираются из следующих условий:

$$\gamma R_t = 0,6; \gamma d = 1,5,$$

где R_t – внутренний радиус трубы дрейфа, d – ширина высокочастотного зазора, γ – фазовая постоянная.

Фазовая постоянная γ вычисляется по формуле:

$$\gamma = \frac{\omega}{V_0} = 1,06 \cdot 10^{-5} \frac{f}{\sqrt{U}} \left[\frac{\text{рад}}{\text{м}} \right] \quad (2)$$

где ω – круговая рабочая частота, V_0 – скорость электрона [м/с], U – анодное напряжение [В].

Прототипом выбранной конструкции был принят 30-и лучевой клистрон КИУ-279, выпускаемый серийно АО «НПП «Торий». Данный клистрон работает в диапазоне частот 2856 ± 5 МГц и имеет выходную мощность не менее 3 МВт при напряжении катода не более 45 кВ и токе катода не более 150 А. Результаты сравнения расчета амплитудной характеристики с экспериментом (рисунок 1) позволяют утверждать о высокой достоверности результатов расчета.

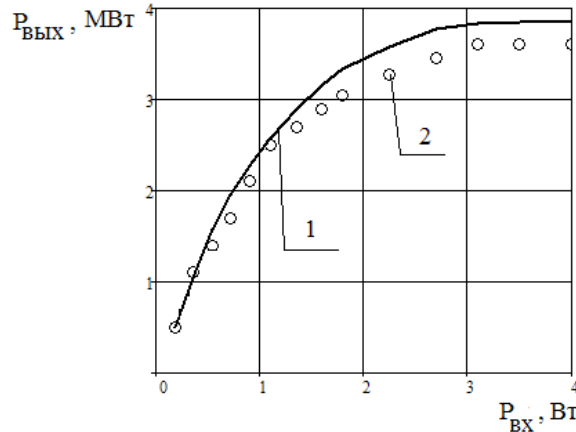


Рисунок 1. Амплитудная характеристика КИУ-279. 1 – моделирование KLYS-5.63, 2 – эксперимент

Как правило, критерием максимально возможного электронного КПД выбирают достижение предельного значения амплитуды первой гармоники конвекционного тока, при минимальном разбросе скоростей электронов в сгустке.

Задача оптимизации многорезонаторного клистрона по данному критерию не является тривиальной в связи с большой вариативностью параметров (пролетные длины, расстройки частот, нагруженная добротность входного и выходного резонатора и т.д.). Была осуществлена следующая методическая схема моделирования: последовательно рассчитывались двух резонаторный, трех резонаторный и т.д. до шести резонаторного, клистроны. Это позволило проводить последовательную оптимизацию параметров взаимодействия с минимальным числом переменных, принимая их, в дальнейшем, неизменными, при увеличении числа резонаторов.

3. Результаты и обсуждения

Результаты моделирования классической схемы клистрона привели к классическому набору параметров так называемой упорядоченной группировки: предвыходной резонатор отстроен от центральной частоты вверх диапазона на максимальную величину, наибольшая длина пролета соответствует пролету между

четвертым и пятым резонатором. Оптимальная добротность выходного каскада составила 30 единиц. При данных параметрах численное моделирование дало значение КПД 75.4%, что хорошо соответствует результатам работы [2]. Следующим шагом для повышения КПД, предполагается использование резонаторов второй и даже третьей гармоники [1], что позволяет поднять расчетное значение вплоть до 82%. Очевидно, однако, что в электронном потоке повышение амплитуд первой, второй и третьей гармоники возможно в пролетных пространствах, свободных от СВЧ полей. Анализ показал, что увеличение длины пролетной трубы между третьим и четвертым резонатором приводят к росту амплитуд трех гармоник конвекционного тока вплоть до оптимального значения, что позволило поднять КПД до 77.7% (рисунок 2).

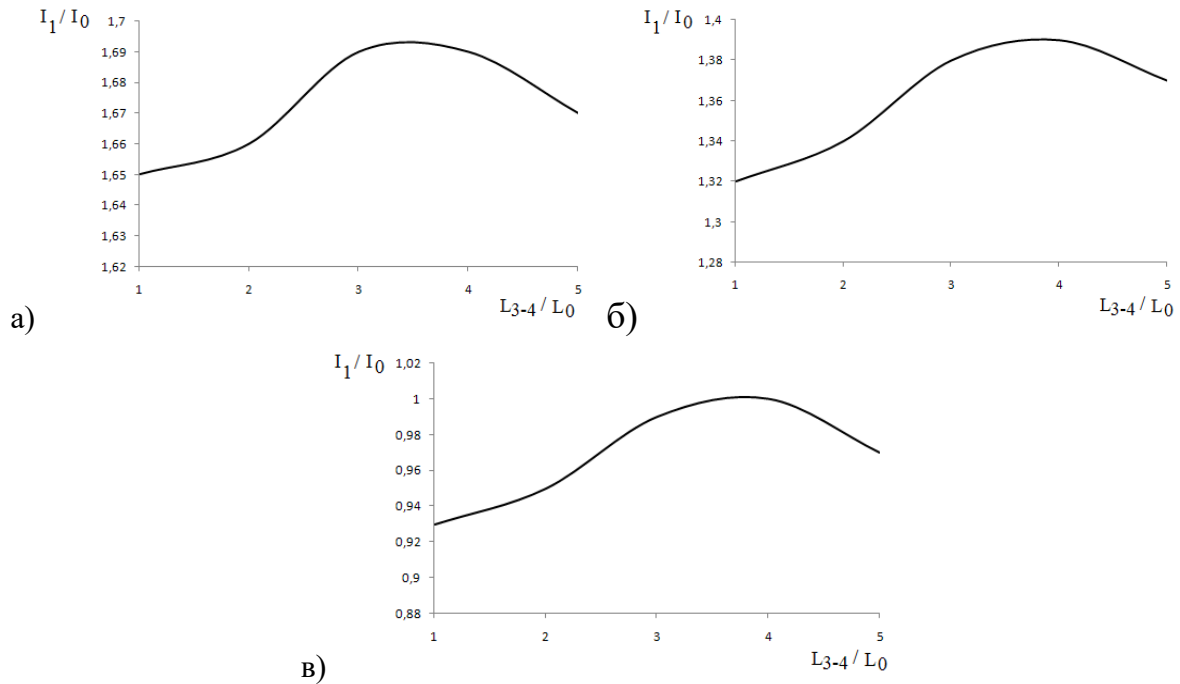


Рисунок 2. Зависимость первой (а), второй (б) и третьей (в) гармоники от длины пролета между 3-м и 4-м резонатором.

Попытки дальнейшего улучшения электронного КПД не дали результата, при условии того, что модель сохраняет классическую структуру. Однако, величины амплитуд гармоник конвекционного тока уже являются предельно возможными [2], что позволяет говорить о достижении оптимальных параметров. Тем не менее, достижение оптимального гармонического состава не говорит о качестве сгустка, т.е. об энергетическом разбросе. В [2] предполагалось, что оптимум первой гармоники уже определяет минимальный разброс по энергии в сформированном сгустке. Численный анализ показал, что в данном случае вторая и третья гармоника конвекционного тока фактически вплоть до 4-го резонатора минимальна, и только последние пролеты поднимают их амплитуду до значения 1,4 – 0,99. Для того, чтобы обеспечить экспоненциальный рост уровня второй и третьей гармоники, четвертый резонатор был «отстроен» вверх по частоте выше, чем предвыходной (инверсия частот). Кроме того, был использован «тейперинг» – по вычисленным значениям наведенного напряжения на зазорах были скорректированы значения угла пролета третьего, четвертого и пятого резонаторов, соответствующие торможению электронного потока. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.

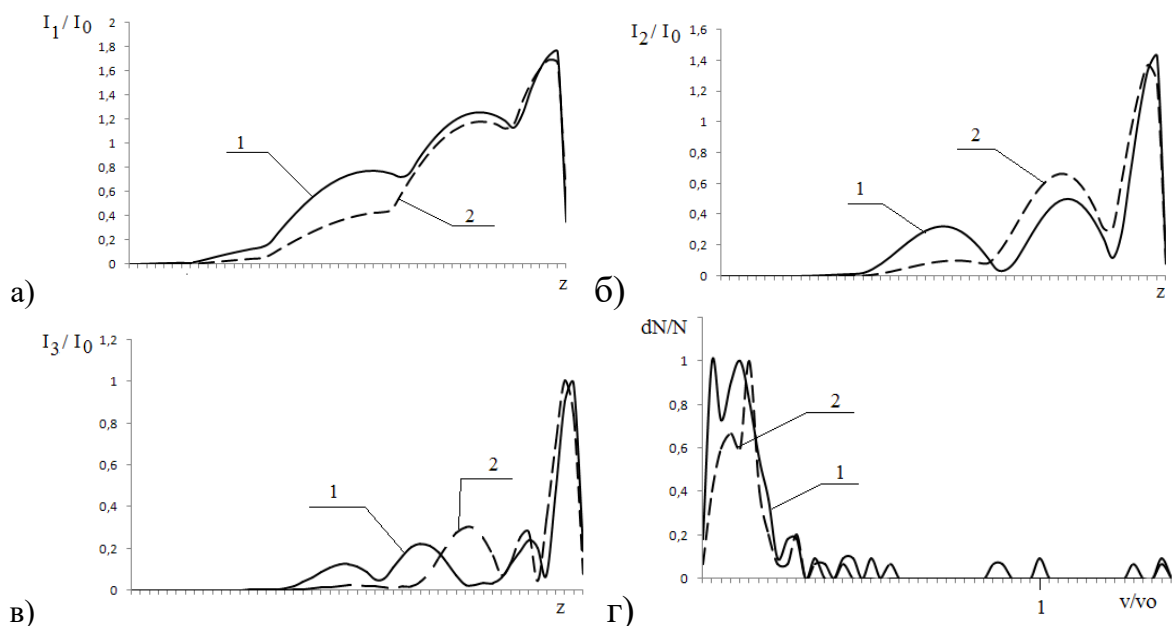


Рисунок 3. Изменение формы первой (а), второй (б) и третьей (в) гармоники конвекционного тока для классического (1) и инверсного (2) пространства взаимодействия. Энергетический спектр г) для классического (1) и инверсного (2) пространства взаимодействия.

Прежде всего, обращает внимание то, что максимальные значения амплитуд гармоник тока для классического варианта настройки и предложенного «тейперинга» и инверсии резонаторов мало отличаются по абсолютному значению. Однако, вторая и третья гармоника существенно выше во всем пространстве взаимодействия. Это приводит к тому, что энергетический спектр пучка в зазоре выходного резонатора представляет собой, фактически, моноэнергетическое распределение, симметричное относительно некоторой средней скорости, в котором более 80% электронов имеют минимальный энергетический разброс, чего не наблюдается для классической схемы – спектр энергий не симметричен относительно центра сгустка. Расчет амплитудной характеристики (рисунок 4) показывает достижение КПД в нагрузку 82.4%.

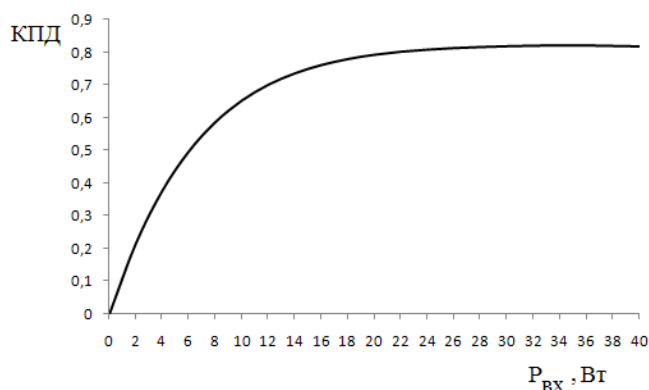


Рисунок 4. Амплитудная характеристика варианта пространства взаимодействия с инверсией и «тейперингом».

4. Заключение

Многочисленные результаты повышения КПД МЛК, как правило, связанные с использованием резонаторов второй и третьей гармоники конструктивно не годятся для приборов в С и Х диапазонах. В работе показано, что использование классического построения пространства взаимодействия с резонаторами основной частоты, но при

учете изменения фазы пролета пучка по мере торможения в пространстве взаимодействия, а так же, используя метод инверсии резонаторов, при котором наибольшую отстройку по частоте имеет один из промежуточных резонаторов, а не предвыходной, что позволяет обеспечить медленное увеличение амплитуд гармоник конвекционного тока по всей длине прибора и получить минимальный разброс скоростей в электронном сгустке, позволяет обеспечить КПД 82%, что не уступает параметрам работы [1].

Список литературы

1. R. Marchesin et al. 20 MW High-Efficiency L Band Multi – Beam Klystron for CLIC Drive Power. IVEC 2017, pp. 217.
2. В.А. Кочетова, В.И. Кучугурный, С.В. Лебединский, А.В. Малыхин, Д.М. Петров. Пролетный клистрон с высоким КПД. Некоторые вопросы теории и эксперимент. РиЭ, 1981. - Т. XXVI, № 1. – С. 139 – 145.