

УДК 621.385.623.2

*О.А. Горлин, В.Ю. Мишин, В.К. Федяев, А.А. Шишков***ПРОЕКТИРОВАНИЕ МНОГОЛУЧЕВОГО АВТОГЕНЕРАТОРА СВЧ
НА ДВУХАЗОРНОМ РЕЗОНАТОРЕ**

С использованием программ разного уровня проведено проектирование многолучевого генератора на двухазорном резонаторе с учетом реального распределения электрических полей в зазорах по радиальной и продольной координатам. Показано, что за счет неоднородности полей в реальной конструкции электронный КПД автогенератора на нулевой зоне нулевого вида по сравнению с однолучевой конструкцией уменьшается с 39 % до 34 % при КПД в нагрузку 31 %.

Ключевые слова: автогенератор, СВЧ, коэффициент полезного действия, двухазорный резонатор.

Введение. В последнее время в связи с широким применением микроволнового излучения для промышленных и технологических целей появилась потребность в источниках СВЧ энергии средней и большой мощности простой конструкции с достаточно высоким КПД. Наиболее простым по конструкции автогенератором является монотрон. Для монотрона классической конструкции с однородным полем предсказывается электронный КПД 18 % [1,2]. Для монотрона сложной конструкции со ступенчатым изменением поля численным моделированием получен электронный КПД 47.5 % [3]. Но при этом амплитуда напряжения на второй ступени необычно высока, она в 7.5 раза больше ускоряющего напряжения.

Альтернативой монотронным конструкциям может быть генератор на двухазорном резонаторе, работающий на π - или 0-виде колебаний с амплитудами напряжений на зазорах, близкими к ускоряющему напряжению. Получены уравнения, разработана методика, составлены программы для исследования автогенератора на двухазорном резонаторе. В нелинейном режиме численным моделированием на π -виде для первой зоны колебаний был получен максимальный электронный КПД 51 % [4], для нулевого вида 0-зоны КПД составил 39 % и для 1-й зоны – 57 % [5]. Для конструкции с однородным полем в зазорах эти результаты можно считать предельными. В дальнейшем будем исследовать нулевую зону, потому что, как показали дальнейшие расчеты, на первой зоне π - или 0-вида резонатор в сантиметровом диапазоне длин волн будет иметь слишком малое характеристическое сопротивление (около

10 Ом) из-за малого объема индуктивной части. В реальной многолучевой многорядной конструкции условия взаимодействия электронных потоков с полем будут сложнее. Из-за изменения высокочастотного поля по радиусу зазора электроны лучей разных рядов взаимодействуют с напряжениями разной амплитуды. Наиболее значительно это проявляется при большом относительно длины волны диаметре пролетной многолучевой трубы. Кроме того, из-за изменения поля по продольной координате зазора изменяются оптимальные расстояния между зазорами, полученные для однородного по длине поля. В результате оптимальные по КПД режимы для лучей разных рядов оказываются разные. Усредненный по всем лучам максимальный КПД будет соответствовать некоторому компромиссному режиму.

Целью работы является исследование влияния этих факторов на КПД многолучевого автогенератора и разработка методики проектирования области взаимодействия с их учетом.

Расчетные соотношения. Общий КПД находится как произведение электронного и контурного КПД:

$$\eta = \eta_e \eta_k. \quad (1)$$

Расчет электронного КПД проводится через наведенный ток:

$$\eta_{e0} = \frac{P_{ea}}{I_0 U_0} = \frac{1}{2} \xi I_1^{nop}, \quad (2)$$

где P_{ea} – активная составляющая мощности, I_0 – ток луча, U_0 – ускоряющее напряжение, $\xi = U_m / U_0$ – нормированная амплитуда переменного напряжения, I_1^{nop} – относительная

амплитуда активной составляющей первой гармоники наведенного тока. Расчет производится для лучей, расположенных в двух рядах на окружностях разного радиуса. Общий электронный КПД определяется по формуле:

$$\eta_e = \frac{\eta_{внутр} n_{внутр} + \eta_{внеш} n_{внеш}}{n_{внутр} + n_{внеш}}, \quad (3)$$

где $\eta_{внутр}$ и $\eta_{внеш}$ – электронный КПД для лучей внутреннего и внешнего рядов, $n_{внутр}$ и $n_{внеш}$ – число лучей внутреннего и внешнего ряда. Расчет контурного КПД ведется по формуле:

$$\eta_k = 1 - \frac{Q_n}{Q_0} = 1 - \frac{R_{эн}}{R_0} = 1 - \frac{\xi^2 R_0}{2\eta_e Q_0 \rho}, \quad (4)$$

где $R_{эн} = Q_n \rho = \frac{\xi^2 R_0}{2\eta_e}$ – эквивалентное нагруженное сопротивление резонатора, $R_0 = Q_0 \rho$ – эквивалентное сопротивление резонатора, Q_n , Q_0 – нагруженная и холодная добротность резонатора, $\xi = \xi_1 + \xi_2$ – общее нормированное напряжение, $R_0 = U_0 / I_0$ – сопротивление луча, ρ – характеристическое сопротивление резонатора.

Таким образом, из формул (1) и (4) получим:

$$\eta = \eta_e - \left(\frac{\xi^2}{2} \right) \left(\frac{R_0}{\rho Q_0} \right). \quad (5)$$

Методика и последовательность проектирования. На рисунке 1 приведено схематическое изображение двухзазорного резонатора с 15 отверстиями для прохождения электронных лучей, расположенных в двух рядах.

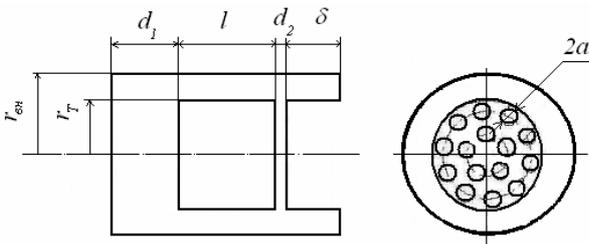


Рисунок 1 – Схематическое изображение двухзазорной многолучевой конструкции резонатора

Диаметр $2r_T$ “втулки” пролетной трубы с отверстиями диаметром $2a$ и их расположение были заданы базовой конструкцией многолучевой электронно-оптической системы. Внешний радиус резонатора $r_{вн}$, длины зазоров d_1 и d_2 , выступ пролетной трубы δ и длину пространства группирования l можно было менять в процессе проектирования. Первеанс одного луча базовой конструкции ЭОС равен $0.3 \text{ мкА/В}^{3/2}$.

Проектирование проводилось с использованием разработанного на кафедре ЭП РГРТУ комплекса программ разного уровня для моделирования электронных процессов и программы расчета аксиально-симметричных электродинамических систем. Ниже приводится последовательность применения программ при проектировании автогенератора на нулевой зоне нулевого (синфазного) вида колебаний. Предварительно с целью определения максимально возможного значения электронного КПД оптимизационные расчеты проводились по программе, основанной на одномерной модели без учета пространственного заряда [6]. Результаты приведены в таблице 1, вариант 1. Получен электронный КПД 39.5 %.

Таблица 1

Варианты	D_1 , рад	L , рад	D_2 , рад	ξ_1	ξ_2	η_e , %
1	4.25	0.96	1.52	1.58	1.47	39.5
2	4.25	0.96	1.52	1.58	1.47	31
3	4.02	1.1	0.96	1.65	1.69	39
4	4.02	1.8	0.96	1.65	1.69	34

При этом КПД выходного зазора составил 51.7 %, а уменьшение общего КПД до 39.5 % связано с потерями энергии на скоростную модуляцию в первом зазоре длиной 4.25 рад, которые составили 11.2 %. Здесь и далее геометрические размеры и амплитуды напряжений на зазорах U_m приводятся в нормированном виде: $D_1 = \gamma d_1$, $D_2 = \gamma d_2$, $L = \gamma l$, $\Delta = \gamma \delta$, $R_T = kr_T$, $R_{вн} = kr_{вн}$, $\gamma = \omega / \vartheta_0$, $k = \omega / c = 2\pi / \lambda$, $\vartheta_0 = \sqrt{2eU_0 / m}$, $\xi_1 = U_{m1} / U_0$, $\xi_2 = U_{m2} / U_0$.

Затем оптимизационные расчеты проводились по программе, основанной на многослойной двумерной модели потока из деформируемых элементов, учитывающей пространственный заряд и поля реальных зазоров [7]. Все расчеты выполнялись при $\gamma a = 0.7$, $R_T = 1.3$ и коэффициенте заполнения пролетных отверстий с электронным потоком $b/a = 0.6$.

Сначала с целью выявления влияния неоднородности поля бессеточного зазора на процессы взаимодействия расчет КПД для одного луча был проведен при тех же размерах и режиме, что и в варианте 1 таблицы 1. Был получен КПД 31 % (вариант 2 в таблице 1). Затем были определены оптимальные размеры и режимы бессеточных зазоров и трубы дрейфа, обеспечивающие максимальный КПД 39 % (вариант 3 в таблице 1). Из-за провисания поля в отверстиях пролетных каналов длина первого зазора уменьшилась с 4.25 рад до 4.02 рад, а второго – с 1.52 рад до 0.96 рад.

На следующем этапе по программе расчета азимутально-симметричных видов колебаний [8] подбирались геометрия резонатора, в котором обеспечивались бы полученные в оптимизированном варианте 3 углы пролета и необходимое соотношение амплитуд напряжений на зазорах. Длины зазоров D_1 , D_2 и длина трубы дрейфа L оставались неизменными. Требуемое соотношение напряжений подбиралось изменением длины выступа трубы Δ в конце резонатора. Требуемая резонансная частота поддерживалась изменением диаметра внешней трубы $2r_{вн}$. Одновременно определялось характеристическое сопротивление резонатора. На рисунке 2 приведены распределения ВЧ потенциала вдоль оси резонатора для разных значений длины выступа Δ .

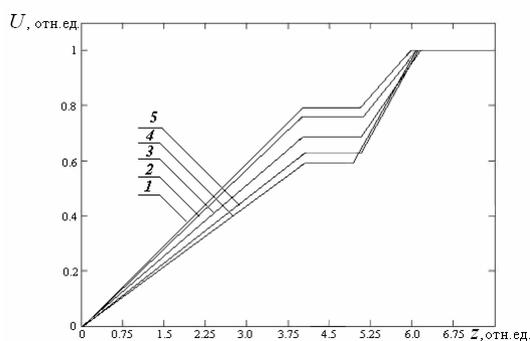


Рисунок 2 – Распределение потенциала вдоль оси резонатора: 1 – $\Delta=0$ рад; 2 – $\Delta=0.75$ рад; 3 – $\Delta=3.76$ рад; 4 – $\Delta=11.7$ рад; 5 – $\Delta=15$ рад

Следующий фактор, который необходимо учитывать при анализе процессов в многорядной конструкции, это изменение высокочастотного потенциала по радиусу зазоров (примерно как в радиальной линии). В исследуемой конструкции в первом зазоре амплитуда напряжения для лучей внутреннего ряда по отношению к амплитуде напряжения на оси резонатора уменьшается в 1.1 раза, а для лучей внешнего ряда уменьшается в 1.3 раза. На рисунке 3 показаны зависимости электронного КПД для внутренних (кривая 1) и внешних (кривая 2) лучей от нормированной амплитуды ξ_1 напряжения на оси резонатора для первого зазора.

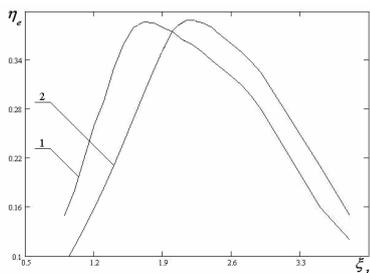


Рисунок 3 – Зависимость электронного КПД от нормированной амплитуды напряжения первого зазора: 1 – для внутреннего ряда, 2 – для внешнего ряда

Как видно из рисунка 3, условия получения максимального КПД в каждом ряду лучей разные. В таблице 2 приведены оптимизированные по усредненному КПД амплитуды напряжений на первом и втором зазорах для внутренних лучей ξ' и внешних лучей ξ'' .

Таблица 2

ξ_1	ξ_1'	ξ_1''	ξ_2'	ξ_2''	η_{e1}	η_{e2}	η_e
2.1	1.97	2.06	1.6	1.7	30.1%	39%	36%

При этом усредненный КПД по всем лучам составил 36 %, КПД для лучей внутреннего ряда – 30 %, а для лучей внешнего ряда – 39 %. Таким образом, из-за разных условий взаимодействия для электронов лучей внутреннего и внешнего ряда произошло снижение среднего КПД на 3 % по сравнению с вариантом 3 в таблице 1.

Первый зазор имеет длину 4.02 рад, что значительно больше длины зазоров в традиционных приборах клистронного типа. В этом случае из-за замыкания силовых линий электрического поля на внешнюю трубу резонатора распределение поля в зазоре по линиям движения электронов оказывается неравномерным (рисунок 4). Напряженность электрического поля увеличивается к концу зазора. Наиболее заметно это для лучей внешнего ряда, где напряженность поля у конца зазора в 3.2 раза больше, чем у его начала (кривая 2 на рисунке 4). Это обстоятельство необходимо учитывать при расчете электронных процессов.

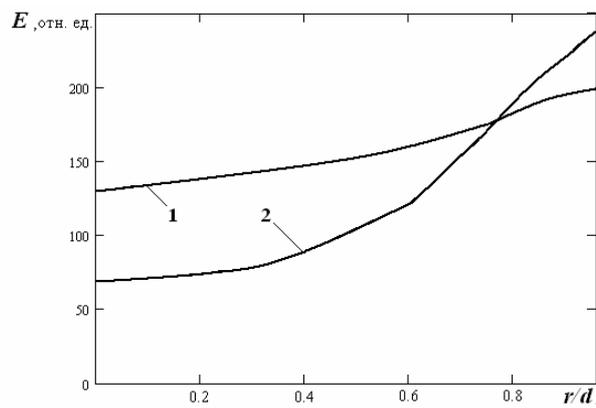


Рисунок 4 – Распределение электрического поля вдоль первого зазора: 1 – по оси лучей внутреннего ряда; 2 – по оси лучей внешнего ряда

Подбор оптимальных размеров осуществлялся методом последовательных приближений. Для каждой геометрии определялось распределение потенциала, и подбирались оптимальные амплитуды напряжений на зазорах. Для обеспечения этих амплитуд подбирались новая геометрия резонатора, что приводило к изменению распределения поля. Рассчитывались электронные процессы уже с новым распределением. В

результате таких расчетов получены размеры пространства взаимодействия, амплитуды напряжений и КПД, которые приведены в варианте 4 таблицы 1. Основное изменение произошло в длине пролетных каналов L , которые изменились с 1.1 рад до 1.8 рад. Объясняется это тем, что область интенсивного взаимодействия смещается в сторону большей напряженности по направлению движения электронов, то есть к пролетным каналам. Поэтому положение максимума конвекционного тока и расположение второго зазора, при котором выполняются условия самовозбуждения нулевого вида, смещаются в том же направлении, и электронный КПД при этом уменьшился до 34 %. Оценка полного КПД по мощности в нагрузку, выполненная для собственной добротности резонатора $Q_0 = 1500$, дает величину $\eta = 31\%$.

Заключение. Выполнено проектирование многолучевого генератора на двухззорном резонаторе в сантиметровом диапазоне с учетом реального распределения электрических полей в зазорах по радиальной и продольной координатам. Показано, что в реальной конструкции КПД прибора снижается по сравнению с КПД, полученным по однолучевой модели. Это объясняется трудностями обеспечения оптимального режима работы в многолучевой двухрядной конструкции одновременно для всех электронных лучей.

Библиографический список

1. Barroso J.J. Design facts in the axial monotron // IEEE Trans. Plasma Sci. 2000. Vol. 28. №3. P. 652-656.
2. Федяев В.К., Паиков А.А. Электронная проводимость и коэффициент полезного действия плоского сверхвысокочастотного зазора в нелинейном режиме // Радиотехника и электроника. 2005. Т.50. № 3. С. 361-365.
3. Barroso J.J. Stepped Electric-Field Profiles in Transit-Time Tubes // IEEE Transactions on Electron Devices. 2005. Vol. 52. №5. P. 872-877.
4. Федяев В.К., Горлин О.А., Паиков А.А. Исследование электронного КПД автогенератора на двухззорном резонаторе с зазорами разной длины // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы международной научно-технической конференции. Саратов: СГТУ, 2006. С. 36-42.
5. Горлин О.А. Исследование электронного КПД двухззорного автогенератора на первой зоне синфазном виде колебаний // Вестник РГРТУ. Рязань: РГРТУ, 2008. №1. С.125-128.
6. Федяев В.К., Паиков А.А., Кадушкин В.О. Исследование электронной проводимости и КПД двухззорного резонатора в режимах генерации и усиления // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Международной конференции. Саратов: СГТУ, 2004. С.109-115.
7. Федяев В.К., Юркин В.И. Программа анализа двумерных динамических процессов в клистродах // Вакуумная и плазменная электроника: Межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РРТИ. 1986. С. 101-105.
8. Шшиков А.А., Васин Н.Н., Сычев В.Б. Расчет азимутально-симметричных видов колебаний в резонаторах, частично заполненных диэлектриком // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ 1985. Вып.5.