УДК 621.385.623.2

О.А. Горлин

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО КПД ДВУХЗАЗОРНОГО АВТОГЕНЕРАТОРА НА ПЕРВОЙ ЗОНЕ СИНФАЗНОГО ВИДА КОЛЕБАНИЯ

С использованием программы численного моделирования показано, что электронный КПД в нелинейном режиме на 0-виде колебаний первой зоны генерации при оптимальных размерах и режимах работы достигает величины 57% .

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 с достаточно высоким КПД. Наиболее простым по конструкции автогенератором является монотрон, но после того как в первых экспериментах был получен КПД менее 1%[1], на долгие годы интерес к монотронам был потерян. В последнее время появились публикации, в которых численным моделированием для монотрона классической конструкции предсказывается электронный КПД 18% [2,3]. В [4] показано, что “при больших амплитудах КПД монотрона приближается к 20%”. Для более сложной конструкции монотрона со ступенчатым изменением поля численным моделированием с использованием двумерной модели получен электронный КПД 47.5% [5]. Но при этом амплитуда напряжения на второй ступени в 7.5 раза больше ускоряющего напряжения.

Альтернативой монотронным конструкциям может быть генератор на резонаторе с двойным зазором, работающий на π- или 0-виде колебаний [6]. На кафедре ЭП РГРТУ получены уравнения, разработана методика, составлены программы по исследованию автогенератора на двухзазорном резонаторе. В нелинейном режиме численным моделированием на π-виде колебания был получен максимальный электронный КПД 51% [7]. На π-виде колебаний длины зазоров могут быть разные, а амплитуды напряжений на зазорах U_m одинаковы. На 0-виде колебаний амплитуды напряжений на зазорах могут быть разные и можно ожидать получения более высоких КПД.

Цель работы – исследование процессов в двухзазорном автогенераторе, проведение оптимизационных расчетов с целью выбора нормированных размеров и электрических параметров автогенератора, которые обеспечивают максимальный КПД.

Рабочие уравнения. Электроны, поступающие с катода 1 в первый зазор 2 (рисунок 1), получают скоростную модуляцию, в пролетной трубе 3 происходит группирование электронов и образуются сгустки, которые во втором зазоре 4 при тормозящей фазе переменного электрического поля отдают кинетическую энергию общему электромагнитному полю резонатора. Отработавший электронный поток осаждается на вынесенном из области взаимодействия коллекторе 5, что дает большие возможности для охлаждения и рекуперации и соответственно для повышения мощности и КПД.

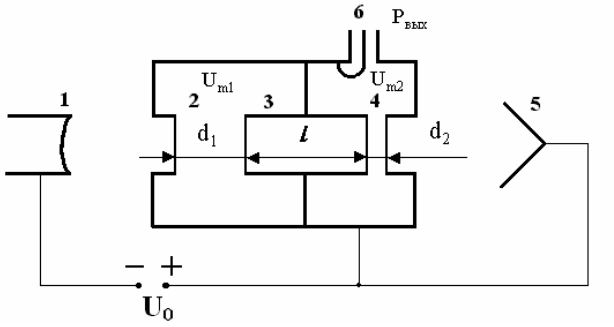


Рисунок 1 – Схематическое изображение двухзазорного генератора: 1 – катод; 2 – первый ВЧ зазор; 3 – труба дрейфа; 4 – второй ВЧ зазор; 5 – коллектор; 6 – коаксиальная линия

Для выполнения фазового условия самовозбуждения на 0-виде колебания нормированное расстояние между серединами зазоров L в режиме малого сигнала должно удовлетворять соотношению:

$$L = L_T + \frac{D_1}{2} + \frac{D_2}{2} = 2\pi(n + \frac{3}{4}), \qquad (1)$$

где $n = 0,1,2...$ – номер зоны генерации, $L_T = \gamma \cdot l$ – нормированная длина пролетной трубы, $D_1 = \gamma \cdot d_1$ и $D_2 = \gamma \cdot d_2$ – нормированные длины первого и второго зазоров, $\gamma = \omega / \vartheta_0$, ω – круговая частота, ϑ_0 – скорость электронов на входе в первый зазор.

Расчеты проводились для 1-й зоны генерации (n=1) 0-вида по методике, изложенной в [5], в одномерном приближении для идеально пло-

ских зазоров без учета пространственного заряда. Исходным уравнением для исследования является уравнение движения, которое с учетом принятых допущений записывается следующим образом:

$$m\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -eE, \qquad (2)$$

где m – масса частицы, e – заряд электрона, x – текущая координата, t – текущее время, $E = -\frac{U_m}{d}\sin(\omega t + \varphi)$ – напряженность электрического поля, U_m и φ – амплитуда и начальная фаза переменного напряжения на зазоре, d – длина зазора.

Вводятся нормированные переменные: $\Theta = \omega t$ – нормированное текущее время, $\xi = U_m / U_0$ – нормированная амплитуда напряжения, $Z = x\omega/\vartheta_0$ – нормированная координата.

С использованием нормированных переменных, учитывая, что $\vartheta_0 = \sqrt{2\frac{e}{m}U_0}$, $D = \omega d/\vartheta_0$ – угол пролета электронов в зазоре, получаем уравнение движения в нормированном виде:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial \Theta^2} = \frac{1}{2}\upsilon\sin(\Theta + \varphi). \qquad (3)$$

Величина Θ, входящая в (3), может быть записана в следующем виде: $\Theta = \Theta_{on} + \Theta_{pr}$, где Θ_{on} – фаза влета n-го электрона в зазор, Θ_{pr} – нормированное время, отсчитываемое от момента влета электрона в зазор.

Величина $\upsilon = \frac{U_m \vartheta_0}{U_0 \omega \cdot d}$ в уравнении (3) является критерием подобия плоских СВЧ зазоров [8]. Параметры, входящие в отношение υ, полностью характеризуют размеры и режим работы зазора. Поэтому назовем υ универсальным параметром СВЧ зазора.

Решение уравнения (3) при начальных и граничных условиях

$$\frac{\partial z}{\partial \Theta_{pr}} = V_{on} \text{ и } Z = 0 \text{ при } \Theta_{pr} = 0,$$

где V_{on} - нормированная скорость электронов на входе в зазор, имеет вид:

$$V = \frac{\partial z}{\partial \Theta_{pr}} = V_{on} + \frac{1}{2}\upsilon\cos(\Theta_{on} + y) - \frac{1}{2}\upsilon\cos(\Theta_{pr} + \Theta_{on} + y), \qquad (4)$$

$$Z = \left[V_{on} + \frac{1}{2}\upsilon\cos(\Theta_{on} + y)\right]\Theta_{pr} + \frac{1}{2}\upsilon\left[\sin(\Theta_{on} + y) - \sin(\Theta_{pr} + \Theta_{on} + y)\right]. \qquad (5)$$

Уравнения (4), (5) являются исходными для определения электронного КПД, который вычисляется через активную составляющую мощности P_{ea}, отдаваемой потоком полю зазора:

$$\eta_e = \frac{P_{ea}}{I_0 U_0} = \frac{1}{2}\frac{\xi}{D} I_{ea}. \qquad (6)$$

Из соотношения (6) следует, что электронный КПД для двухзазорной системы является функцией пяти регулируемых нормированных параметров:

$$\eta_e = f(D_1, D_2, L, \xi_1, \xi_2).$$

Процесс оптимизации проводился методом покоординатного спуска с η_e в качестве частного критерия. Однако характер зависимостей η_e от регулируемых параметров D_1, D_2, L, ξ_1, ξ_2 скрыт и физическая интерполяция результатов затруднена. Поэтому часть расчетов представлена в виде семейств кривых с экстремальными точками, а окончательный результат получен методом формальной оптимизации.

Результаты расчетов. На рисунке 2 приведено семейство кривых зависимостей η_e от длины первого зазора D_1. Вначале ξ_1 и ξ_2 брались одинаковыми в диапазоне от 0.8 до 1.7 рад. Исходное значение L определено из уравнения (1) при $n = 1$ и равно 11 рад. Ход кривых объясняется следующим образом.

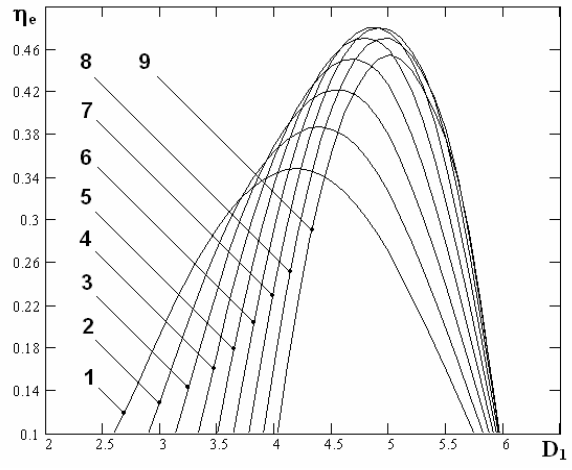


Рисунок 2 – Зависимость электронного КПД от длины первого зазора D_1 для $L = 7 \cdot \pi/2$, $D_2 = \pi/2$ при различных значениях ξ. Кривые 1-9 соответствуют ξ =0.8; 0.9; 1; 1.1; 1.2; 1.3; 1.4; 1.5; 1.6

При увеличении D_1 уменьшается коэффициент скоростной модуляции и максимум группирования электронов сдвигается в сторону больших углов пролета. Пока максимум группирования находится до второго зазора, с ростом амплитуды скоростной модуляции ток первой гармоники конвекционного тока в области второго зазора увеличивается и η_e увеличивается (рисунок 2). Когда максимум группирования приходится на второй зазор, η_e максимален (при $\xi = 1.3$, кривая 6). Затем с ростом D_1 и уменьшением амплитуды переменной скорости точка максимума группирования уходит за второй зазор и с дальнейшим ростом D_1 электронный КПД η_e уменьшается.

С увеличением ξ увеличивается амплитуда переменного напряжения на втором зазоре, отбор энергии от сгустков происходит более интенсивно и максимумы кривых растут ($\xi = 0.8 \div 1.3$, кривые 1-7). При дальнейшем увеличении ξ происходит уменьшение максимальных значений η_e (кривые 8-10; $\xi = 1.4 \div 1.6$) из-за перегруппировки электронов в области второго зазора.

Сдвиг экстремальных точек в сторону больших D_1 с ростом ξ объясняется следующим образом. Амплитуда переменной скорости на выходе первого зазора растет с увеличением ξ и уменьшается с увеличением D_1. Поэтому, чтобы удержать максимум группирования в плоскости второго зазора, с ростом ξ надо увеличивать D_1.

Из рисунка 2 для каждого ξ находилось оптимальное значение длины первого зазора D_1, при котором η_e максимален и рассчитывалась зависимость электронного КПД от расстояния между центрами зазоров L. Результаты приведены на рисунке 3.

С ростом параметра ξ экстремальные точки кривых смещаются в сторону меньших L. Это объясняется тем, что в ту же сторону с ростом ξ смещается максимум конвекционного тока, но при этом нарушается синхронизм между током и напряжением во втором зазоре – центр сгустка не попадает в максимум тормозящего напряжения. Как компромисс между этими противоположно действующими на КПД факторами появляются точки экстремума на каждой кривой.

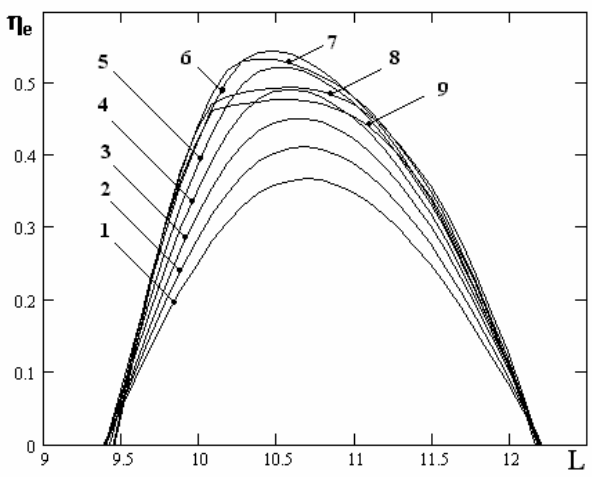


Рисунок 3 – Зависимость электронного КПД от расстояния между центрами зазоров для $D_2 = \pi/2$. 1-ξ=0.8, D_1=4.2; 2-ξ=0.9, D_1=4.4; 3-ξ=1, D_1=4.5; 4-ξ=1.1, D_1=4.7; 5-ξ=1.2, D_1=4.8; 6-ξ=1.3, D_1=4.9; 7-ξ=1.4, D_1=4.9; 8-ξ=1.5, D_1=4.9; 9-ξ=1.6, D_1=5

Выводы. В результате первого цикла оптимизации при длине второго зазора $D_2 = \pi/2$ получен $\eta_e = 54.6\%$ при следующих нормированных параметрах зазоров: $D_1 = 4.9$, $\xi_1 = \xi_2 = 1.3$, $L = 10.483$. Следующие циклы оптимизации методом покоординатного спуска, то есть изменением одной переменной при оптимальных остальных, дали величину $\eta_e = 57.45\%$ при $D_1 = 5.2$, $L = 10.41$, $D_2 = 1.42$, $\xi_1 = 1.6$, $\xi_2 = 1.4$. Таким образом, проведенные расчеты подтвердили возможность получения сравнительно высокого (около 60%) КПД двухзазорного автогенератора на первой зоне синфазного вида колебаний.

Библиографический список

1. *F.B. Llewellyn* and *A.E. Bowen*, “The production of ultrahigh frequency oscillations by means of diodes,” *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 18, no.2, 1939, pp. 280-284.

2. *J.J. Barroso*, “Design facts in the axial monotron,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 28, no.3, Jun. 2000, pp. 652-656.

3. *Федяев В.К., Пашков А.А.* Электронная проводимость и коэффициент полезного действия плоского сверхвысокочастотного зазора в нелинейном режиме //Радиотехника и электроника, 2005, т.50, №3. С.361-365.

4. *Панов В.П., Кутузова И.В.* Взаимодействие несгруппированного потока с высокочастотным полем зазора // Электронные приборы: межвуз.сб.- Рязань: РРТИ, 1992.- С87.

5. *J.J. Barroso*, “Stepped Electric-Field Profiles in Transit-Time Tubes,” *IEEE Transactions on electron devices*, vol. 52, no.5, May 2005, pp. 872-877.

6. *Федяев В.К., Пашков А.А., Кадушкин В.О.* Исследование электронной проводимости и КПД двухзазорного резонатора в режимах генерации и усиле-

ния //Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2004): материалы Международной конференции. 15-16 сентября 2004 г., Саратов, 2004.- С.109-115.

7. *Федяев В.К., Горлин О.А., Пашков А.А.* Исследование электронного КПД автогенератора на двухзазорном резонаторе с зазорами разной длины // Материалы международной конференции "Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2006", 19-21 сентября 2006 г.- Саратов: СГТУ, 2006. - С. 36-42.

8. *Трубецков Д.И.* // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1977. №12.- С. 48.