

**В.А. Царев<sup>1</sup>, В.Ю. Мучкаев<sup>1</sup>, П.Д. Шалаев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.

<sup>2</sup>ОАО «Научно-производственное предприятие «Алмаз»

## **Исследование и 3-D моделирование низковольтного многолучевого монофона К-диапазона с трехззорным связанным резонатором**

*Представлены результаты численного моделирования процесса генерации колебаний в низковольтном многолучевом монофоне К-диапазона с трехззорным связанным резонатором при возбуждении его на  $\pi$ -виде колебаний. Рассмотрены два варианта отбора энергии от модулированного электронного потока, зависящих от величины ускоряющего напряжения. В первом варианте, соответствующем режиму максимальной импульсной выходной мощности, происходит распределенный отбор энергии во втором и третьем зазорах. При этом выходная мощность достигает максимального значения 1,3кВт при полном КПД прибора равном 39,6%. Во втором варианте, когда происходит последовательная группировка электронного потока в первом и втором зазорах и отбор мощности в третьем зазоре, реализуется режим максимального КПД - 44,3% с выходной мощностью 1,1 кВт.*

**Ключевые слова:** низковольтный монофон, трехззорный связанный резонатор, численное моделирование

Одной из актуальных проблем современной вакуумной микроволновой электроники является создание в К-диапазоне частот малогабаритных и простых по конструкции низковольтных генераторов среднего уровня выходной мощности с высоким КПД [1]. Одним из кандидатов на роль такого генератора может стать монофон [2].

Однако электронный КПД, рассчитанный теоретически, однолучевого монофона с одноззорным резонатором и однородным распределением электрического поля в пространстве взаимодействия не превышает 18% [3]. Повысить эффективность монофона можно путем замены одноззорного резонатора на многоззорный с оптимально подобранными амплитудами ВЧ напряжений на зазорах [4].

Так, при работе монофона с двухззорным резонатором, возбуждаемым на  $2\pi$ -виде колебаний, был экспериментально получен КПД около 25% [5]. В работах последнего времени [6] численным моделированием была показана возможность получения в оптимизированных вариантах однолучевых монофонов с четвертьволновыми двухззорными полосковыми резонаторами электронного КПД около 50%.

Однако такие резонаторы не могут использоваться на коротких длинах волн, в частности в X-диапазоне, из-за малого объема их индуктивной части. В этой связи значительный интерес представляют собой автогенераторы монофонного типа с резонансной системой на основе многоззорных связанных через щели связи резонаторов (split cavity oscillator-SCO) [7]. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования по генерации колебаний в split-резонаторах указывают на их достаточно высокую эффективность таких автогенераторов [8-9].

Обычно для получения больших мощностей в монофонах со split-резонаторами используют релятивистские электронные пучки [10-11]. При этом, амплитуда переменного напряжения в split-резонаторе в однолучевом монофоне существенно превышает величину

ускоряющего напряжения, что увеличивает потери в резонаторе и затрудняет самовозбуждение. Устранить эти недостатки можно при переходе к многолучевым монотронам с многоззорной резонансной системой. Так, в работе [12] теоретически и экспериментально показано, что в многолучевом низковольтном монотроне со split-резонатором на  $\pi$ -виде колебаний можно получить в К-диапазоне полный КПД 30% и выходную мощность около 0,6 кВт. Дальнейшего увеличения КПД и уровня выходной мощности следует ожидать при использовании в многолучевом монотроне split-резонатора с тремя зазорами и оптимально подобранным неоднородным распределением высокочастотного поля в пространстве взаимодействия. Однако результаты численного трехмерного моделирования и экспериментальные данные, подтверждающие это, в настоящее время отсутствуют.

Целью настоящей работы является численное моделирование физических процессов обмена энергии между электронным потоком и СВЧ полем многолучевого автогенератора монотронного типа с электродинамической системой на основе трехззорного резонатора. Схематическое изображение исследуемой резонансной системы представлено на рис. 1.

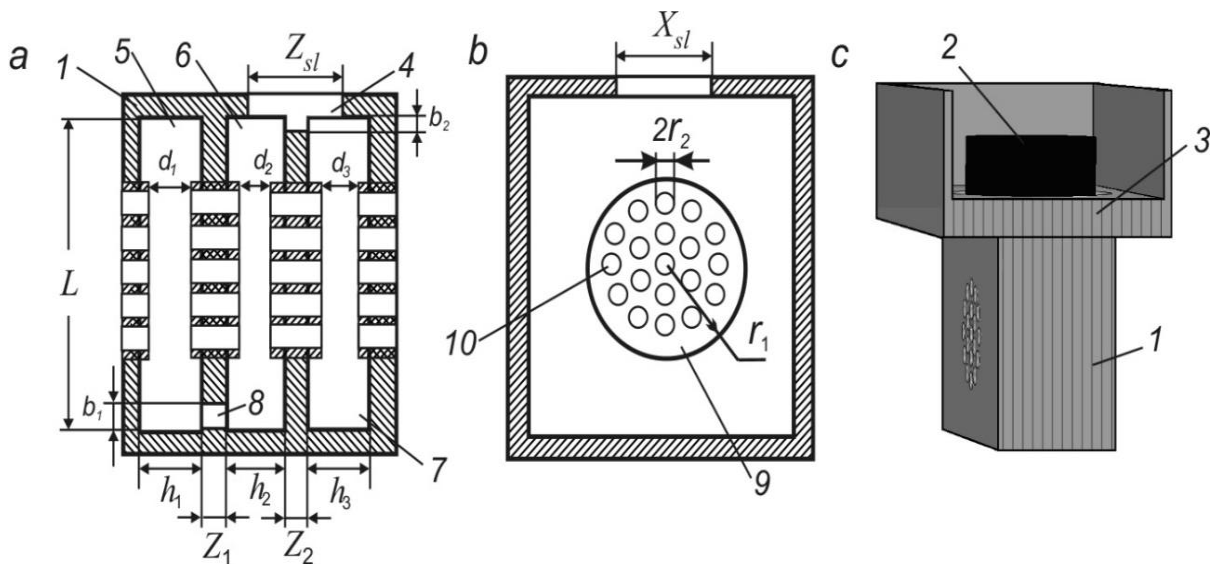


Рисунок 1.

Трехззорный резонатор образован электромагнитно связанными через две щели связи 4 и 8 призматическими резонансными полостями 5, 6 и 7, которые нагружены на волноводный вывод энергии 3. Вакуумную герметизацию и согласование волновода и резонаторной системы обеспечивает диэлектрический стержень, который примыкает непосредственно к щели связи 4. Девятнадцать пролетных каналов 10 плотно упакованы в общей пролетной трубе 9.

Значения параметров  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$ ,  $r_1$  и  $r_2$  в ходе численных расчетов не менялись и совпадали со значениями аналогичных параметров монотрона с двухззорным резонатором, рассмотренного нами ранее в работе [3].

Численные расчеты распределения электромагнитного поля были проведены с помощью трехмерной программы REZON [13], в основе которой лежит решение уравнений

Максвелла методом конечных разностей во временной области, с прямоугольной пространственной сеткой разбиения. Из анализа спектра частот и распределений электромагнитного поля следует, что в рассматриваемом диапазоне частот (18-19 ГГц) в исследуемой модели резонатора возможно возбуждение двух видов колебаний. У основного (рабочего) вида колебаний напряжения на соседних зазорах находятся в противофазе (кривая 1 на рис.2). А у первого высшего (в данном случае паразитного) вида колебаний напряжение на первом зазоре находится в противофазе к напряжениям на втором и третьем зазоре (кривая 2 на рис.2).

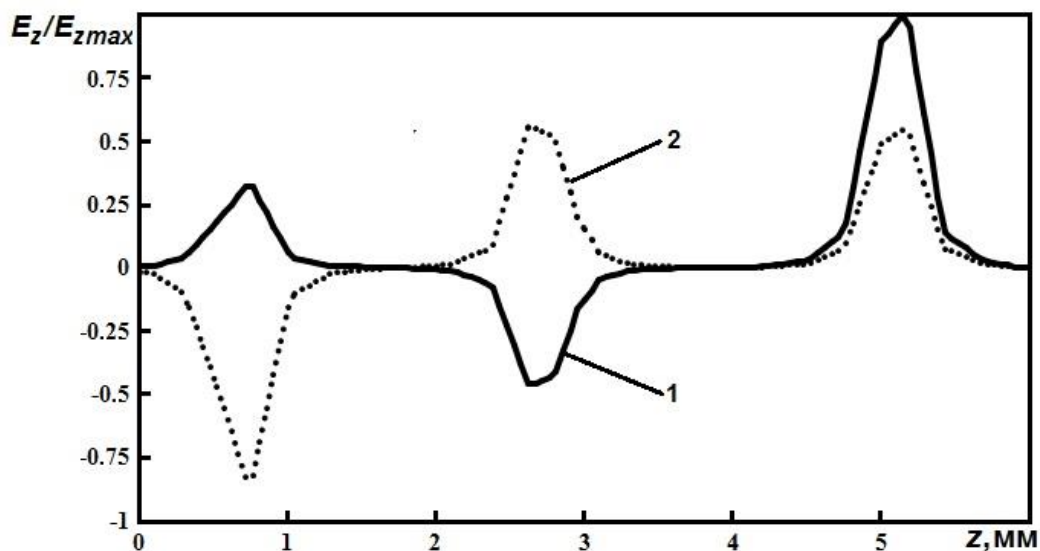


Рисунок 2.

При работе на противофазном виде колебаний в исследуемой модели монотрона возможны два варианта выполнения фазового условия самовозбуждения [14]. Первый вариант - центры сгустков электронов, образовавшихся в пролетной трубе за счет скоростной модуляции в первом зазоре, попадают в максимум напряжения тормозящей фазы во втором и третьем зазорах. Второй вариант – последовательная группировка электронного потока в первом и втором зазорах и попадание сформированных сгустков в тормозящую фазу в третьем зазоре. В ходе численного моделирования для обоих вариантов были подобраны геометрические параметры электродинамической системы, обеспечивающие значения амплитуд ВЧ напряжения на первом  $V_1$ , втором  $V_2$  и третьем  $V_3$  зазорах близкие к оптимальным:  $|V_1|/|V_3| = 0,1194$  и  $|V_2|/|V_3| = 0,1892$  [4].

Для первого варианта отбора энергии было найдено 5 образцов различных модификаций электродинамической системы. Значения ширины щели связи  $X_{sl}$ , частоты основного (противофазного) вида колебаний  $f_0$ , характеристического сопротивления  $\rho$  для центрального пролетного канала, собственная  $Q_0$  и внешняя  $Q_{вн}$  добротности резонатора и соотношений  $|V_1|/|V_3|$  и  $|V_2|/|V_3|$  представлены в таблице 1.

Вычисления показали, что у всех выбранных модификаций зависимости относительной электронной проводимости  $G_e/G_0$  на противофазном виде колебаний и произведения  $M_1M_{23}$  (где  $M_1$  - коэффициент эффективности взаимодействия первого зазора,  $M_{23}$  - общий коэффициент эффективности взаимодействия второго и третьего зазоров) от ускоряющего

напряжения практически совпадают. Самовозбуждение исследуемой модели монотрона на основном виде колебаний возможно в диапазоне изменения ускоряющего напряжения от 2,3 до 3,4 кВ. Однако получение максимального значения КПД следует ожидать при  $V_0 = 2,7-2,8$ кВ.

Таблица 1

$\lambda$ sl, мм	$ V_1 $ / $ V_3 $	$ V_2 $ / $ V_3 $	$\rho$ , Ом	$Q_0$	$Q_{вн}$	$f_0$ , ГГц
2,4	0,1 2	0,1 97	5 4,8	1 005	2 307	1 8,37
2,5	0,1 14	0,1 88	5 3,8	1 023	1 237	1 8,33
2,6	0,1 18	0,1 99	5 4,7	1 018	7 72	1 8,31
2,7	0,1 19	0,1 97	5 4,6	1 026	5 81	1 8,29
2,8	0,1 2	0,1 96	5 4,6	1 042	4 06	1 8,25

Для второго варианта в результате проведенных численных расчетов было найдено 2 образца модификации электродинамической системы, отвечающих условию получения максимального КПД (таб. 2).

Таблица 2

$X$ sl, мм	$ V_1 $ / $ V_3 $	$ V_2 $ / $ V_3 $	$\rho$ , Ом	$Q_0$	$Q_{вн}$	$f_0$ , ГГц
2,4	0, 114	0,1 97	5 5,1	12 82	1 153	18, 03
2,5	0, 126	0,1 94	5 6,4	12 83	7 44	18, 21

Для этого варианта основное условие самовозбуждения прибора на основном виде колебаний ( $G_e/G_0 < 0$ ) выполняется, когда величина ускоряющего напряжения находится в диапазоне 1,8 – 2,7 кВ.

Расчеты значений пускового тока, необходимого для выполнения условий самовозбуждения для первого варианта показали, что оптимальным вариантом является модификация №3 ( $I_{пуск} = 0,8$ А при  $V_0 = 2,8$ кВ), а для второго - модификация №2 ( $I_{пуск} = 0,64$ А при  $V_0 = 2450$ В).

Далее было проведено трехмерное численное моделирование процесса автогенерации выходного сигнала в монотроне с многолучевым электронным потоком для случаев, соответствующих образцу №3 для первого варианта и образцу №2 для второго варианта. Результаты представлены на рис. 3.

Как видно из графиков, для первого варианта электродинамической системы максимальное значение КПД (39,6%) достигается при токе пучка 1,1А (кривая 1 на рис.3), а мощность СВЧ излучения достигает максимального значения (1,3 кВт) при  $I_0 = 1,2\text{А}$  (кривая 3 на рис.3). В случае второго варианта группировки электронного потока максимальное значение технического КПД ( $\eta=44,3\%$ ) реализуется при токе пучка 0,9А (кривая 2 на рис.3), а выходная мощность достигает максимального значения (1,1 кВт) при  $I_0 = 1,2\text{А}$  (кривая 4 на рис.3).

Таким образом переход в многолучевом монотроне к трехззорной конструкции резонатора, возбуждаемой на  $\pi$ - виде колебаний, позволил, при найденных оптимальных режимах работы, получить увеличение технического КПД на 14% по сравнению с близким по геометрическим размерам и конструкции монотроном с двухззорным резонатором, рассмотренным в работе [3].

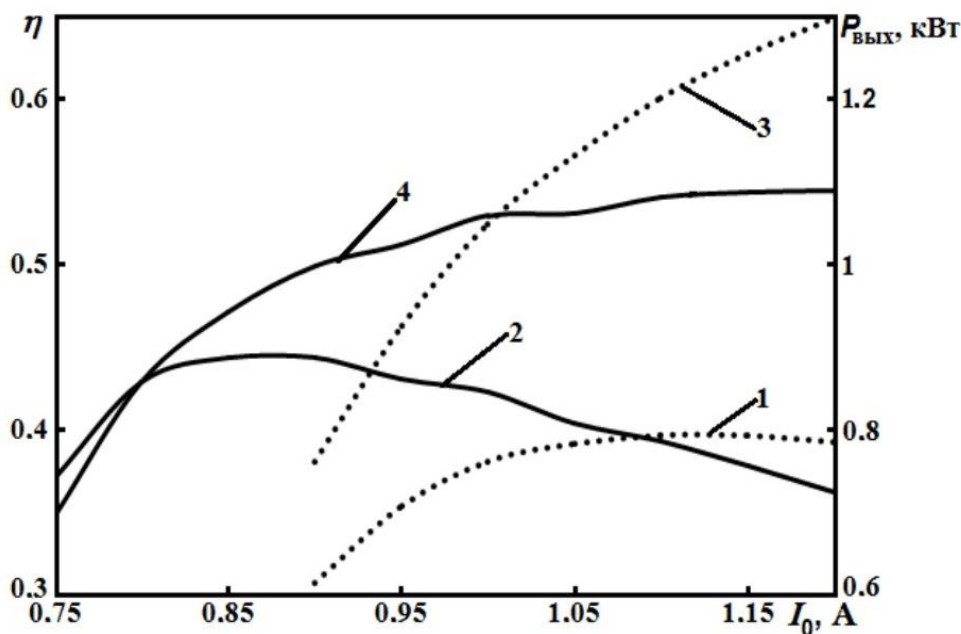


Рисунок 3

Результаты были получены при выполнении научно-исследовательской работы в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию №8.1065.2014/К и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №14-32-50696).

#### Библиографический список

1. Barker R.J. High Power Microwave Sources and Technologies / R.J. Barker, E. Schamiloglu // - New York: IEEE Press. - 2001. - P.485.
2. Marcum J. Interchange of energy between an electron beam and an oscillating electric field / J. Marcum // - J. Appl. Phys. - 1946. - №17. - pp. 4-12.
3. Barroso J.J. Design facts in the axial monotron / J.J. Barroso // - IEEE Transactions on Plasma Science. - 2000. - Vol. 28. - № 3.- pp. 450 – 455.
4. Blotekjzer K. Optimization of R.F. Voltage Amplitudes and Gap Spacing of Generalized Floating Drift-tube Oscillator / K. Blotekjzer // - Journal of Electronics and Control. - 1962. - 12:6. - pp. 461- 499.

5. Nelson R.B. A high-power floating-drift-tube klystron / R.B. Nelson // - Proc. of the 4-th Int. Congress on microwave tube. – Holland, 1962. – p. 49–54.
6. Федяев В. К. Коэффициент полезного действия питрона/ В.К. Федяев, О.А. Горлин // - Радиотехника и электроника. – 2010. – Том. 55. – №12. – С. 1050–1055.
7. Marder B.M. The split-cavity oscillator: A high-power e-beam modulator and microwave source / B.M. Marder, M.C. Clark, L.D. Bacon, J.M. Hoffman, R.W. Lemke, P.D. Coleman // - IEEE Transaction on Plasma Science. – 1992. – V. 20. – pp. 312 – 331.
8. Lemke R.W. Theoretical and experimental investigation of a method for increasing the output power of a microwave tube based on the split-cavity oscillator / R.W. Lemke, M.C. Clark, B.M. Marder // - J. Appl. Phys. – 1994. – V.75. - №10. – pp. 5423–5432.
9. J.J. Barroso Split-cavity monotrons achieving 40 percent electronic efficiency / J.J. Barroso // - IEEE Transactions on Plasma Science. Piscataway. – 2004. - Vol. 32. - № 3. - pp. 1205–1211.
10. R.W. Lemke Theoretical investigation of an oscillator for modulating magnetized, annular, relativistic electron beams / R.W. Lemke, L.D. Bacon, M.C. Clark // - IEEE International Conference on Plasma Science. – Williamsburg, USA, 1991 - p. 129.
11. H. Jun-Tao A new method for increasing output power of a three-cavity transit-time oscillator / Jun-Tao H., Hui-Huang Z., Bao-Liang Q., Yong-Gui L. // - Chin. Phys. Lett. – 2004. – Vol. - pp. 1302–1305.
12. Царев В.А. Исследование многолучевого микроволнового генератора пролетного типа К-диапазона с электродинамической системой из двух связанных через щель резонаторов / В.А. Царев, В.Ю. Мучкаев, П.Д. Шалаев // - Письма в ЖТФ. – 2014. - Т. 40. - Вып. 7. - С. 25-34.
13. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. №2011611748 / Мучкаев В.Ю., Царев В.А. 2011.
14. Федяев В.К. Электронная проводимость и коэффициент полезного действия плоского сверхвысокочастотного зазора в нелинейном режиме / В.К. Федяев, А.А. Пашков. // - Радиотехника и электроника. – 2005. - Т. 50.- № 3. - С. 361-365.