

УДК 621.382

**ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ
МОЩНОГО МНОГОЛУЧЕВОГО МОНОТРОНА
С ЧЕТЫРЕХАЗОРНЫМ РЕЗОНАТОРОМ,
ВОЗБУЖДАЕМЫМ НА СИНФАЗНОМ ВИДЕ КОЛЕБАНИЙ**

Н. А. Акафьева, А. Ю. Мирошниченко, В. А. Царев

**Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
кафедра «Электронные приборы и устройства»**

Получена 26 января 2012 г.

Аннотация. В результате проведенных численных оптимизационных расчетов параметров многолучевого монотрона с четырехззорным резонатором, возбуждаемым на синфазном виде колебаний, показана возможность достижения в таком приборе на частоте 2450 МГц высоких значений электронного КПД (около 60%) и большой выходной мощности (порядка 50 кВт) при значении коэффициента использования напряжения на выходном зазоре 1.5.

Ключевые слова: многоззорный резонатор, микроволновый автогенератор, синфазный вид колебаний, многолучевой монотрон, электронный КПД.

Abstract. A multi-beam monotron oscillator that has four-gap cavity and which is excited in-phase oscillation was numerically investigated. As a result of numerical calculations and optimization the capability obtaining in such device on a frequency 2450 MHz high electron efficiency (60%) and output power (50 kW) at use voltage factor in output gap 1.5 was shown.

Keywords: multi-gap cavity, microwave oscillator, in-phase oscillation, multi-beam monotron, electron efficiency.

Введение

В последнее время проявляется значительный интерес к разработке мощных многолучевых СВЧ приборов с уменьшенными габаритами и массой. Одним из таких приборов является монотрон. В работах [1,2] показано, что для

получения сравнительно высоких, по сравнению с классическим однолучевым монотроном [3], КПД и уровня выходной мощности необходимо переходить к приборам с многолучевыми или полыми электронными потоками, а также использовать резонансные системы, работающие на основном или высших видах колебаний, и имеющие неоднородное распределение поля в пространстве взаимодействия.

Необходимость создания в монотроне с одноззорным резонатором заданного (нарастающего) распределения высокочастотного (ВЧ) электрического поля в пространстве взаимодействия приводит к усложнению формы резонатора и уменьшению его резонансного сопротивления

$$R_{\text{экв}} = \rho \cdot Q_{\text{н}}, \quad (1)$$

где ρ - характеристическое сопротивление, $Q_{\text{н}}$ - нагруженная добротность резонатора. При этом полученное в резонаторе распределение электрического поля все же остается неоптимальным (см. рис. 1), что не позволяет получить высокий электронный КПД [4]

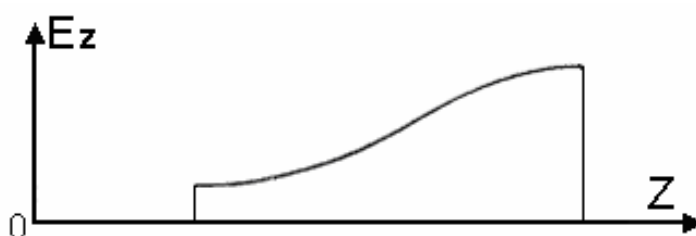


Рис. 1.

В многолучевом монотроне с двухззорным резонатором возможно увеличение КПД энергоотбора за счет выбора лучшего соотношения амплитуд поля на модулирующем и выходном зазорах [5,6]. Однако степень фазовой компрессии и форма электронного сгустка в монотроне с двухззорным резонатором также далеки от оптимального значения, что приводит к ограничению максимального КПД автогенератора. В работе [7], приведены результаты экспериментального исследования такого прибора. Сообщается, что получены выходная импульсная мощность 200 кВт и КПД 30% при величине

коэффициента использования напряжения $\xi = \frac{\tilde{U}}{U_0} = 4$, где \tilde{U} - амплитуда высокочастотного напряжения в резонаторе, U_0 - ускоряющее напряжение.

Однако главная задача, которая стоит перед разработчиками таких приборов – обеспечение конкурентоспособности монотрона по сравнению с многорезонаторным клистроном, т.е., получение КПД монотронов более 50%, все же остается нерешенной.

Это связано с тем, что $\xi > 2$ эффективность взаимодействия электронов с полем резко падает из-за роста влияния пространственного заряда при торможении и обратном движении электронов, а также из-за нелинейного характера энергообмена [8].

Очевидно, что переход к многокаскадной группировке в монотроне позволит сформировать в тормозящей фазе поля в выходном зазоре резонатора более совершенный электронный сгусток при умеренных значениях коэффициента использования напряжения ($\xi = 1.5 \div 2.0$).

Это может быть реализовано, если в качестве резонансной системы в монотронах использовать многозазорный резонатор с числом зазоров больше двух, например, трехзазорный или четырехзазорный [9,10].

Физические процессы получения электронных сгустков в таких устройствах можно, в известной степени, уподобить процессам в многорезонаторном клистроне, в котором для получения хорошей группировки электронного потока расстояния между центрами смежных зазоров в резонаторе должны быть не менее 0.1 от редуцированной плазменной длины волны [11]. Следовательно, четырехзазорный резонатор должен возбуждаться на синфазном виде колебаний. При этом длины центральных втулок и зазоров должны быть выбраны из условия получения максимальной эффективности взаимодействия при отрицательных значениях относительной электронной проводимости.

Проведенные расчеты электронных параметров, результаты которых

показаны на рис. 2, показывают, что с увеличением числа зазоров максимальное значение относительной электронной проводимости по модулю возрастает. Следовательно, облегчаются условия самовозбуждения генератора.

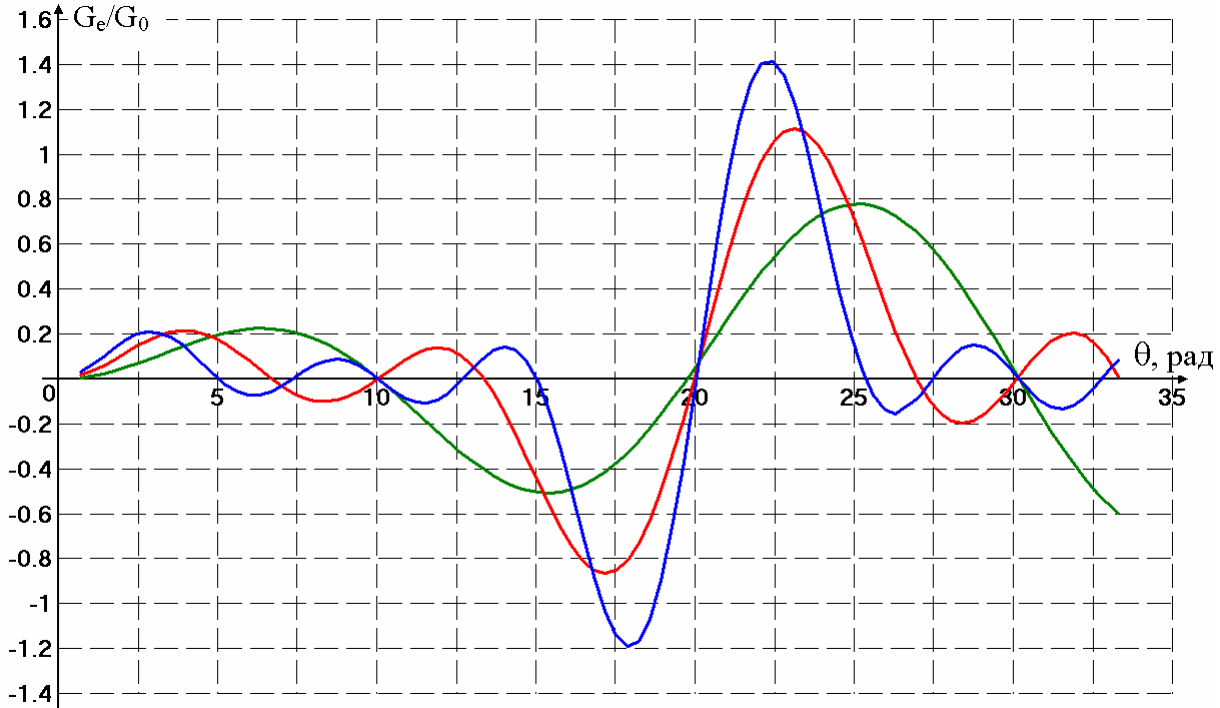


Рис.2. Зависимость относительной активной составляющей электронной проводимости от угла пролета для разного числа зазоров N в резонаторе: зеленый – $N=2$, красный – $N=3$, синий – $N=4$.

При исследовании возможности получения предельных значений электронного КПД многолучевого моноотрона с четырехзазорным резонатором, возбуждаемым на синфазном виде колебаний, необходимо решить следующие задачи.

В первую очередь необходимо обеспечить оптимальное распределение ВЧ поля в зазорах резонатора. Амплитуда электрического поля в начальной области взаимодействия резонатора (входной зазор) должна быть значительно меньше напряженности поля в области отбора энергии (выходной зазор) от электронного пучка, а значение параметра ξ в выходном зазоре не должно превышать 2.

Во- вторых, параметры резонатора и электронного потока должны быть выбраны из условий получения высокой эффективности передачи энергии от электронов к ВЧ полю резонатора [11].

$$\frac{\rho \cdot Q_n}{R_0} \approx 1.0 - 2.0, \quad p_{\mu 1} \leq 0.3, \quad (3)$$

где $R_0 = \frac{U_0}{I_0}$ - сопротивление электронного потока,

$p_{\mu 1}$ - микропервеанс парциального электронного пучка.

Численное моделирование

Задача анализа электродинамических параметров исследуемой колебательной системы решалась с помощью программы 2D моделирования [12]. В результате проведенных расчетов были найдены оптимальные геометрические параметры четырехззорного резонатора при возбуждении его на одном из высших Е-видов колебаний, соответствующем резонансной частоте 2450 МГц. Для этого вида колебаний найдены соотношения размеров, обеспечивающие высокие значения характеристического сопротивления (83 Ом) и собственной добротности.

На рис. 3 представлена картина распределения силовых линий напряженности ВЧ электрического поля в исследуемом резонаторе.

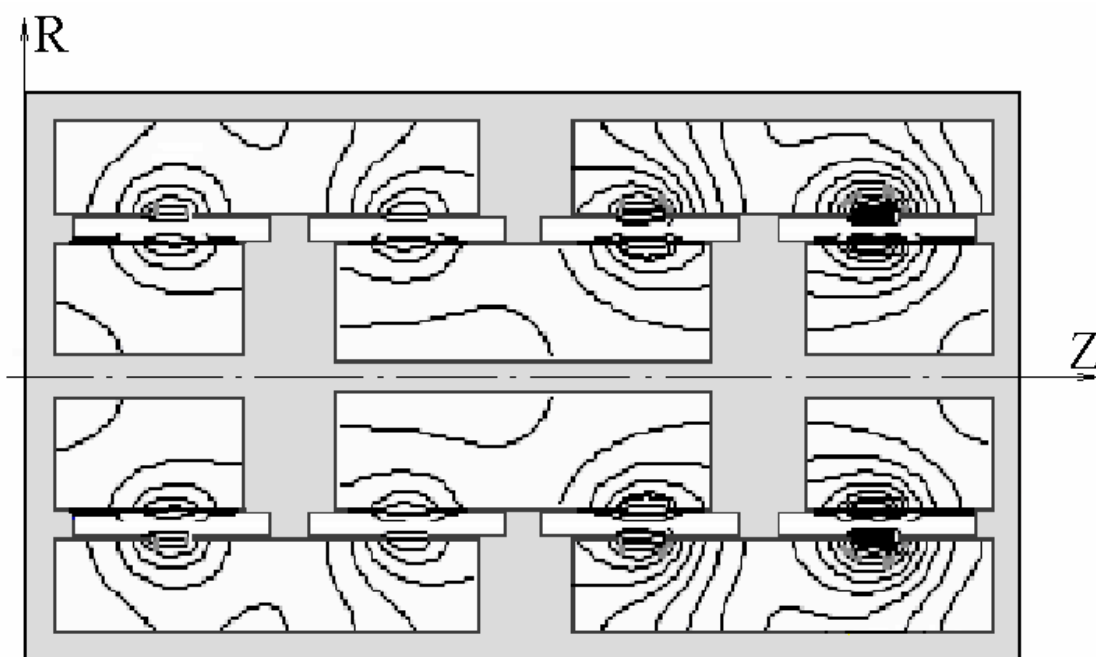


Рис. 3. Картина распределения силовых линий напряженности ВЧ электрического поля в резонаторе.

Как видно из рис. 3, напряженность электрического поля в резонаторе увеличивается от зазора к зазору.

На рис. 4 приведена зависимость относительной напряженности электрического поля E_z / E_m в пространстве взаимодействия четырехззорного резонатора от относительной продольной координаты Z / Z_{m4} .

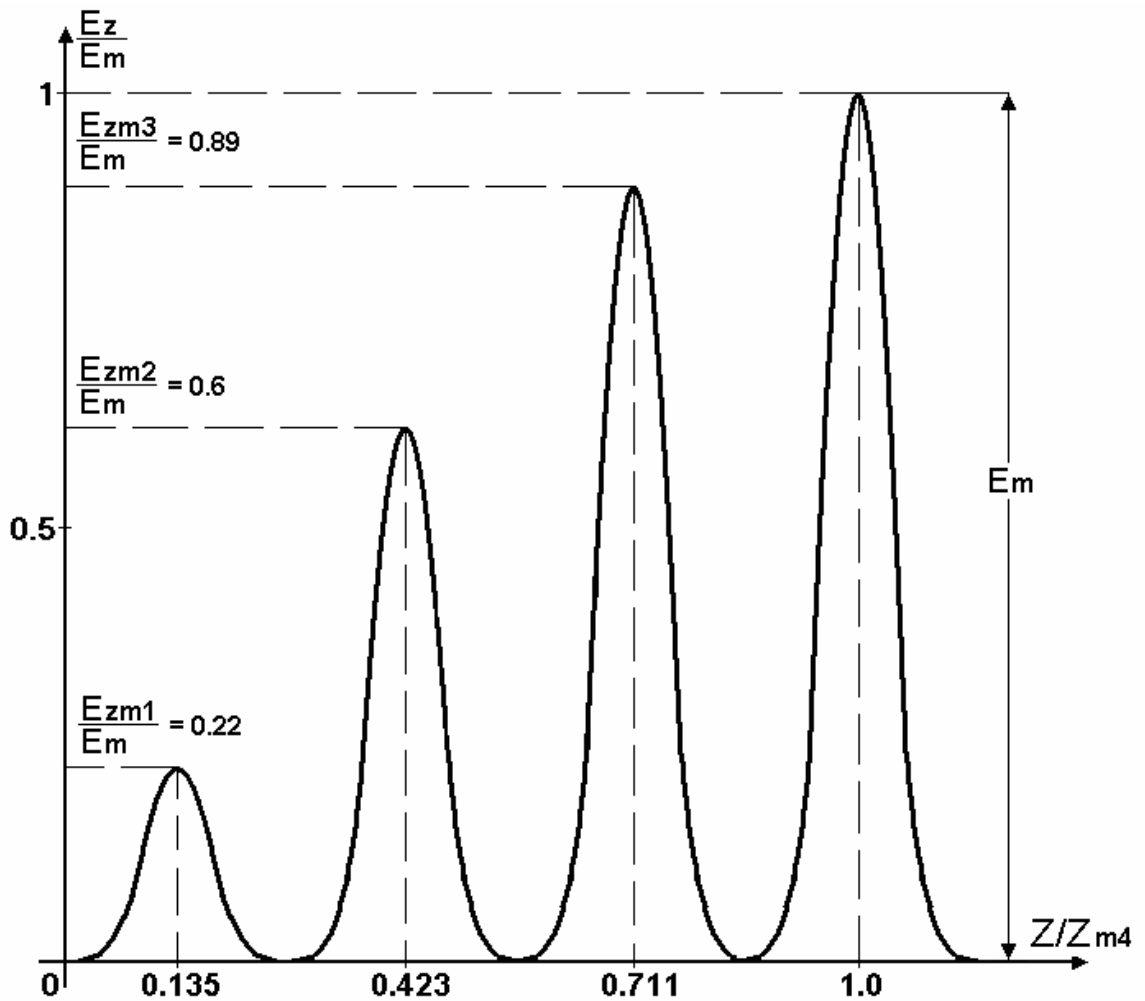


Рис. 4. Оптимальное распределение поля.

Для определения комплекса электронных и электродинамических параметров, обеспечивающего высокую эффективность взаимодействия электронов с полем резонатора монотрона, использовался численный метод моделирования, основанный на использовании дисковой модели клистрона [13].

На рис. 5 представлены результаты расчета максимально достижимой относительной амплитуды первой гармоники конвекционного тока ($I_{1\max}/I_0$) от ускоряющего напряжения в монотроне с четырехзазорным резонатором для режима работы, соответствующего минимальным отрицательным значениям электронной проводимости. Для сравнения, на этом рисунке показаны также достижимые значения параметра группировки для случая одинаковой амплитуды напряженности ВЧ электрического поля в зазорах.

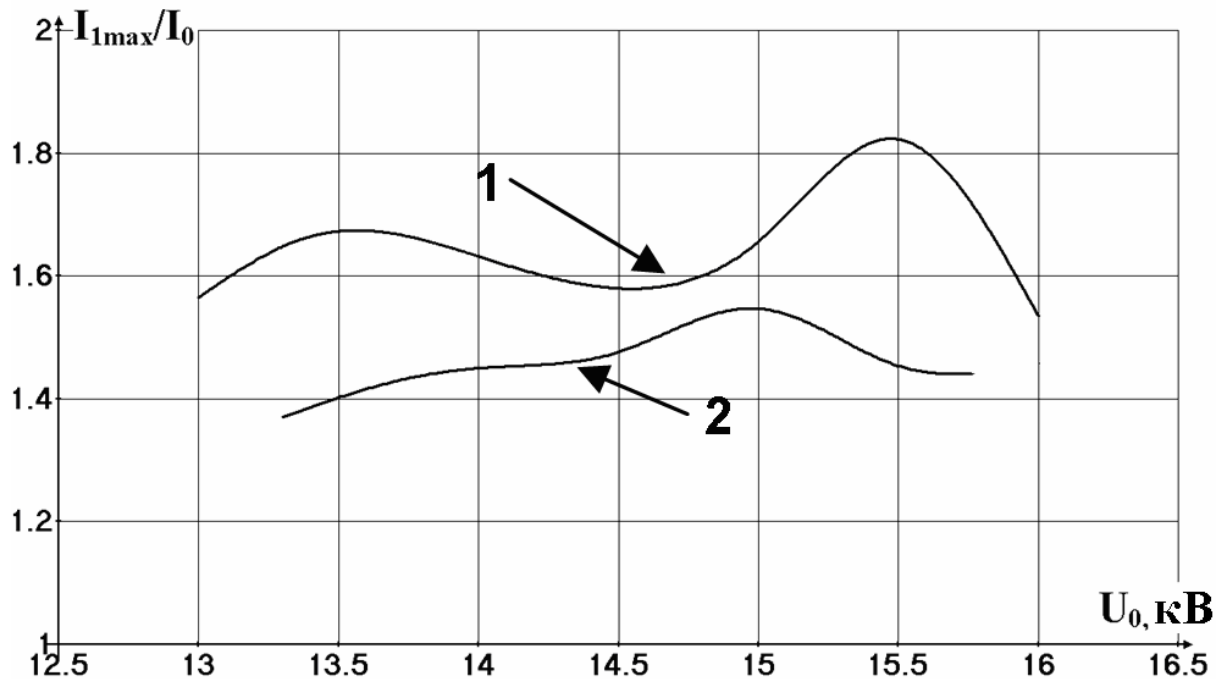


Рис. 5. Зависимость относительной амплитуды первой гармоники конвекционного тока от ускоряющего напряжения для неоднородного распределения поля – 1, однородного распределения поля – 2.

Численные эксперименты показывают, что для однородного распределения поля максимум относительной амплитуды первой гармоники конвекционного тока $I_{1max}/I_0 = 1.55$ достигается при $U_0 = 15$ кВ, $\xi = 0.8$. При $\xi > 0.8$ происходит перегруппировка электронного потока. Максимум относительной амплитуды первой гармоники конвекционного тока смещается в сторону третьего зазора, и наиболее эффективно отбор энергии происходит в третьем зазоре (см. рис. 6), имеющем меньшее, чем для выходного зазора, значение параметра ξ . Для оптимально нарастающей функции распределения ВЧ поля в пространстве взаимодействия максимум относительной амплитуды первой гармоники конвекционного тока $I_{1max}/I_0 = 1.8$ достигается при $U_0 = 15.5$ кВ, $\xi = 1.5$. Закономерность поведения зависимости максимума относительной амплитуды первой гармоники

конвекционного тока от параметра ξ сохраняется (см. рис 7.), а его максимальное значение не превышает 2.

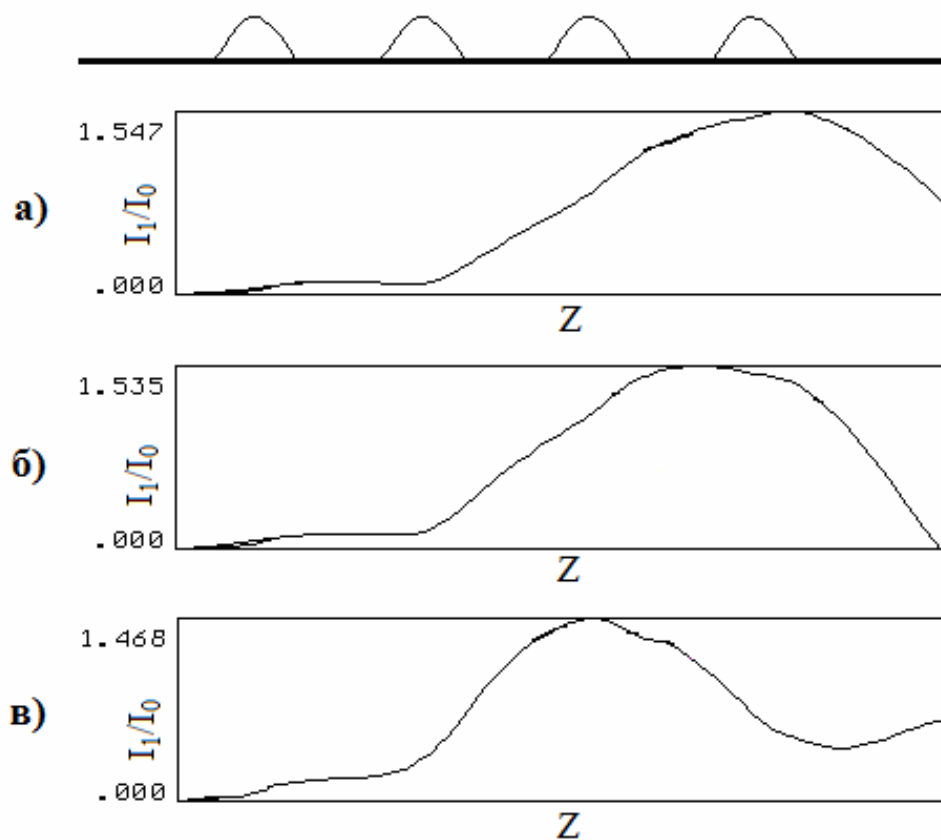


Рис. 6. Зависимости относительной амплитуды первой гармоники конвекционного тока от продольной координаты при $U_0 = 15$ кВ

в случае однородного распределения поля:

а – для $\xi = 0.8$, б – для $\xi = 1.0$, в – для $\xi = 1.5$.

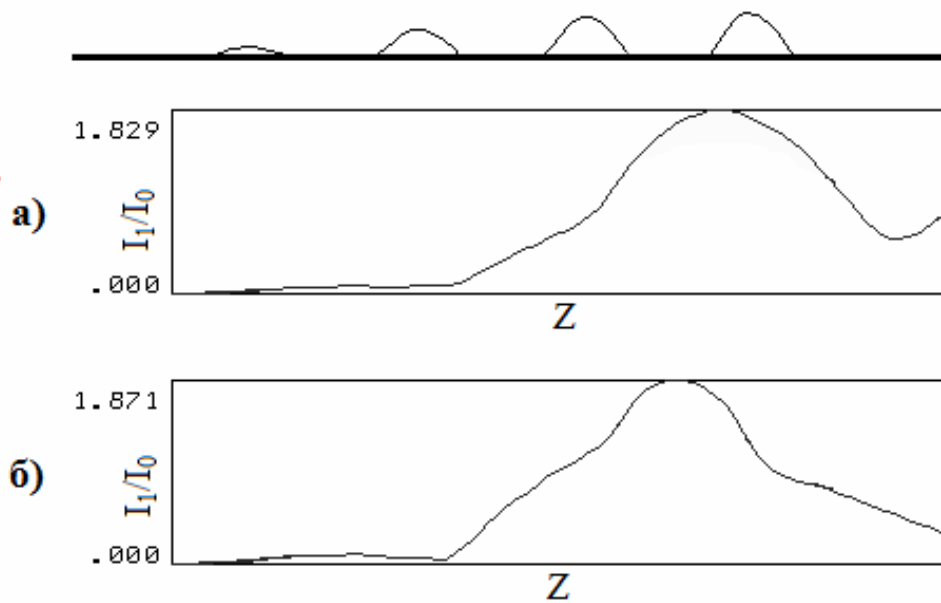


Рис. 7. Зависимости относительной амплитуды первой гармоники конвекционного тока от продольной координаты при $U_0 = 15.5$ кВ в случае оптимального распределения поля

а – для $\xi = 1.5$, б – для $\xi = 2.0$.

Для получения полной картины о характере процессов взаимодействия электронов с СВЧ полем в исследуемом приборе были также рассчитаны зависимости коэффициента взаимодействия M , относительной электронной проводимости G_e/G_0 , и электронного КПД η_e от ускоряющего напряжения для однородного и оптимального распределения полей. Результаты расчета представлены на рис. 8.

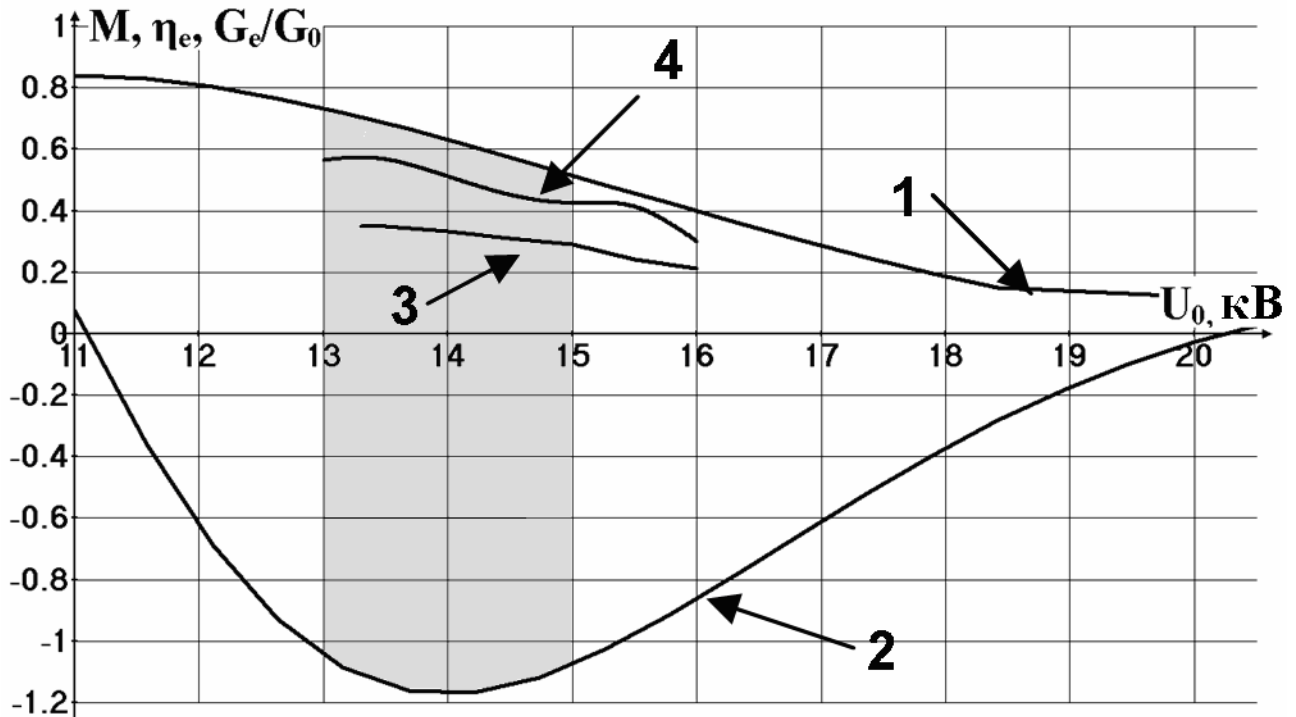


Рис. 8. Зависимость коэффициента взаимодействия (M) - 1, относительной электронной проводимости (G_e/G_0) - 2, и электронного КПД (η_e) от ускоряющего напряжения для однородного распределения поля - 3, оптимального распределения поля - 4.

В результате проведенных исследований, установлено, что максимальное значение электронного КПД, которое может быть получено в исследуемом четырехзазорном резонаторе, возбуждаемом на синфазном виде колебаний, при одинаковых значениях напряженностей продольной составляющей ВЧ электрического поля в зазорах составляет 35%, а при оптимально подобранной (нарастающей) функции распределения этого поля - около 60%.

Для оценки уровня подводимой мощности исследуемого многолучевого монотрона с помощью программы [14] были также проведены электронно-оптические расчеты. В результате этих исследований была определена конструкция электронной пушки (см. рис. 9), обеспечивающая формирование парциального пучка с микропервеансом $0,286 \text{ мкА/В}^{3/2}$ при ускоряющем напряжении 13,3 кВ и коэффициенте заполнения пролетного канала $b/a = 0.6$.

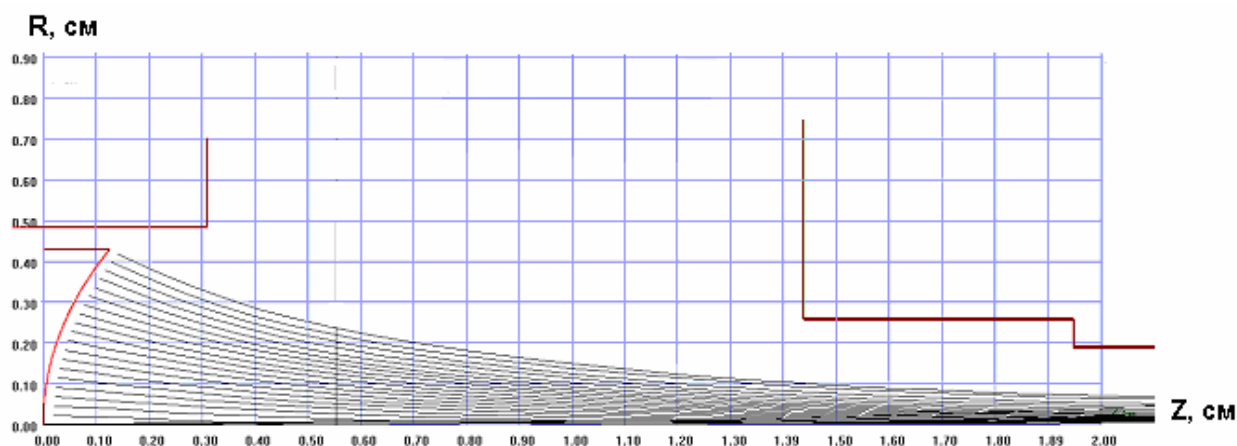


Рис. 9. Результат расчета электронной пушки.

Рассчитанные конструкции резонатора и пушки позволяют разместить в поперечной плоскости пространства взаимодействия 14 лучей, равномерно удаленных от оси прибора на расстояние 25 мм. На частоте 2450 МГц электронный КПД исследуемой конструкции прибора может достигать 60% при выходной мощности около 50 кВт. Такой уровень выходной мощности и значение достижимое значение электронного КПД вполне приемлемы для применения таких приборов в системах передачи энергии на расстояние, устройствах промышленного СВЧ нагрева, радиолокации и ускорительной технике.

Заключение

Применение оптимального распределения поля в четырехзворном резонаторе многолучевого монотрона позволило получить электронный КПД около 60%, близкий по значению к КПД многорезонаторных клистронов, при меньших массогабаритных параметрах и более простой конструкции. Для режима работы $\xi > 1.5 \div 2.0$ наиболее эффективным будет использование в монотроне трехзворного резонатора, возбуждаемого на синфазном виде колебаний. Однако величина предельно достижимых значений электронного КПД и уровень выходной мощности в этом случае будут меньше, соответственно, 50% и 40 кВт.

В связи с большими размерами пространства взаимодействия такие устройства представляют интерес для создания мощных источников микроволновой энергии, работающих в миллиметровом диапазоне волн.

Литература

1. *Barroso J.J.* Design facts in the axial monotron. IEEE Trans. Plasma Sci. 2000. Vol. 28. № 3. P. 652-656.
2. *Горлин О.А., Мишин В.Ю., Федяев В.К., Шишков А.А.* Проектирование многолучевого автогенератора на двухзазорном резонаторе. Вестник РГРТУ. № 1. Вып. 31. Рязань, 2010. С. 69-72.
3. *Müller J.J., Rostas E.* Un générateur à temps de transit utilisant un seul résonateur de volume / Helvetica Physica Acta. 1940. Vol. 13. № 3. P. 435-450.
4. US patent №2269456. Electron beam oscillator. *W.W. Hansen et al*, Jan. 13, 1942.
5. *Федяев В.К., Горлин О.А.* Автогенератор на двухзазорном резонаторе / Электроника и вакуумная техника: Приборы и устройства. Технология: материалы науч.-техн. конф. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2007. С. 73-74.
6. *Федяев В.К., Горлин О.А., Пашков А.А.* Исследование электронного КПД автогенератора на двухзазорном резонаторе с зазорами разной длины / Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы науч.-техн. конф. Саратов: СГТУ, 2006. С. 36-42.
7. *Панов В.П. и др.* О создании приборов с большими углами пролета. Вестник РГРТУ. № 2. Вып. 32. Рязань, 2010. С. 110-113.
8. *Гайдук В. И., Палатов К. И., Петров Д. М.* Физические основы электроники сверхвысоких частот. М.: Советское радио, 1971. 600 с.
9. *Акафьева Н.А., Мирошниченко А.Ю., Царев В.А.* Исследование трёхзазорного резонатора мощного многолучевого автогенератора монотронного типа / Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Саратов: «Издательский Центр «Наука», 2010. С. 181-184.

10. *Акафьева Н.А., Мирошниченко А.Ю., Царев В.А.* Мощный СВЧ генератор с четырехззорным резонатором, возбуждаемым на синфазном виде колебаний / СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Севастополь, Украина. 2011. С. 259-261.

11. *Хайков А.З.* Клистронные усилители. М.: Связь, 1974. 391 с.

12. *Григорьев А.Д., Силаев С.А.* Расчет электромагнитного поля азимутально-неоднородных типов колебаний аксиально-симметричных резонаторов с произвольной формой образующей. Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. Вып. 2. 1981. С. 62-65.

13. *Teryaev V.E.* DISKLY code for calculation and optimization of klystrons. Proc. Int. Workshop on Pulsed RF Power Sources for Linear Colliders (RF-93). 1993. pp. 161-166.

14. *Кармазин В.Ю., Царев В.А.* К вопросу моделирования и расчета электронно-оптических систем / Математическое моделирование физических, экономических, технических, социальных систем и процессов: Труды четвертой Междунар. науч.-техн. конф./ УлГУ. Ульяновск, 2001. С. 47-48.