

Программа расчета электродинамической системы клистрона с использованием эквивалентной схемы кольцевого резонатора на виде колебаний E_{0n0}

Р. А. Косарев^{1,*}, И. А. Фрейдович^{2†}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра общей ядерной физики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²АО «Плутон». Россия, 105120, Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 11
(Статья поступила 17.06.2019; Подписана в печать 10.10.2019)

В статье рассмотрены результаты разработки одномерной дисковой математической модели электродинамической системы многолучевого клистрона, учитывающей неидентичность условий взаимодействия электронных лучей с полями кольцевых резонаторов. Представлена эквивалентная схема кольцевого резонатора, работающего на высшем виде колебаний, основанная на уравнениях распространения электромагнитной волны в волноводе с потерями и адекватно отслеживающая амплитудную и фазовую неравномерности СВЧ поля в кольцевых зазорах взаимодействия резонатора.

Неравномерность поля в зазоре взаимодействия может быть вызвана влиянием элементов связи с нагрузкой, неодинаково сгруппированными электронными лучами и другими факторами.

PACS: 84.40.Fe

УДК: 621.385.624

Ключевые слова: клистрон, кольцевые резонаторы, эквивалентная схема, высшие виды колебаний.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, для расчета характеристик одно- и многолучевых клистронов (МЛК) применяется целый ряд математических программ различной степени сложности. Эти программы используют математические модели, представляющие электронный поток в виде произвольного количества крупных частиц — дисков малой толщины. К одномерным программам относятся Magic 1D [1], AJ-Disk 1-D code, Klys 4.5 [2], Астра-3 [3] и пр. Для учета «расслоения» электронного луча по скорости, возникающего вследствие радиальной, относительно оси луча, неоднородности электрического СВЧ поля в пролетных каналах и зазорах взаимодействия, используются двумерные программы, такие как Magic 2D, ARSENAL-MSU [1, 16]. Анализ границ применимости той или иной модели описан в работе [17].

Первичная оптимизация (синтез) электродинамической системы клистрона, то есть выбор количества резонаторов, их параметров, длин и диаметров пролетных каналов, чаще всего проводится с помощью одномерных программ. Это обусловлено их быстроедействием, позволяющим рассмотреть большое количество вариантов конструктивных решений. Двумерные и трехмерные модели позволяют внести уточнения, связанные с «расслоением» пучка.

При расчете многолучевых клистронов используются также перечисленные, главным образом одномерные программы, однако, применение этих программ не учитывает неидентичность процессов взаимодействия

различных электронных лучей с полями резонаторов в случае, когда электрические СВЧ поля в зазорах взаимодействия неравномерны.

Расчет электродинамических систем с неодинаковыми условиями взаимодействия для разных каналов может быть проведен при помощи комплексных программ трехмерного моделирования, симулирующих и резонаторы, и пучки частиц, например, «MAFIA». Однако, расчет выходной АЧХ клистрона в такой программе может занимать десятки часов и не пригоден для решения задач синтеза.

Известно применение и более оперативных математических моделей для учета неидентичности лучей в МЛК [4], [5]. Однако, в этих случаях учитывалась только амплитудная неравномерность СВЧ полей. Кроме того, рассматривались традиционные тороидальные конструкции резонаторов.

Современные тенденции развития мощных и сверхмощных МЛК подразумевают увеличение рабочей частоты и/или мощности клистронов [19, 20]. В настоящее время, это особенно актуально для клистронов мегаваттного уровня мощности, применяемых в системах СВЧ питания ускорителей. Это обстоятельство, а также ограничение величины катодного напряжения клистронов, приводят к необходимости увеличения числа лучей и суммарной площади катодов в клистроне. Поэтому, возникает необходимость использования резонаторов, поперечные размеры зазора взаимодействия которых существенно превышают рабочую длину волны СВЧ поля. При этом, приходится отказываться от традиционных, например, тороидальных конструкций резонаторов, из-за невозможности обеспечить приемлемую равномерность СВЧ полей в зазорах взаимодействия большого диаметра.

В частности, в МЛК 10 см диапазона длин волн, мегаваттного уровня мощности КИУ-111, КИУ-168,

*E-mail: romankosarev1990@gmail.com

†E-mail: ilya.freydovich@gmail.com

КИУ-147 использованы кольцевые резонаторы (см. рис. 1), работающие на виде колебаний E_{010} [6, 18]. Такие резонаторы, представляющие собой свернутый в кольцо волновод типа Н или П, позволяют существенно уменьшить радиальную (в радиальном направлении от оси резонатора) неравномерность поля в кольцевом зазоре взаимодействия. Однако, применение таких резонаторов создает дополнительные трудности, связанные с появлением значительной амплитудной и фазовой неравномерности полей в кольцевых зазорах взаимодействия при любом нарушении аксиальной симметрии, например, наличии аксиально-несимметричных элементов связи с нагрузкой, существенном различии конвекционного тока электронных лучей и т.д. [7].

Необходимость перехода к более высокочастотным диапазонам приводит к тому, что и кольцевые резонаторы на низшем виде колебаний E_{010} не обеспечивают приемлемой радиальной равномерности СВЧ поля в кольцевых зазорах взаимодействия, что приводит к необходимости использования высших видов колебаний кольцевых резонаторов типа E_{0m0} [10–15]. На рис. 4. представлена конструкция кольцевого резонатора на виде колебаний E_{020} . Применение кольцевых резонаторов, работающих на высших видах колебаний, также обуславливает проблему возникновения радиальной и азимутальной неравномерности поля в зазорах.

Учитывая вышесказанное, можно заключить, что на данном этапе необходима разработка математической модели расчета взаимодействия в клистроне, учитывающей фазовые и амплитудные неравномерности СВЧ поля в зазорах взаимодействия пространственно развитых резонаторов, а также неидентичность электронных лучей. К пространственно развитым резонаторам относятся не только кольцевые, но и, например, призматические резонаторы, работающие на высших видах колебаний. При этом, математическая модель должна включать достаточно простые эквивалентные схемы резонаторов, чтобы время расчета позволяло использовать программы для решения задач синтеза.

В предлагаемой статье рассмотрена работа, направленная на создание максимально упрощенной одномерной математической модели электродинамической системы многолучевого клистрона (МЛК), учитывающей неидентичность отдельных электронных лучей. Используется эквивалентная схема кольцевого резонатора, работающего на виде колебаний E_{020} , при этом расчет электродинамической системы МЛК занимает примерно 10–15 минут, что обеспечивает возможность ее применения для решения задач синтеза.

1. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА КОЛЬЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА

Кольцевой резонатор, работающий на низшем виде колебаний E_{010} изображен на рис. 1. Он представ-

ляет собой Н- или П-образный волновод, свернутый в кольцо. Пролетные каналы расположены на одном или нескольких concentрических рядах в области максимума электрического СВЧ поля. В дальнейшем понятием «ряд каналов» будут обозначаться каналы, оси которых расположены на одной окружности, ось которой совпадает с осью кольцевого резонатора.

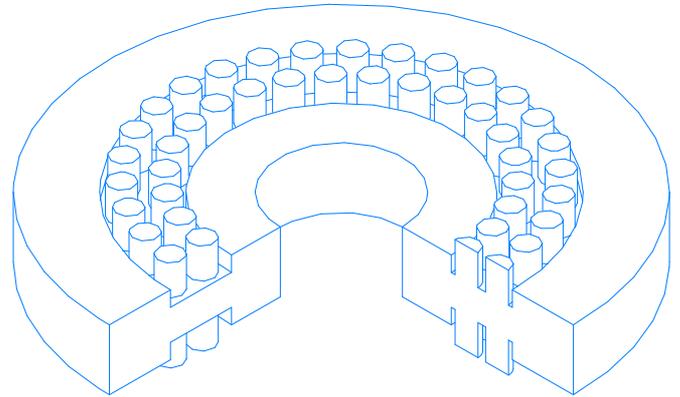


Рис. 1: Изометрическое изображение кольцевого резонатора, работающего на виде колебаний E_{010} с вырезанным для наглядности сектором

Первая попытка создания эквивалентной схемы кольцевого резонатора, работающего на виде колебаний E_{010} , отражена в работе [7]. На рис. 2 показана эквивалентная схема резонатора на виде колебаний E_{010} , связанного с нагрузкой аксиально-несимметричным элементом связи.

Кольцевой резонатор здесь описывается в виде бесконечной цепочки каскадно-соединенных четырехполюсников, каждый из которых моделируется отрезком регулярного волновода с волной H_{10} . Токи и напряжения удовлетворяют условиям периодичности с периодом L , равным длине кольцевого зазора взаимодействия по средней линии. На одном периоде L размещено N четырехполюсников длиной L/N , к клеммам которых присоединено N источников тока, моделирующих наведенные электронными пучками токи. К входным клеммам первого четырехполюсника присоединено сопротивление Z_H , моделирующее сопротивление, вносимое аксиально несимметричным элементом связи с нагрузкой.

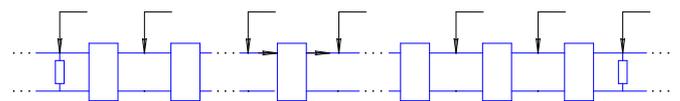


Рис. 2: Эквивалентная схема кольцевого резонатора на основном виде колебаний

Свойства схемы определяются матрицей параметров четырехполюсника \mathbf{M} :

$$\begin{bmatrix} U_k \\ I_k \end{bmatrix} = \mathbf{M} \cdot \begin{bmatrix} U'_k \\ I'_k \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \operatorname{ch}(\gamma \cdot \frac{L}{N}) & Z_{\text{э}} \cdot \operatorname{sh}(\gamma \cdot \frac{L}{N}) \\ \frac{1}{Z_{\text{э}}} \cdot \operatorname{sh}(\gamma \cdot \frac{L}{N}) & \operatorname{ch}(\gamma \cdot \frac{L}{N}) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $Z_{\text{э}}$ — эквивалентное сопротивление волновода, γ — комплексная постоянная распространения в волноводе с потерями в стенках, $1/m$, U_k , I_k — комплексное напряжение и ток на входе k -го четырехполюсника, U'_k , I'_k — комплексное напряжение и ток на выходе четырехполюсника.

Эквивалентное сопротивление волновода на волне H_{10} определяется выражением:

$$Z_{\text{э}} = j \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{b}{a} \cdot \frac{\omega \cdot \mu \cdot \mu_0}{\gamma}, \quad (3)$$

где b — высота регулярного волновода (длина пролета в зазоре взаимодействия резонатора), м; a — ширина регулярного волновода, м, ω — циклическая частота, рад/сек.

Для Н и П-образного волновода $Z_{\text{э}}$ будет больше в 1.1–1.6 раз, по сравнению с регулярным волноводом.

Для рассмотрения зависимости постоянной распространения γ от частоты использована методика, предложенная в работе [8]. Эта методика основана на решении волновых уравнений с граничными условиями, учитывающими конечную проводимость стенок резонатора. В работе показано, что для удовлетворения таких граничных условий должна быть введена комбинация слабо связанных волн TE_{mn} и TM_{mn} волн, где $m = 1 + \delta_1$, $n = \delta_2$, а δ_1 и δ_2 — малые мнимые добавки. Определяя величину этих добавок, выводится формула для активной и реактивной составляющих постоянной распространения.

Такая эквивалентная схема позволяет определить напряжения и токи в точках подключения элементов связи с нагрузкой и в точках подключения источников тока, симулирующих токи, наведенные электронными лучами.

Настройка эквивалентной схемы под характеристики конкретного резонатора, полученные в процессе измерений резонатора на малом уровне мощности, или в процессе 3D расчета, производится следующим образом:

- для резонатора, не связанного с внешней нагрузкой:
 - на схеме убирается сопротивление $Z_{\text{н}}$;
 - подбирается ширина регулярного волновода a , таким образом, чтобы частота максимума АЧХ эквивалентной схемы соответствовала частоте резонатора;
 - высота регулярного волновода b выбирается равной длине зазора взаимодействия резонатора;
 - подбирается величина проводимости стенок регулярного волновода таким образом, чтобы добротность резонанса эквивалентной схемы соответствовала собственной добротности резонатора;
 - подбирается коэффициент, выравнивающий шунтовое сопротивление резонатора с величиной шунтового сопротивления, получаемого на АЧХ эквивалентной схемы. Этот коэффициент всегда больше или равен единице, поскольку, как правило, реальные резонаторы имеют Н- или П-образное радиальное сечение,

а моделируется резонатор, как упоминалось выше, регулярным волноводом;

- подбирается длина L таким образом, чтобы частотный зазор до ближайшего к рабочему резонанса АЧХ соответствовал этой величине моделируемого резонатора.

Следует отметить, что, в процессе подбора величин проводимости стенок и шунтового сопротивления регулярного волновода необходима подстройка ширины a .

Для резонатора, связанного с нагрузкой аксиально-несимметричным элементом связи, повторяются те же действия, после чего в схему вводится сопротивление $Z_{\text{н}}$.

- подбирается активная составляющая $Z_{\text{н}}$. таким образом, чтобы добротность резонанса АЧХ эквивалентной схемы соответствовала нагруженной добротности резонатора;

- подбирается реактивная составляющая $Z_{\text{н}}$. таким образом, чтобы соотношение максимумов резонансов АЧХ на входных клеммах четырехполюсников с номерами 1 и $N/2$ равнялось соотношению измеренных на резонаторе максимумов в сечении элемента связи и напротив него.

- изменяется величина ширины a таким образом, чтобы установить частоту максимума АЧХ эквивалентной схемы равной частоте резонатора.

Характеристики эквивалентной схемы, в том числе и неравномерность поля в зазоре взаимодействия практически совпадают с результатами измерений резонаторов и могут быть использованы для создания математической модели клистрона с кольцевыми резонаторами на виде E_{010} и неидентичными лучами.

Кольцевой резонатор на высшем виде колебаний E_{0n0} по сути можно рассматривать как несколько вложенных друг в друга кольцевых резонаторов на виде колебаний E_{010} . На рис. 3 изображен резонатор на виде колебаний E_{020} . Тонкими линиями отмечена условная граница между вложенными один в другой кольцевыми резонаторами на виде колебаний E_{010} , внутренний диаметр большего по размеру резонатора совпадает со внешним диаметром меньшего.

Поэтому, эквивалентная схема кольцевого резонатора, работающего на виде колебаний E_{0n0} может быть основана на нескольких эквивалентных схемах кольцевых резонаторов на виде колебаний E_{010} с добавлением элементов связи между ними.

На рис. 4 показана эквивалентная схема резонатора на виде колебаний E_{020} , связанного с нагрузкой. Она состоит из двух бесконечных периодических длинных линий, состоящих из четырехполюсников с параметрами, описанными формулами (1)–(3). Длинные линии соединены продольными и поперечными элементами связи.

Основные характеристики резонатора теперь определяются не только свойствами четырехполюсников каждой из длинных линий, но и элементами связи между ними. Элемент связи L_1 определяет передачу энергии

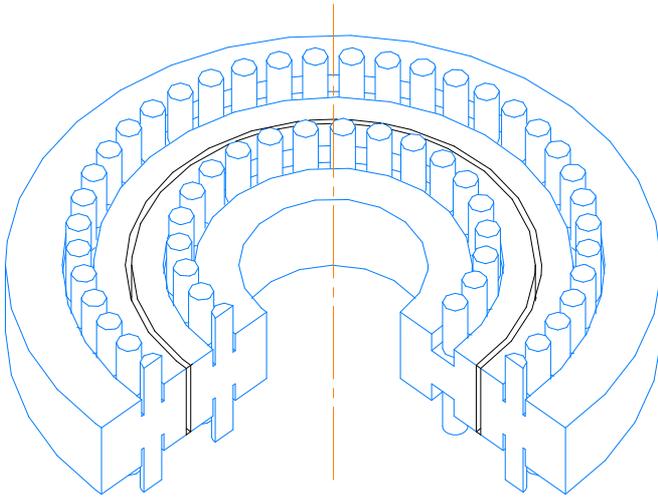


Рис. 3: Изометрическое изображение кольцевого резонатора, работающего на виде колебаний E_{020} с вырезанным для наглядности сектором

между контурами и величину реактивной нагрузки резонатора. Элемент L_2 определяет влияние азимутальной асимметрии питания на свойства резонатора.

В данном случае элементы L_1 и L_2 — индуктивности. Но в общем случае они могут иметь более сложную, комплексную природу.

Для моделирования ненагруженного резонатора с равными шунтовыми сопротивлениями в каналах разных рядов параметры контуров выбираются одинаковыми, и подбираются из принципов, приведенных ранее. Контур эквивалентной схемы должен отвечать следующим требованиям:

- частота контура равна резонансной частоте резонатора;
- добротность должна быть на 15-20% больше добротности резонатора (значение получено методами трехмерного моделирования и измерениями на малом уровне мощности резонатора, закороченного по средней линии);
- частотный зазор для ближайшего к рабочему резонанса АЧХ контура соответствовало частотному зазору до паразитного вида колебаний E_{021} исследуемого резонатора;

Величины L_1 и L_2 подбирается следующим образом:

Кольцевой резонатор рассчитывается в программе трехмерного моделирования в режиме «на проход». В один из каналов внешнего ряда заводится СВЧ-сигнал. Рассчитывается параметр пропускания из запитываемого канала в остальные каналы резонатора. L_1 подбирается таким, чтобы перепад между параметрами пропускания в каналах разных рядов рассчитываемого резонатора соответствовал аналогичной величине в расчете эквивалентной схемы с соответствующей схемой питания. L_2 подбирается таким, чтобы перепад между максимальной и минимальной амплитудами параметра пропускания в каналах внешнего ряда соответствовал

аналогичной величине в расчете эквивалентной схемы с соответствующей схемой питания.

Во входном резонаторе клистрона, использующего кольцевые резонаторы, азимутальная неравномерность поля чаще всего имеет периодическую природу. Это связано с наложением азимутально-неравномерных паразитных видов колебаний (виды типа E_{01n} и E_{02n} , где $n = 1, 2, 3 \dots$) на рабочий вид:

$$I_i = I_0 + I_1^* \cos(i\pi/(N\frac{1}{k})), \quad (4)$$

где I_i — амплитуда наведенного тока первой гармоники в i -том канале, I_0 — средний наведенный ток в ряду каналов, I_1 — наибольшая разница между наведенными токами в ряду каналов, $i = 1, 2, \dots$ — номер канала в ряду, N — число каналов в одном ряду, $k = 2, 4, 6 \dots$ — число полуволн паразитного вида колебаний. Неравномерность наведенных напряжений в промежуточных резонаторах также будет иметь периодическую природу. В резонаторах, работающих на виде колебаний E_{020} различаться могут и средние поля между рядами.

На рис. 5 представлены рассчитанные по эквивалентной схеме амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и фазово-частотная характеристика (ФЧХ) напряжений в каналах резонатора, работающего на виде колебаний E_{020} с наведенными конвекционными токами в каждом пролетном канале резонатора. Сплошными линиями показаны характеристики напряжений на внутреннем ряду каналов, прерывистыми — на внешнем. Средний наведенный ток по внутреннему ряду каналов на 10% меньше, чем на внешнем, разброс наведенных токов по каждому из рядов каналов — 10%.

Данная эквивалентная схема позволяет учитывать влияние как радиальных (между рядами каналов), так и азимутальных (между каналами одного ряда) неравномерностей, позволяет вычислить напряжения на каждом из каналов в зависимости от всех питающих наведенных токов в резонаторе, а значит, отражает необходимые свойства резонатора для создания программы расчета клистрона с неидентичными лучами.

2. ПРОГРАММА РАСЧЕТА КЛИСТРОНА

Основой для разработки программы с неидентичными лучами выберем алгоритм расчета клистрона с идентичными лучами из работы [9].

В работе использована одномерная модель пучка, при которой электронный поток длительностью в один период колебаний разбивается на N_D плоских бесконечно тонких дисков, рассчитывается изменение их фазы по мере пролета вдоль прибора, их взаимодействие между собой, изменение кинетической энергии дисков, наведенные токи в промежуточных резонаторах и взаимодействие резонаторов с дисками. Отдельной подзадачей является итерационный расчет напряжения на выходном зазоре.

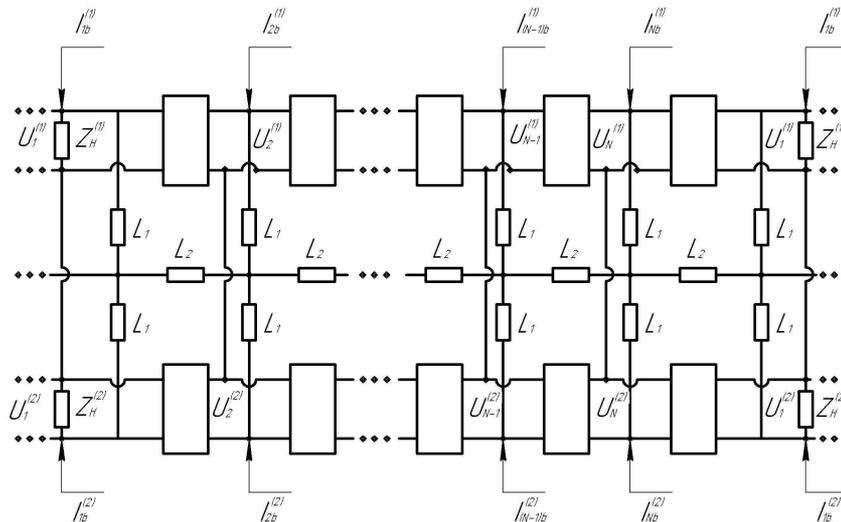


Рис. 4: Эквивалентная схема кольцевого резонатора, работающего на виде колебаний E_{020}

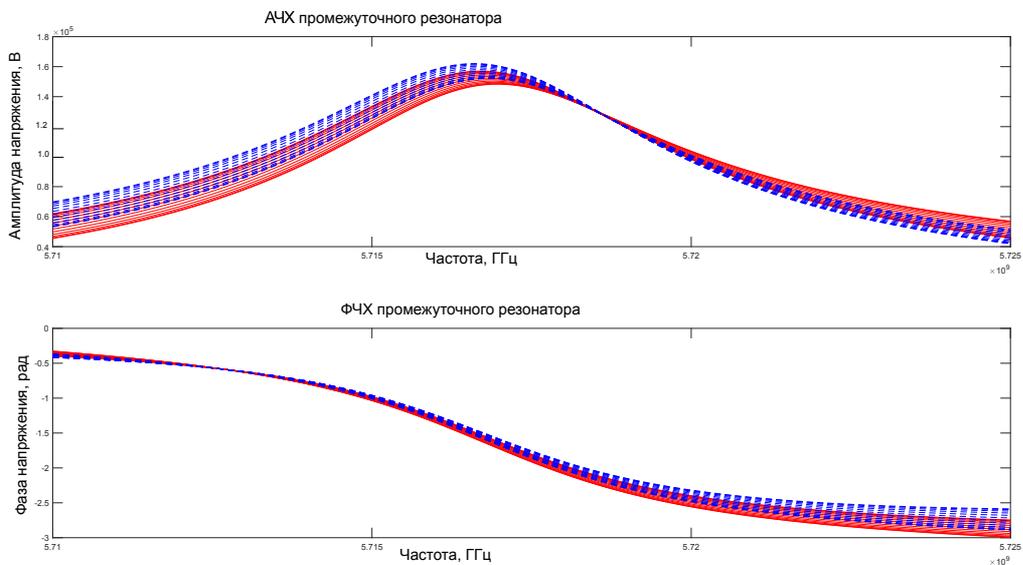


Рис. 5: АЧХ и ФЧХ промежуточного резонатора, Вверху: сплошные линии — амплитуды напряжения на каналах внутреннего ряда, пунктирные линии — амплитуды напряжения на каналах внешнего ряда. Внизу: сплошные линии — фазы напряжения на каналах внутреннего ряда, пунктирные линии — фазы напряжения на каналах внешнего ряда

Один шаг расчета представляет собой пересчет фазы и энергии каждого диска в зависимости от фазы и энергии всех дисков системы при пролете вдоль оси

прибора на малое расстояние.

Пересчет ведется по следующим формулам:

$$\begin{cases} \frac{d\gamma_i}{d\zeta} = \frac{2|e|\lambda^2 I_0 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}}}{N_B N_D m_0 c^2 \pi b^2} \sum_{j=1}^{N_D} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{J_1(\beta_{0n} \frac{b}{a})}{\beta_{0n} J_1(\beta_{0n})} \right]^2 e^{-\frac{\beta_{0n} \beta_e \lambda^2 \delta_{ij}}{2\pi a}} \times \frac{\text{sign}(\delta_{ij})}{\gamma_j^2}, \\ \frac{d\delta_i}{d\zeta} = 2\pi \left\{ \frac{1}{\beta_e} - \frac{\gamma_i}{\sqrt{\gamma_{ji}^2 - 1}} \right\} \quad (i = 1, 2, \dots, N_D) \end{cases} \quad (5)$$

где $\gamma_i = 1 + \frac{eU_i}{m_0c^2}$ — относительная энергия i -го диска, δ_i — фаза i -го диска, $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$, $\zeta = \frac{z}{\lambda}$, z — расстояние вдоль оси прибора, λ — длина волны в вакууме, $\beta = \frac{v_e}{c}$ — нормализованная скорость дисков, v_e — скорость дисков в невозмущенном электронном потоке, a — радиус трубы, b — радиус пучка, I_0 — постоянная составляющая тока, eU_i — энергия электрона в i -ом диске, β_{0n} — нули функции Бесселя (нулевого порядка, первого рода), J_1 — функция Бесселя (первого рода, первого порядка), ND — число дисков на период СВЧ, NB — число лучей в клистроне.

Для учета дисков из соседних периодов, используются следующие правила:

Если $\delta_i < -\pi$, то $\delta_i = \delta_i + 2\pi$;

Если $\delta_i > \pi$, то $\delta_i = \delta_i - 2\pi$;

Если $\delta_{ij} < -\pi$, то $\delta_{ij} = \delta_{ij} + 2\pi$;

Если $\delta_{ij} > \pi$, то $\delta_{ij} = \delta_{ij} - 2\pi$.

Взаимодействие резонатора с дисками описывается изменением кинетической энергии дисков в зависимости от напряжения на зазоре.

Изменение энергии диска после пролета k -ого резонатора:

$$\gamma_i = \gamma_i - \frac{\xi_K \cdot |\dot{U}_K| \cos(\delta_i - \varphi_{UK})}{m_0 \cdot c^2}, \quad (6)$$

где

$$\xi_K = \xi_{gK} \cdot \bar{\xi}_r \quad (7)$$

— коэффициент взаимодействия зазора,

$$\xi_{gK} = \frac{\sin\left(\frac{\gamma_e}{2} \cdot gK\right)}{\left(\frac{\gamma_e}{2} \cdot gK\right)} \quad (8)$$

— коэффициент взаимодействия с пролетной трубой,

$$\bar{\xi}_r = \frac{2 \cdot I_1(\gamma_{eb})}{(\gamma_{eb}) \cdot I_0(\gamma_{eb})} \quad (9)$$

— усреднение по радиусу луча,

$$\gamma_e = \frac{2\pi}{\lambda \cdot \beta_e} \quad (10)$$

— угол пролета, I_0, I_1 — модифицированные функции Бесселя нулевого и первого рода.

Напряжение на входном резонаторе вычисляется по следующим формулам:

$$\dot{U}_1 = \frac{I_{in}}{\beta_1 G_{sh}^{(1)} + \dot{Y}_c^{(1)} + \dot{Y}_e^{(1)}}; \quad (11)$$

$$I_{in} = \sqrt{8P_{in} \cdot \beta_1 \cdot G_{sh}^{(1)}}, \quad (12)$$

где i — номер резонатора,

$$\dot{Y}_c^{(1)} = G_{sh}^{(i)} - j s^{(i)} \cdot 2Q_0^{(i)} G_{sh}^{(1)} \quad (13)$$

— комплексная проводимость резонатора, Ом⁻¹,

$$G_{sh}^{(i)} = \frac{1}{\left(\rho_i Q_0^{(i)}\right)} \quad (14)$$

— действительная проводимость резонатора, Ом⁻¹, ρ_i — характеристическое сопротивление, Ом, $Q_0^{(i)}$ — собственная добротность,

$$\dot{Y}_e^{(i)} = G_e^{(i)} - j B_e^{(i)} \quad (15)$$

— комплексная электронная проводимость, Ом⁻¹, $G_e^{(i)}$ — действительная электронная проводимость, Ом⁻¹, $B_e^{(i)}$ — мнимая электронная проводимость, Ом⁻¹,

$$s^{(i)} = \frac{f_i - f_0}{f_i} \quad (16)$$

— относительная отстройка резонатора, f_i — частота резонатора, Гц, f_0 — центральная частота расчета, Гц, β_1 — коэффициент связи первого резонатора.

Для промежуточного резонатора:

$$\dot{U}_i = \frac{\xi_i \cdot I_1^{(i)}}{Y_c^{(i)} + Y_e^{(i)}}, \quad (17)$$

где

$$I_1^{(i)} = I_1^{(i)'} \cdot I_0, \quad (18)$$

$I_1^{(i)'}$ — относительная величина тока первой гармоники наведенного тока,

$$I_1^{(i)'} = \frac{2}{N_D} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^{N_D} \cos \delta_i + j \cdot \sum_{i=1}^{N_D} \sin \delta_i \right\} \text{ для } 1 < i < N_c, \quad (19)$$

N_c — общее число резонаторов.

Для выходного резонатора:

$$\dot{U}_{N_c} = \frac{\xi_{N_c} \cdot I_1^{(N_c)}}{\beta_2 \cdot G_{sh}^{(N_c)} + \dot{Y}_c^{(N_c)} + \dot{Y}_e^{(N_c)}}, \quad (20)$$

где ξ_{N_c} и $G_{sh}^{(N_c)}$ зависят от напряжения и определяются итерационным процессом:

$$\xi_{N_c} = \xi_{N_c}^{(0)} \cdot \{1 - K_{1\xi} \cdot \alpha_{N_c}^2 - K_{2\xi} \cdot \alpha_{N_c}^4\}, \quad (21)$$

$$G_e^{(N_c)} = G_e^{(N_c)^\circ} \cdot \{1 + K_{1G} \cdot \alpha_{N_c}^2 + K_{2G} \cdot \alpha_{N_c}^4\}, \quad (22)$$

$$\alpha_{N_c} = \frac{|\dot{U}_{N_c}|}{U_0}, \quad (23)$$

$K_{1\xi}, K_{2\xi}, K_{1G}, K_{2G}$ — эмпирические константы [9].

Выходная мощность клистрона рассчитывается по формулам:

$$P_{out}^{(1)} = \frac{|\dot{U}_{N_c}|^2}{2} \cdot \beta_2 \cdot G_{sh}^{(N_c)}, \quad (24)$$

или

$$P_{out}^{(2)} = \frac{I_0 \cdot m_0 \cdot c^2}{N_D} \cdot \sum_{i=1}^{N_D} \left\{ \gamma_i - \left(\gamma_i - \frac{e \cdot |\dot{U}_{N_c}| \cdot \xi_{N_c}}{m_0 \cdot c^2} \cdot \cos(\delta_i - \varphi_{UN_c}) \right) \right\} \cdot \chi, \quad (25)$$

где

$$\chi = \frac{1}{\beta_2 + 1 + G_e^{(N_c)}/G_{sh}^{(N_c)}}. \quad (26)$$

Расчет взаимодействия пучка с выходным резонатором сложнее, чем с промежуточными, так как нелинейная электронная проводимость резонатора и коэффициент взаимодействия пучка с зазором (ξ_{N_c} и $G_e^{(N_c)}$) полиномиально (21), (22) зависят от напряжения на зазоре. Таким образом, для расчета выходного напряжения используется итерационный расчет: значения ξ_{N_c} и $G_e^{(N_c)}$ рассчитываются при $U_{it} = U_0$, по формуле (20) рассчитывается \dot{U}_{N_c} , после в расчет ξ_{N_c} и $G_{sh}^{(N_c)}$ подставляется:

$$U_{it} = (U_{it} + \dot{U}_{N_c})/2, \quad (27)$$

и так далее, пока значения U_{it} и \dot{U}_{N_c} не сравняются по модулю с заданной точностью.

При переходе к конструкции с неоднородными лучами расчет системы дифференциальных уравнений (5) ведется для каждого канала, причем напряжения на входном резонаторе в каждом канале разные и имеют периодическую зависимость, подобной описанной в формуле (4). Среднее напряжение на зазоре входного резонатора рассчитывается по формуле (11), а разница амплитуд напряжений по каналам задается как входной параметр расчета.

Формула (17) заменяется на расчет по эквивалентной схеме (рис.2), в которой напряжение на каждом из каналов рассчитывается в зависимости от свойств резонатора и приложенных к каждому каналу наведенных токов, рассчитанных по формуле (18).

В выходном резонаторе при итерационном расчете пересчитывается напряжение на каждом канале. При этом пересчет ведется по следующим правилам:

$$\begin{aligned} U_{it} &= U_{it} + \left| U_{it} + \dot{U}_{N_c} \right| / N_{it}^p, \text{ если } |U_{it}| < \left| \dot{U}_{N_c} \right|, \\ U_{it} &= U_{it} - \left| U_{it} + \dot{U}_{N_c} \right| / N_{it}^p, \text{ если } |U_{it}| > \left| \dot{U}_{N_c} \right|, \end{aligned} \quad (28)$$

где N_{it} — число итераций, а p — положительный параметр.

На каждой итерации расчета \dot{U}_{N_c} для каждого канала вычисляется из эквивалентной схемы (рис. 2) с учетом ξ_{N_c} и $G_{sh}^{(N_c)}$, зависящих от U_{it} .

Параметр p отвечает за сходимость итерационного расчета. При $p = 0 \dots 1$ последовательность значений U_{it}

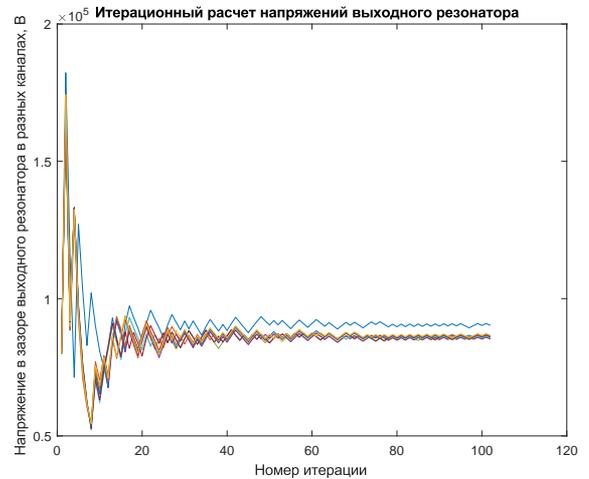


Рис. 6: Итерационный расчет напряжения в выходном резонаторе

для каждого канала не сходится, для значений $p > 2$ расчет сходится слишком медленно. Оптимальное значение параметра $p = 1 \dots 1.5$, при таких значениях напряжения сходятся за 50–100 итераций (рис. 6 для $p = 1.0$).

Мощность рассчитывается по формуле (25) для каждого канала, и затем суммируется.

3. ПРИМЕР РАСЧЕТА ПО ПРОГРАММЕ С НЕИДЕНТИЧНЫМИ ЛУЧАМИ

В этой главе представлен пример расчета клистрона 5-см диапазона [10–15] при заданных частоте, мощности входного сигнала и определенной неравномерности поля во входном резонаторе: $P_{in} = 120$ Вт, $f = 5.712$ ГГц, $I_1/I_0 = 0.01$ (см. (4)).

На рис. 7 изображено изменение фазы дисков в одном из каналов при пролете вдоль клистрона. По оси X отложено расстояние, которое пролетели диски с момента прохождения первого зазора, по оси Y — фаза каждого из дисков. В момент пролета первого резонатора диски взаимодействуют с электрическим полем резонатора, и каждому диску приписывается свойство — фаза, равная фазе электрического поля в момент взаимодействия с ним. Во время пролета вдоль клистрона фаза дисков меняется. Черными линиями на рисунке изображены зазоры взаимодействия.

Количество дисков на период колебаний выбрано 16-

ти, что может быть недостаточно при расчете мощного клистрона. Однако, для читаемости графиков было выбрано меньшее число дисков.

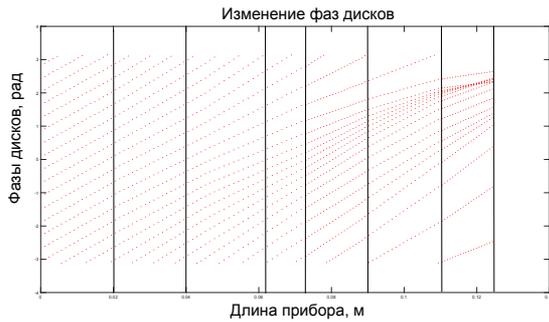


Рис. 7: Изменение фаз дисков при пролете вдоль оси клистрона

На рис. 8 изображены нормированные энергии дисков ($\gamma_i = 1 + \frac{eU_i}{m_0c^2}$) после пролета каждого из зазоров взаимодействия клистрона. Пучки кривых соответствуют разным каналам резонатора. Как видно на рисунке, с каждым последующим резонатором происходит как рост энергии дисков, так и разброс энергий по разным каналам.

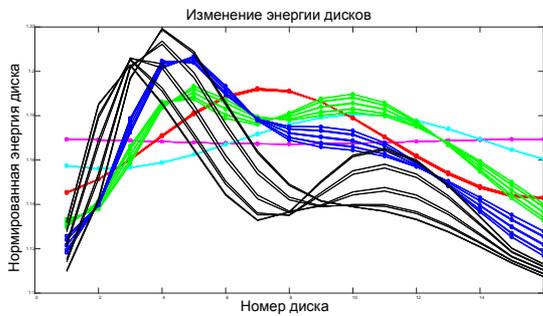


Рис. 8: Нормированные энергии дисков в каждом канале после пролета каждого зазора; розовые линии — резонатор 1, голубые линии — резонатор 2, красные линии — резонатор 3, зеленые линии — резонатор 4 (второй гармоники), синие линии — резонатор 5; черные линии — резонатор 6

На рис. 9 показаны амплитудные значения наведенных токов в промежуточных резонаторах. По рисунку видно, что незначительная (1%) неравномерность токов по каналам во входном резонаторе приводит к значительной (20%) неоднородности токов по каналам в предвыходном резонаторе.

Напряжения в каждом канале выходного резонатора рассчитываются по методике (28) — см. рис.5. Выходная мощность, рассчитанная по формуле (25), равна 2.3 МВт — при необходимых 3 МВт. По рис. 7 видно, что фазы дисков далеки от максимальной группировки — в следующей итерации расчетов следует увеличивать мощность входного сигнала, до достижения оптимума.

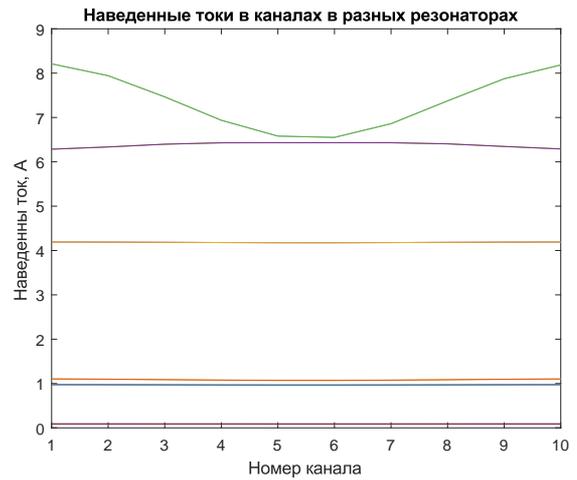


Рис. 9: Наведенные амплитудные токи в разных резонаторах

4. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ПО ПРОГРАММАМ С ИДЕНТИЧНЫМИ И НЕИДЕНТИЧНЫМИ ЛУЧАМИ

На рис. 10 сплошной линией представлена зависимость выходной мощности клистрона на центральной рабочей частоте с оптимальной входной мощностью, рассчитанного по программе с неидентичными лучами. Расчет проводился при идентичных входных данных — частотах резонатора, длинах пролета, входной мощности СВЧ-сигнала. По оси X отложена неоднородность поля во входном резонаторе, по оси Y — выходная мощность прибора. Пунктирной линией отмечена выходная мощность прибора, рассчитанная по программе с дисковой моделью с идентичными лучами, представленной в работе [5].

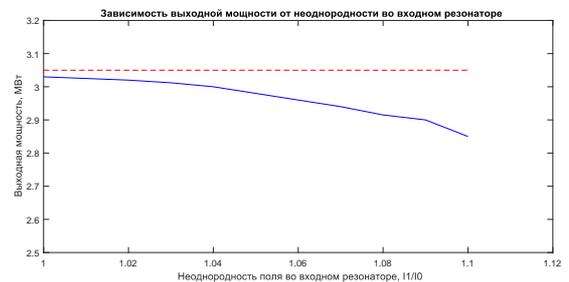


Рис. 10: Зависимость выходной мощности от неоднородности во входном резонаторе

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предлагаемая версия программы расчета МЛК с неидентичными лучами не пригодна, на данный момент, для непосредственного расчета характе-

ристик клистрона, поскольку она не апробирована экспериментальными результатами.

2. Программа позволяет оптимизировать применение резонаторов с реально измеренными или рассчитанными с помощью 3D моделей величинами неравномерности полей в зазорах взаимодействия. В частности:

- Провести оценку влияния фазовой и амплитудной неравномерности входного и выходного резонаторов, связанных с нагрузкой аксиально-несимметричными элементами связи, на характеристики клистрона и оценить допустимые уровни неравномерности. При этом, следует уточнить, что амплитудную неравномерность поля в кольцевом зазоре можно устранить, но фазовая неравномерность обусловлена наложением стоячей и бегущей волн в резонаторе и может быть устранена только применением сложных аксиально-симметричных элементов связи с нагрузкой, или уменьшена применением нескольких, симметрично рас-

положенных локальных элементов связи.

- Провести оценку возможности выбора оптимального азимутального расположения аксиально-несимметричных элементов связи в различных резонаторах, чтобы компенсировать влияние неравномерности полей резонаторов на выходные характеристики клистрона.

3. Данный подход, заключающийся в использовании простых эквивалентных схем резонаторов, может быть полезен не только при разработке клистронов с кольцевыми резонаторами на высших видах колебаний, но и при разработке любых клистронов с достаточно неоднородными полями в разных каналах резонатора (например, клистроны с призматическими резонаторами на виде колебаний H102 или H202 с несимметричной системой подключения нагрузки). При этом необходимо разработать эквивалентную схему, в отражающую свойства резонатора или фильтровой системы и включить ее в расчет.

- [1] *Goplen B., Ludeking L., Smithe D., Warren G.* // Computational Physics Communication. 1995. **27**. P. 54.
- [2] *Малыхин А. В.* // Методы математического моделирования выходных характеристик СВЧ усилителей О-типа. Дисс... доктора физико-математических наук. М, 1997.
- [3] *Цыганов Э. Н.* // Программа расчета амплитудно-частотных характеристик клистронов с фильтровыми системами «Астра-3». М.: ФАП НИИ «Титан», 1986.
- [4] *Chernyavskiy I. A., Cooke S. J., Vlasov A. N.* // IEEE Ttans. on PS. 2008. **36**, N3, P. 670.
- [5] *Пикунов В. М., Родякин В. Е.* // Физические основы приборостроения. 2017. **6**, № 1(23). С. 50.
- [6] *Фрейдвич И. А. Воробьев М. Ю.* Особенности характеристик кольцевых резонаторов многолучевых клистронов, «Электроника, Наука, Технология, Бизнес», 2/98.
- [7] *Фрейдвич И. А.* // Многолучевые пакетированные клистроны с кольцевыми резонаторами, предназначенные для систем СВЧ питания электронных ускорителей. Дисс... канд. физ.-мат. наук, Москва, 2001.
- [8] *Левин Л.* Теория волноводов. Перевод с англ./ Под ред. Вольмана В. И., М.: Радио и связь, 1981.
- [9] *Шведун В. И.* // Разработка и создание ускорителя электронов непрерывного действия-инжектора разрезного микротрона. Дисс.. доктора физ.-мат. наук. Москва, 1992.
- [10] *Р. А. Косарев, И. А. Фрейдвич, Б. В. Прокофьев* // «Проектирование многолучевого клистрона с кольцевыми резонаторами, работающими на виде колебаний E_{020} », Международная научно-техническая конференция «INTERMATIC-2014», МГТУ МИРЭА, Москва, 1-5 декабря 2014 г.
- [11] *Косарев Р. А., Прокофьев Б. В., Фрейдвич И. А.* // «Электродинамическая система мощного 26-лучевого клистрона», Научно-техническая конференция «СВЧ – Электроника, 2015. Наука. Технология. Производство». АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино, 13-14 мая 2015 г.
- [12] *Косарев Р. А., Мартыненко М. А., Прокофьев Б. В., Фрейдвич И. А.* // «Особенности электродинамической системы мощного импульсного клистрона с резонаторами на виде колебаний E_{020} », IV Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ», СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург, 1-4 июня 2015 г.
- [13] *Акимов П. И., Косарев Р. А., Мартыненко М. А., Мельничук Г. В., Прокофьев Б. В., Саблин В. М., Сергеев К. Л., Терентьев Д. А., Фрейдвич И. А., Чудин В. Г., Шведун В. И.* // «Импульсный многолучевой клистрон для питания малогабаритного линейного ускорителя электронов» «Электроника и микроэлектроника СВЧ», СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург, 2016 г.
- [14] *Акимов П. И., Косарев Р. А., Мельничук Г. В., Прокофьев Б. В., Фрейдвич И. А., Чудин В. Г., Шведун В. И.* // «Тенденции развития клистронов, используемых в системах СВЧ питания ускорителей электронов промышленного и медицинского назначения», XXII научно-техническая конференция "Вакуумная наука и техника г. Феодосия, 2015 г.
- [15] *Акимов П. В., Балабанов А. К., Грызлов А. В., Косарев Р. А., Мельничук Г. В., Невский П. В., Сигалаев В. Н., Фрейдвич И. А., Чудин В. Г., Шведун В. И.* // «ФГУП «НПП Торий» - разработчик и изготовитель источников СВЧ сигнала для ускорителей частиц, достижения и перспективы», XXII научно-техническая конференция "Вакуумная наука и техника г. Феодосия, 2015 г.
- [16] *Сандалов А. Н.* // Нелинейные явления при усилении

- электромагнитных волн интенсивными электронными потоками в многолучевых микроволновых усилителях. Дисс. доктора физ.-мат. наук. 2006.
- [17] *Родякин В.Е.* // Нелинейные процессы при группировании электронных потоков в мощных клистронах и пределы применимости аналитических и одномерных численных моделей для их анализа. Труды школы-семинара «Волны-2018». Физика и применение микроволн. Электродинамика. С. 5.
- [18] *Frejdovich I. A., Nevsky P. V., Sakharov V. P., Vorob'ev M. Yu., Knapp E. A., Trower W. P., Yamada H., Kleev A., Alimov A. S., Shvedunov V. I., Chernousov Yu. D., Shebolaev I. V., Gavrish Yu. N., Nikolaev V. M.* // Application of the multi-beam klystrons with reverse permanent magnet focusing system in RF systems of the compact electron accelerators, IVEC 2006. USA, 2006.
- [19] *Matsumoto H., Shintake T., Akasaka N.* et al. // Operation of the C-band 50 MW klystron with smart modulator, in Proc. APAC98.
- [20] *Tanabe E., Fineberg Y., Matsumoto H., Shintake T.* // Medical applications of C-band accelerator technologies, in Proc. PAC98, P. 627.

The program for calculating the electrodynamic system of the klystron using the equivalent circuit of a ring resonator working with E_{0n0} mode

R. A. Kosarev^{1,a}, I. A. Freydovich^{2,b}

¹*Department of Common Nuclear Physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia*

²*AO Pluton. Moscow 105120, Russia*

E-mail: ^aromankosarev1990@gmail.com, ^bilya.freydovich@gmail.com

The article discusses the results of the development of a one-dimensional disk mathematical model of the electrodynamic system of a multi-beam klystron, taking into account the non-identical conditions for the interaction of electron beams with the fields of ring resonators. An equivalent circuit of a ring resonator operating on the highest form of oscillations is presented, based on the equations of electromagnetic wave propagation in a waveguide with losses and adequately tracking the amplitude and phase unevenness of the microwave field in the ring gaps of the resonator interaction.

The unevenness of the field in the interaction gap can be caused by the influence of communication elements with the load, unequally grouped electron beams and other factors.

PACS: 84.40.Fe

Keywords: klystron, ring resonators, equivalent circuit, higher types of oscillations.

Received 17 June 2019.

Сведения об авторах

1. Косарев Роман Андреевич — аспирант; e-mail: romankosarev1990@gmail.com.
2. Фрейдovich Илья Анатольевич — канд. физ.-мат. наук; e-mail: ilya.freydovich@gmail.com.