

# Особенности учёта неоднородности СВЧ поля в области пространства взаимодействия резонатора многолучевого клистрона

Н.А. Голованов, А.В. Галдецкий

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

**Аннотация:** В работе проведено обобщение классической теории взаимодействия электронного потока с СВЧ полем резонатора для случая нескольких электронных пучков. Учтено, что при коллективном возбуждении резонатора многолучевым электронным потоком каждый луч возбуждает электромагнитное поле в зазоре в области всех каналов, но с разной амплитудой. Разработаны одномерная математическая модель взаимодействия нескольких электронных потоков с полями многолучевых резонаторов, а также программный модуль расчёта релятивистского многолучевого клистрона с учётом неоднородного распределения электромагнитного поля в области зазора.

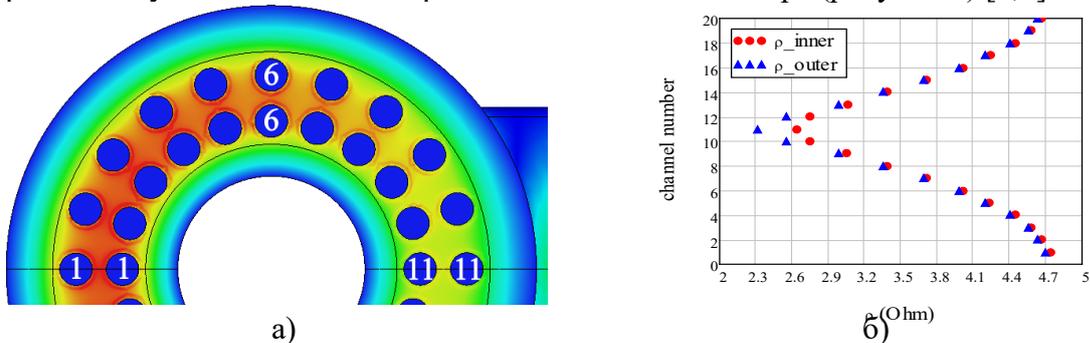
**Ключевые слова:** многолучевой клистрон, теория волн пространственного заряда, дисковая модель электронного потока, характеристическое сопротивление резонатора, Z-матрица.

## 1. Введение

Современные многолучевые клистроны (МЛК) применяются в радиолокации, ускорителях, связи, установках РЭБ и других видах оборонной и гражданской аппаратуры [1]. Один из способов повышения их выходной мощности заключается в увеличении количества лучей и радиуса области взаимодействия с сохранением низкого первеанса отдельных лучей.

При моделировании электронно-волнового взаимодействия в МЛК как правило ограничиваются однолучевым приближением. При этом предполагается, что поле в зазоре взаимодействия многолучевого резонатора однородно, а реальные амплитуды поля, действующие на лучи, заменяются на усредненную по всему зазору величину. С физической точки зрения такой подход неточен и при математическом моделировании такое допущение завышает выходные параметры МЛК. При диаметре зазора сравнимом с  $\lambda/2$ , где  $\lambda$  – длина рабочей волны, возникает заметный перепад амплитуды поля по лучам, что приводит к различиям их характеристического сопротивления.

Кроме того, для обеспечения низкой добротности выходного резонатора, необходима сильная связь с СВЧ трактом, так что наличие вывода энергии также приводит к увеличению неоднородности СВЧ поля в зазоре (рисунок 1) [2,3].



**Рисунок 1.** а) неоднородное распределение поля рабочего колебания кольцевого резонатора МЛК, связанного с выходным трактом (нумерация каналов по азимуту); б) зависимость характеристического сопротивления внутреннего и внешнего кольца каналов от их номера.

При этом классический подход Вайнштейна [4] на основе анализа уединенного резонатора (без вывода энергии) непригоден. В связи с этим актуально создание уточнённой модели взаимодействия нескольких электронных потоков с неоднородными полями в зазоре резонатора МЛК.

## 2. Элементы теории возбуждения резонатора многолучевым электронным потоком

На основе электродинамической теории построена математическая модель многолучевого взаимодействия с учётом неоднородности поля в зазоре.

Рассмотрим три варианта взаимодействия многолучевого потока с полем резонатора:

- входной резонатор, возбуждаемый подводимым сигналом,
- промежуточный резонатор, возбуждаемый токами пучков,
- выходной резонатор, возбуждаемый токами и связанный с внешним трактом.

### 2.1 Возбуждение входного резонатора

Рассмотрим резонатор, связанный с линией передачи, на вход которого подаётся сигнал мощностью  $P_{in}$ . В качестве нагрузки выступает набор из  $N$  потоков со своими электронными проводимостями  $G_{bn}$ , где  $n = 1...N$ .

Если связь с входным трактом слабая, то наличие ввода энергии не оказывает заметное влияние на электродинамические параметры входного резонатора и его можно рассчитывать изолировано от тракта. Анализ возбуждения входной системы МЛК многолучевым электронным потоком проведён с помощью эквивалентной схемы, приведенной к произвольному пучку (рисунок 2) и являющейся простым обобщением модели однолучевого резонатора.

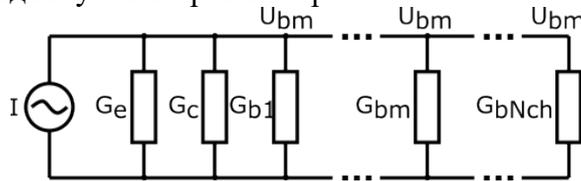


Рисунок 2. Эквивалентная схема входного резонатора МЛК. Обозначения:  $I$  – ток генератора (входной сигнал);  $G_{ext}$ ,  $G_c$  – проводимости генератора (внешняя) и резонатора.

Коэффициент трансформации по напряжению от  $i$ -го к  $m$ -му зазору равен  $k_U = U_m/U_i = \sqrt{\rho_m/\rho_i}$  и определяет преобразование импедансов пучков. В результате напряжение в зазоре  $m$ -го пучка  $U_m$  зависит от импедансов всех пучков:

$$U_m = \left( \rho_m \sqrt{8G_{ext}P_{in}} \right) / \left| \rho_m (G_c + G_{ext}) + \sum_{n=1}^N (\rho_n G_{bn}) \right|, \quad (1)$$

где  $\rho_m = \left( \int E_z(z)_m dz \right)^2 / 2\omega W$  – характеристическое сопротивление резонатора в области  $m$ -го потока,  $E_z(z)_m$  – продольная компонента поля в области  $m$ -го потока,  $W$  – запасённая в резонаторе энергия. Величины  $\rho_m$  могут быть рассчитаны с помощью решения задачи на собственные значения (Eigenmode solver) в любом программном обеспечении для электродинамического анализа.

Для случая сильной связи с трактом поле резонатора отличается от собственного колебания уединенного резонатора, и ВЧ напряжение, действующее в зазоре  $m$ -го пучка, определяется через  $Z$ -матрицу резонатора [5] (см. также п. 2.3 ниже), где

индексы  $1...N$  отвечают сосредоточенным портам в области пучков, а индекс  $N+1$  соответствует входному волноводу:

$$U_m = \frac{Z_{m,N+1}}{Z_0 + Z_{m,N+1}} \sqrt{8Z_0 P_{in}}, \quad (2)$$

где  $Z_0$  – волновой импеданс волновода,  $Z_{m,N+1}$  – элемент столбца  $Z$ -матрицы резонатора.  $Z$ -матрица резонатора легко вычисляется во многих электродинамических решателях.

## 2.2 Возбуждение промежуточного резонатора

Многолучевой электронный поток, возбуждая промежуточный резонатор, не оказывает сильного возмущения собственного СВЧ поля, а отсутствие элементов связи с трактом позволяет рассчитывать напряжение на зазоре уединённого резонатора в области  $m$ -го электронного потока с помощью Eigenmode solver через величины характеристических импедансов:

$$U_m = \sqrt{\rho_m} Q \sum_{n=1}^N \{I_{ind_n} \sqrt{\rho_n}\}, \quad (3)$$

где  $Q$  – собственная добротность резонатора,  $I_{ind_n}$  – амплитуда первой гармоники тока, наведённого в резонаторе  $n$ -м пучком.

## 2.3 Возбуждение выходного резонатора

Для мощных и широкополосных клистронов характерна сильная связь резонатора с внешним трактом, что изменяет его электродинамические параметры: сдвигается частота рабочего колебания, нарушается однородность поля в зазоре. Поэтому использование модели уединенного резонатора дает значительную погрешность. Более того, моделирование с помощью Eigenmode solver резонатора, нагруженного на внешний тракт, показывает, что рассчитанные добротность и характеристическое сопротивление зависят от длины участка внешнего тракта, поскольку от нее зависит величина запасенной энергии.

Предлагается методика расчёта параметров нагруженного резонатора, не зависящая от выбора длины участка связи с внешней линией. Для этого моделируется возбуждение резонатора дискретным источником тока, заменяющим электронный поток, определяются импеданс резонатора в области расположения источника и передаваемая мощность.

Далее, с помощью эквивалентной схемы колебательного контура и полученных частотных зависимостей импеданса и мощности определяются сосредоточенные параметры схемы, рассчитываются добротность и характеристическое сопротивление.

$$\begin{cases} R = \left\{ \frac{3}{4} \right\} Zre_{\max} F^2 / \left\{ \sqrt{F^2 + \frac{1}{3} + \frac{1}{2\sqrt{3}}} \right\}^2 \\ L = \left\{ \frac{3}{4} \right\}^{\frac{5}{4}} \frac{Zre_{\max} |F|}{2\pi f} \sqrt{\sqrt{F^2 + \frac{1}{3} + \frac{1}{\sqrt{3}}}} / \left\{ \sqrt{F^2 + \frac{1}{3} + \frac{1}{2\sqrt{3}}} \right\}^2 \\ C = \left\{ \frac{4}{3} \right\}^{\frac{3}{4}} \frac{1}{Zre_{\max} F^2} \frac{1}{2\pi f_0} \left\{ \sqrt{F^2 + \frac{1}{3} + \frac{1}{2\sqrt{3}}} \right\} \sqrt{\sqrt{F^2 + \frac{1}{3} - \frac{1}{\sqrt{3}}}} \end{cases} \quad (4)$$

$$Q_{load} = 2\pi f_0 \left\{ (2\pi f_0 LC)^2 + (CR)^2 \right\} / (RC), \quad \rho = 1/(2\pi f_0 C)$$

где  $F = \frac{f_{h1}^2 - f_{h2}^2}{2f_0^2}$ ,  $f_{h1}$  и  $f_{h2}$  – частоты, при которых достигается половина амплитуды вещественной части импеданса,  $f_0$  – частота, при которой мнимая часть импеданса обращается в ноль,  $Zre_{max}$  – максимум амплитуды вещественной части импеданса,  $Q_{load}$  – нагруженная добротность резонатора.

Полученные выражения для нагруженной добротности и характеристического импеданса позволяют определить напряжение на зазоре в области каждого электронного потока с учётом вклада остальных потоков:

$$U_m = \sqrt{\rho_m} Q_{load} \sum_{n=1}^N \{Iind_n \sqrt{\rho_n}\}, \quad (5)$$

Альтернативный способ вычисления напряжения на зазоре нагруженного резонатора, основанный на использовании формализма  $Z$ -матрицы, предлагается в [5]. Так, нагруженный  $N$  потоками многолучевой резонатор с выходным волноводом можно представить как  $(N+1)$ -полюсник, описываемый  $Z$ -матрицей. Отсюда, пренебрегая проводимостью пучков  $G_{bn}$ , для ВЧ напряжения в области  $m$ -го пучка в нагруженном резонаторе получаем:

$$U_m = \sum_{n=1}^N Iind_n \left[ Z_{m,n} - \frac{Z_{m,N+1} Z_{N+1,n}}{Z_{N+1,N+1} + Z_0} \right], \quad (6)$$

где  $Iind_n$  – ток, наведённый  $n$ -м пучком.

В случае высокой нагруженной добротности резонатора структура поля мало отличается от структуры поля собственной моды. Тогда можно показать, что выражение (6) эквивалентно полученной ранее формуле (5).

Выходная мощность МЛК определяется вкладом всех электронных потоков:

$$P_{out} = G_{ext} \sum_m (U_m^2 \rho_m) / \left( 2 \sum_n \rho_n \right), \quad (7)$$

где  $G_{ext}$  – внешняя проводимость. Или в терминах  $Z$ -матрицы:

$$P_{out} = \left\{ \sum_{n=1}^N Iind_n \left[ Z_{N+1,n} - \frac{Z_{N+1,N+1} Z_{N+1,n}}{Z_{N+1,N+1} + Z_0} \right] \right\} / 2Z_0 \quad (8)$$

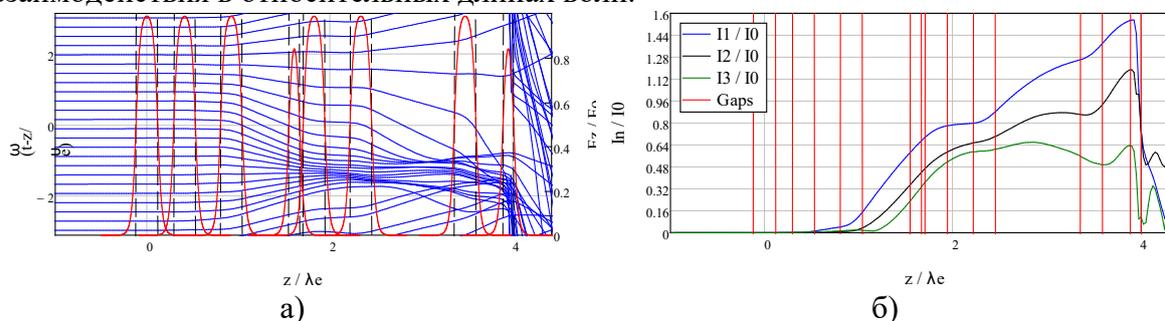
Полученные выражения для напряжения в области  $m$ -го электронного потока и выходной мощности многолучевого резонатора зависят от токов всех остальных  $N-1$  потоков и соответствующих им элементов  $Z$ -матрицы. При  $N=1$  выражения (1), (3), (5), (7) описывают обычное однолучевое взаимодействие в клистроне [6].

### 3. Программный модуль электронно-волнового взаимодействия в МЛК

Для расчёта выходных параметров МЛК с учётом влияния неоднородности поля в зазоре резонатора, разработан программный модуль. Он основан на математической модели, включающей теорию волн пространственного заряда (теория малого сигнала) и дисковой модели электронного потока (теория большого сигнала) [7,8]. Для резонаторов группирователя рассматривается линейная теория группирования электронного потока в пространстве дрейфа, когда поток электронов представляется в виде суперпозиции волн пространственного заряда. Для предвыходного и выходного резонаторов применяется теория большого сигнала на основе нелинейных уравнений

группирования электронного потока и дисковой модели.

Разработанный программный модуль был использован для расчёта мощного многолучевого клистрона S-диапазона длин волн. Для демонстрации его работы на рисунке 3 а) приведены фазовые траектории вместе с распределением поля в зазоре, а на рисунке 3 б) распределение первых 3х гармоник тока по длине пространства взаимодействия в относительных длинах волн.



**Рисунок 3.** а) Фазовый траектории с распределением поля в зазоре в относительных длинах волн. Красной сплошной линией обозначены продольные компоненты электрического поля в зазоре; б) первые 3-и гармоники конвекционного тока по длине пространства взаимодействия в относительных длинах волн. Красной линией обозначены границы зазора резонаторов.

В таблице 1 представлено сравнение выходных параметров клистрона с учётом усреднения по лучам характеристических сопротивлений и при учете реального перепада  $\rho$  по каналам в 20 %.

**Таблица 1.** Параметры исследуемого многолучевого клистрона

Перепад характеристического сопротивления между каналами	Число электронных лучей	Ускоряющее напряжение, кВ	Общий ток, А	Выходная мощность, МВт	Усиление, дБ	КПД
Равномерное	40	75	408	17.4	55.4	56
20%	40	75	408	16.5	55.2	51

Согласно результатам, представленным в таблице 1, при учёте даже такой небольшой неоднородности поля в зазоре (перепада характеристического сопротивления) выходные параметры клистрона снижаются и становятся ближе к измеренным значениям.

#### 4. Заключение

В работе рассмотрена уточнённая модель взаимодействия нескольких электронных потоков с неоднородными полями в зазоре резонатора. Получены выражения для напряжений на зазоре изолированного многолучевого резонатора, а также при слабой или сильной связи с трактом. Учтено, что при возбуждении резонатора многолучевым электронным потоком каждый луч возбуждает электромагнитное поле не только в своей окрестности, но и в соседних каналах. Показано, что неоднородность поля в зазоре многолучевого клистрона может приводить к заметному снижению выходной мощности.

#### Список литературы

1. Фрейдович И. А. и др. Перспективы развития многолучевых клистронов //Материалы III Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург. – 2014. – С. 25.
2. Комаров Д. А. и др. Разработка сверхмощного многолучевого клистрона S-диапазона КИУ-278.

- //Сборник статей XI Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург. – 2022. – С. 212.
3. Егоров Р. В. и др. Физические причины ограничения эффективности мощных многолучевых клистронов //Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2020. – №. 5. – С. 63-69.
  4. Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны//М.: Сов //Радио. – 1957. – С. 16.
  5. Галдецкий А. В. О возбуждении резонаторов многолучевых клистронов электронными пучками // 31-я Международная научно-техническая конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» Крымико-2021, 5-11 сентября 2021 г., Севастополь. Сборник научных трудов – 2021. - Вып. 3. – С. 55-56.
  6. Вайнштейн Л. А., Солнцев В. А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике, Изд-во" Советское радио //Москва. – 1973.
  7. Wessel-Berg T. Space-charge wave theory of interaction gaps and multi-cavity klystrons with extended fields. – 1960.
  8. Шевчик В. Н., Трубецков Д. И. Аналитические методы расчета в электронике СВЧ. – 1970.