

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра нелинейной физики

**Экспериментальное и теоретическое исследование параметров  
пролетного клистрона микроволнового диапазона**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

Студента 4 курса 411 группы  
направления: 03.03.01. «Прикладная математика и физика»  
Факультета нелинейных процессов

Ракова Виктора Олеговича

Научный руководитель  
профессор, д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_

Б.С. Дмитриев

Зав. кафедрой  
профессор, д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_

Н.М. Рыскин

Саратов 2016 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Усилители мощности на многорезонаторных клистронах находят широкое применение в современной технике СВЧ. Клистронные передатчики используются в тропосферной радиорелейной связи, в космической связи, телевидении, радиолокации и навигации. Клистронные усилители применяются также в технике ускорителей элементарных частиц. В диапазонах сантиметровых и дециметровых волн клистроны успешно конкурируют со всеми остальными типами электронных приборов СВЧ [1-6].

Одним из важных параметров сложных объемных СВЧ резонаторов является эффективное характеристическое сопротивление  $M^2\rho$ , где  $M$  – коэффициент электронного взаимодействия,  $\rho$  – характеристическое сопротивление. Этот параметр учитывает специфику энергообмена высокочастотного поля резонатора с электронным пучком и позволяет характеризовать эффективность происходящего взаимодействия [4].

В современных мощных клистронах широкое применение находят двухзазорные объемные резонаторы, характеризующиеся высоким значением  $M^2\rho$  и обеспечивающие высокую эффективность пролетных клистронов на их основе.

В большинстве практических случаев определение  $M^2\rho$  расчетным путем является очень сложной задачей и в некоторых случаях невыполнимой из-за сложной функциональной зависимости от многих конструктивных и физических факторов, таких как форма резонатора, конструкция зазоров, геометрия пространства взаимодействия, величина пространственного заряда пучка, степень заполнения пучком пролетного канала и т.д. Поэтому выбор

той или иной конструкции резонаторов для конкретного прибора весьма сложен.

В этой связи представляют интерес экспериментальные методы исследования параметра  $M^2\rho$ .

В дипломной работе предложена и реализована методика определения параметра  $M^2\rho$  на пятирезонаторном клистроне, основанная на применении линейного режима работы прибора.

**Целью** настоящей дипломной работы является исследование различных параметров пятирезонаторного промышленного пролетного клистрона средней мощности с двухззорными резонаторами.

**Задачи:**

1. Расчет параметров объемных двухззорных резонаторов СВЧ.
2. Расчет редуцированной плазменной частоты электронного потока, исследуемого пролетного клистрона.
3. Анализ коэффициента усиления многорезонаторного клистрона в линейном режиме.
4. Измерения коэффициента усиления клистрона в линейном режиме для различных токов и ускоряющих напряжений электронного потока.
5. Определение эффективного характеристического сопротивления по полученным экспериментальным данным.

Бакалаврскую работу можно разделить на 2 раздела:

В **первом разделе** был произведен вывод рабочих формул для расчета эффективного характеристического сопротивления и коэффициента электронного взаимодействия  $M$  двухззорных резонаторов.

Во **втором разделе** был произведен вывод рабочих формул для расчета коэффициента усиления клистрона, редуцированной плазменной частоты. Был произведен эксперимент с целью измерения коэффициента усиления клистрона и определено эффективное характеристическое сопротивление исходя из результатов измерений.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в процессе выполнения дипломной работы.

### **Основное содержание работы.**

В **первом разделе** был произведен вывод рабочих формул для расчета эффективного характеристического сопротивления и коэффициента электронного взаимодействия  $M$  двухзачорных резонаторов.

Усредненный коэффициент электронного взаимодействия можно представить в виде:

$$M_r = M(a) \cdot \mu_r = \frac{\sin \frac{\beta_e d}{2}}{\frac{\beta_e d}{2}} \cdot \sin \beta \frac{l+d}{2} \cdot \frac{2I_1(\beta_e b)}{\beta_e b \cdot I_0(\beta_e a)}$$

По полученным формулам был произведен расчет параметра  $M$  и построен график зависимости  $M$  от ускоряющего напряжения.

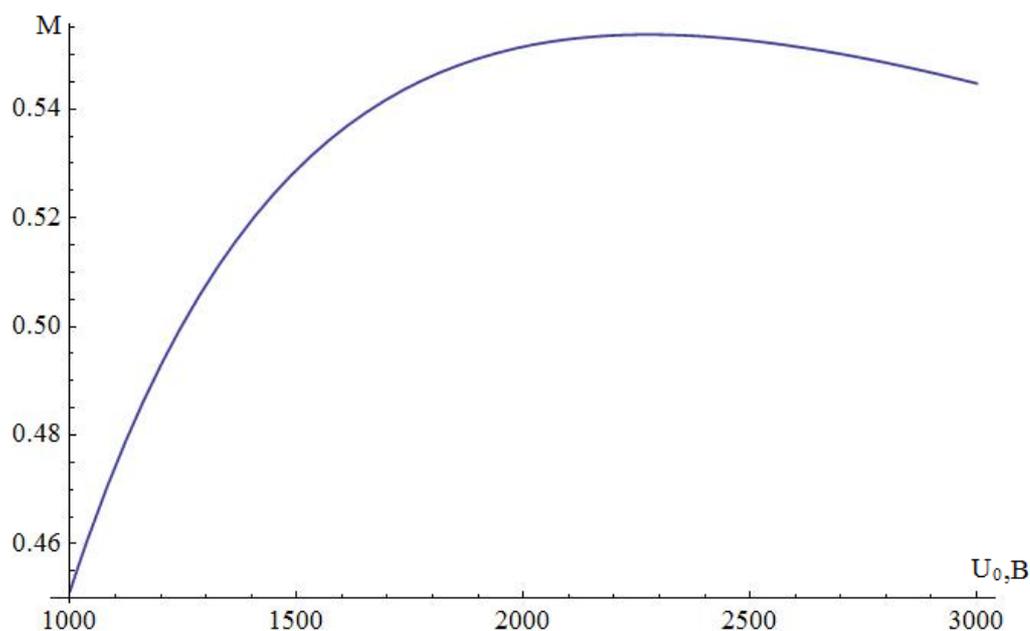


Рисунок 1.

Расчетная зависимость усредненного коэффициента электронного взаимодействия от ускоряющего напряжения (для  $f=2800$  МГц) представлена на рисунке 1.

Эффективное характеристическое сопротивление  $M^2 \rho$  не зависит ни от способов определения ВЧ напряжения, ни от затухания в системе и является инвариантной характеристикой, определяющей эффективность взаимодействия пучка с полем резонатора:

$$M^2 \rho = \frac{\left| \int_a^b E_z(z) e^{j\beta_e z} dz \right|^2}{2\omega_0 W}$$

По физическому смыслу этот параметр близок к сопротивлению связи замедляющих систем и также характеризует эффективность СВЧ прибора.

Во **втором разделе** был произведен вывод рабочих формул для расчета коэффициента усиления клистрона и редуцированной плазменной частоты.

Формула для расчета коэффициента усиления клистрона в линейном режиме имеет вид :

$$K_p = \left( \frac{M_r^2}{2} \theta_0 \frac{\sin \frac{\omega_q l_k}{v_0}}{\frac{\omega_q l_k}{v_0}} \right)^{2n-2} \cdot \left( \frac{G_0}{G_3} \right)^{2n-3} \cdot \frac{G_0}{2G_{\text{ВЫХ}}} \cdot \left( 1 - \frac{G_3}{G_{\text{ВЫХ}}} \right)$$

### **Расшифровка параметров**

$M_r$  – усредненный коэффициент электронного взаимодействия;

$G_3$  - собственная проводимость резонатора;

$\omega_q$  - редуцированная плазменная частота;

$\theta_{01}$  - угол пролета в пространстве дрейфа;

$v_0 = \sqrt{2 \frac{e}{m} U_0}$  - постоянная скорость электронов;

$l_k$  - расстояние между двумя резонаторами.

Продольная разгруппировка обусловлена продольным электрическим полем, возникающем в промодулированном по плотности электронном пучке между центрами электронных сгустков и их краями из-за действия кулоновских сил. В результате форма электронных сгустков сглаживается, а амплитуда первой гармоники уменьшается. Эффект продольной разгруппировки описывается редуцированной, плазменной частотой  $\omega_q$ , учитывающей размеры поперечного сечения пучка и пролетной трубы. Величина  $\omega_q$  определяется соотношением:

$$\omega_q = R \cdot \omega_p = R \cdot 1,83 \cdot 10^{10} \cdot J_0^{\frac{1}{2}} \cdot U_0^{-\frac{1}{4}}$$

где  $J_0$  - плотность тока пучка

$R$  - коэффициент редукиции.

Приблизенно коэффициент редукиции можно рассчитывать также по формуле :

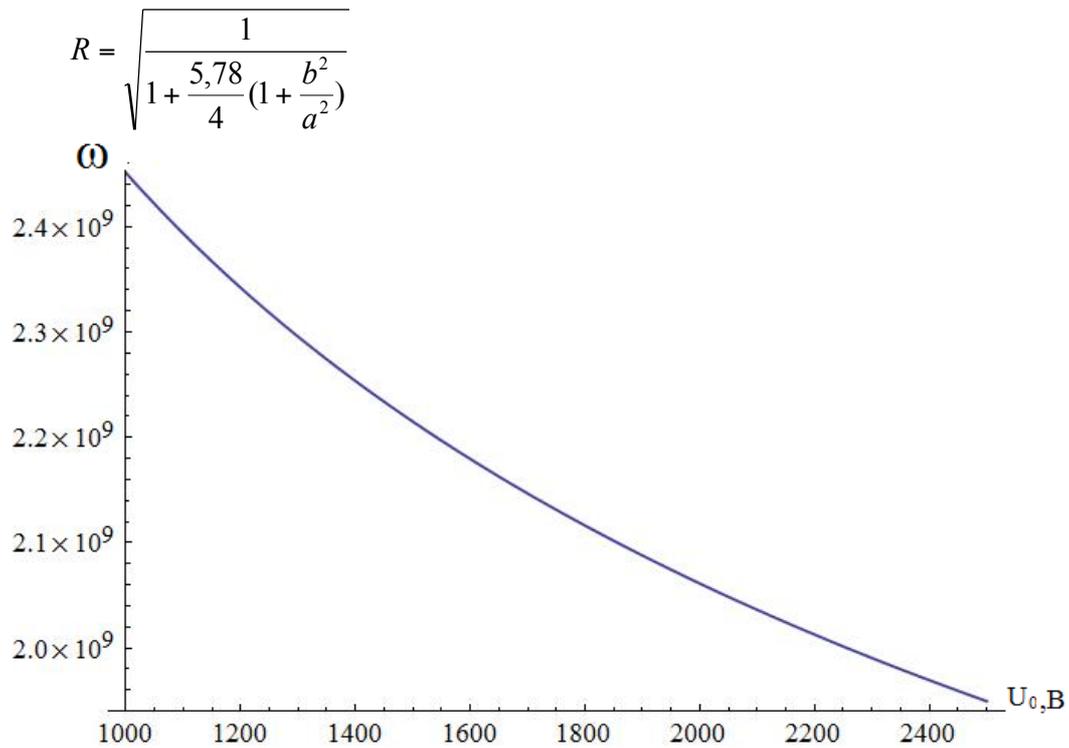


Рисунок 2.

На рисунке 2 представлена зависимость редуцированной плазменной частоты от напряжения для тока электронного пучка  $I_0 = 50 \text{ mA}$ .

Был произведен эксперимент с целью измерения коэффициента усиления клистрона и определено эффективное характеристическое сопротивление исходя из результатов измерений. Схема экспериментальной установки показана на рисунке 3.

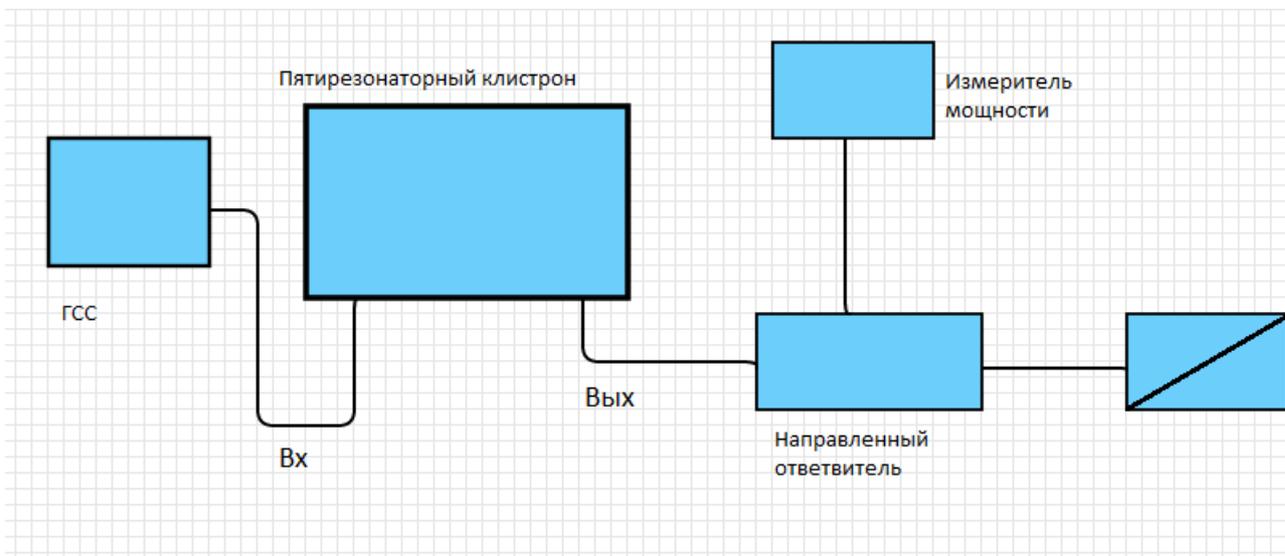


Рисунок 3.

Следует отметить, что измерения были выполнены с помощью современной цифровой аппаратуры.

Гармонический сигнал, снимаемый с генератора стандартных сигналов Agilent N5181A, поступал на вход исследуемого клистрона. Выходной сигнал клистрона через направленный ответвитель поступает на измеритель мощности Agilent N1912A. Измеритель мощности не рассчитан на измерение большой выходной мощности клистрона. Поэтому для измерения этой мощности используется направленный ответвитель, переходное ослабление которого определялось по схеме (Рис.4). Эксперимент дал значение 30 дБ.

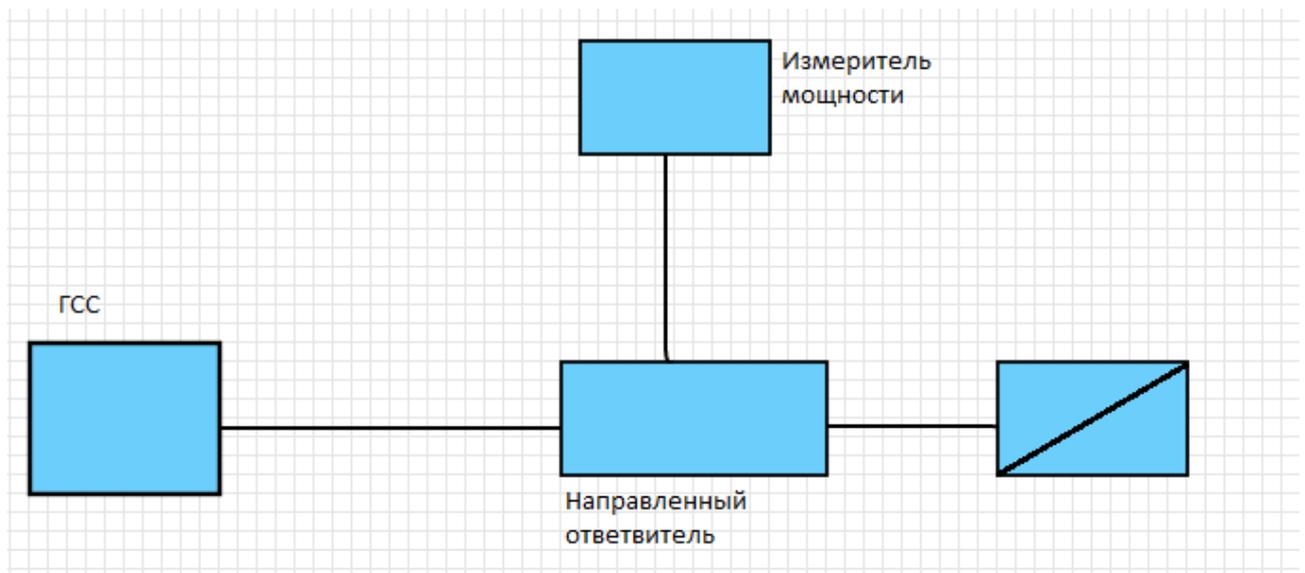


Рисунок 4.

Полученные экспериментальные данные представлены на рисунке 5.

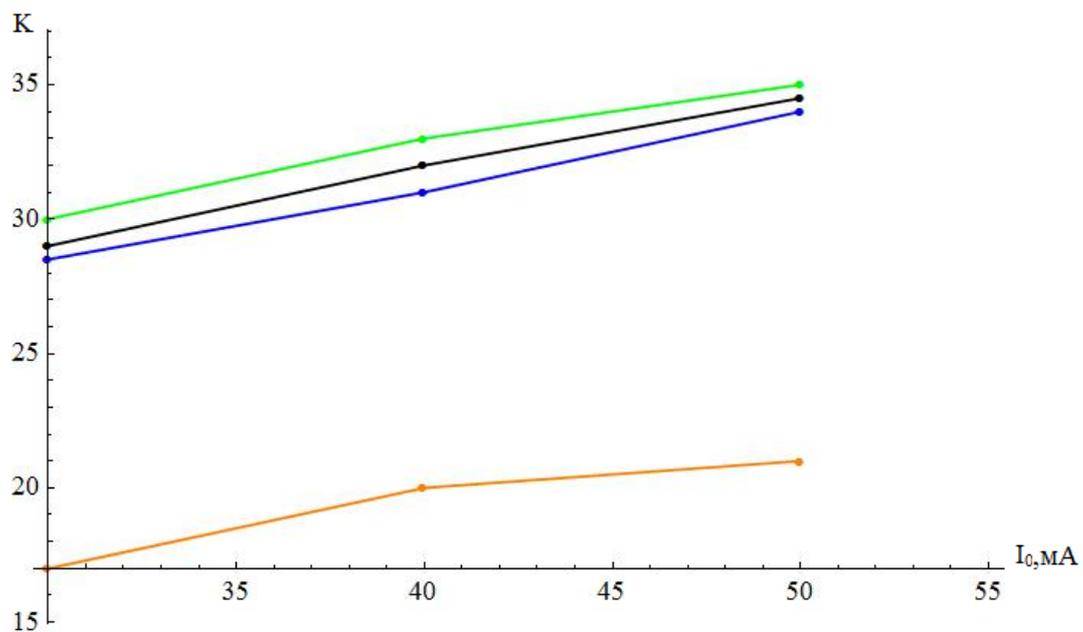


Рисунок 5 - Зависимости коэффициента усиления клистрона  $K$  для различных значений ускоряющего напряжения  $U_0$  в линейном режиме от тока электронного пучка (зеленый – 2500В, черный – 2200В, синий 2000В, оранжевый – 1500В).

По обработанным экспериментальным данным были получены результаты, показанные точками на зависимости, приведенной на рисунке 6.

Из графиков видно, что в области оптимальных для работы клистрона ускоряющих напряжений наблюдается хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных, а именно в пределах от 2000В до 2500В.

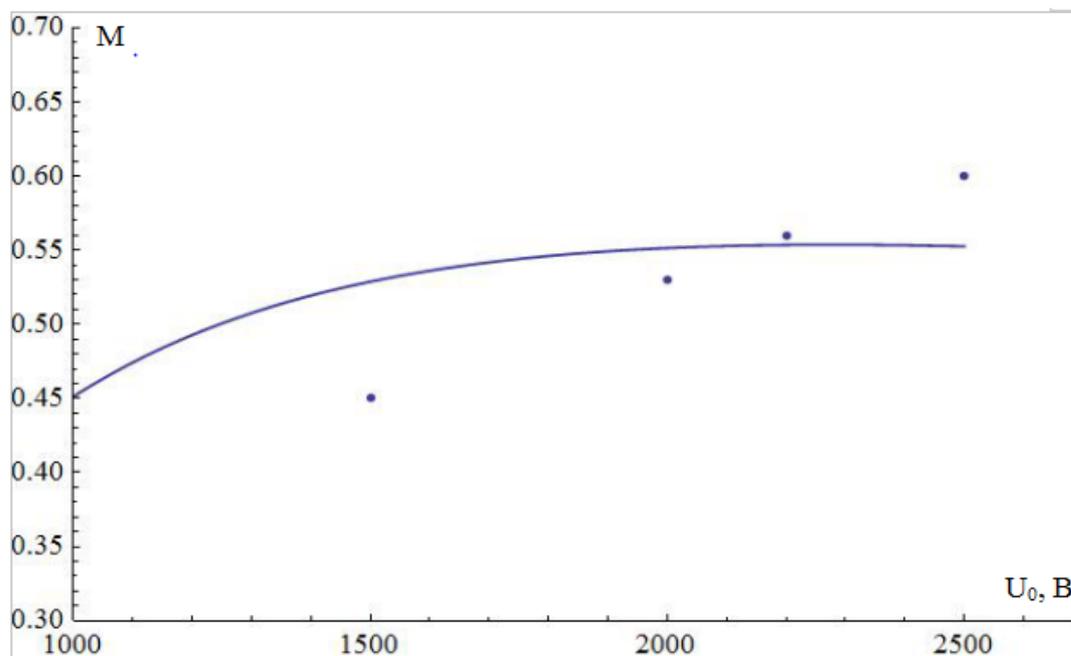


Рисунок 6. Расчетные и экспериментальные значения  $M$  в зависимости от ускоряющего напряжения клистрона.

Можно отметить, что в литературе нам не известны данные по такому прямому сопоставлению расчетных и экспериментальных данных для коэффициента электронного взаимодействия.

Как уже отмечалось выше, эффективность многорезонаторного клистрона в значительной степени определяется величиной эффективного характеристического сопротивления  $M^2\rho$  применяемых в приборе двухзазорных объемных резонаторов. Полученные экспериментальные данные позволяют оценить этот параметр для исследуемого пролетного клистрона. Эта величина рассчитывается по формуле:

$$M^2 \rho = \sqrt[8]{\frac{K}{\frac{1}{2^9} \left(\frac{\omega}{\omega_q}\right)^8 \cdot \left(\sin \frac{\omega q l k}{v_0}\right) \cdot G_0^8 \cdot Q_0^6 \cdot Q_H (Q_0 - Q_H)}}. \quad (23)$$

Обратим внимание, что само характеристическое сопротивление  $\rho$  двухззорного резонатора не зависит от тока и ускоряющего напряжения клистрона, это индивидуальная электродинамическая характеристика резонатора. Это следует иметь в виду при обработке экспериментальных результатов, показанных на рисунке 15.

Для рабочего тока клистрона 50мА среднее значение  $M^2 \rho$  в диапазоне напряжений 2000-2500В меняется в пределах 84-107Ом, что характерно для эффективных клистронов сантиметрового диапазона с двухззорными резонаторами [8].

Следует отметить, что полученные соотношения изложенной методики, строго говоря, справедливы для синхронного режима всех резонаторов, когда резонансные частоты всех пяти резонаторов клистрона считались одинаковыми. Это приводит к определенной систематической погрешности измерений, которую оценить трудно, к тому же и относительная расстройка промежуточных резонаторов невелика, не превышает 1%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выполненной бакалаврской работе была разработана методика измерения одного из важных параметров объемных резонаторов СВЧ – эффективного характеристического сопротивления, в значительной степени определяющего выходные характеристики приборов клистронного типа.

Исследования проводились на промышленном пятирезонаторном клистроне средней мощности десятисантиметрового диапазона с двухзазорными резонаторами с противофазным типом колебаний.

В основе методики измерений лежат соотношения, характеризующие усиление клистрона в линейном режиме. Измерения были проведены для разных токов и напряжений клистрона на измерительных схемах с применением современной чувствительной аппаратуры Agilent.

Для обработки результатов экспериментов необходимо было провести изучение величины редуцированной плазменной частоты электронного потока клистрона в разных режимах. В итоге были определены эффективное характеристическое сопротивление двухзазорного резонатора и изменение коэффициента электронного взаимодействия такого резонатора в разных режимах, что, судя по литературным источникам, мало изучено.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов «Лекции по СВЧ электронике для физиков». Том 1. Москва. Физматлит. 2003 г.
2. В.Н. Шевчик «Основы электроники сверхвысоких частот». М., «Советское радио», 1959.
3. В.И. Гайдук, К.И. Палатов, Д.М. Петров «Физические основы электроники сверхвысоких частот». М., «Советское радио», 1971.
4. А.З. Хайков «Клистронные усилители». Издательство «Связь» Москва 1974.
5. Ю.А. Кацман «Приборы сверхвысоких частот». Том 2 «Высшая школа» Москва – 1973.
6. И.И. Зильберман, Ю.А. Кацман «Многорезонаторные пролетные клистроны» 1964 г.
7. Ю.Д. Жарков «Исследование основных характеристик многорезонаторного клистронного усилителя». Учебное пособие для студентов. Кафедра электроники колебаний и волн. Саратов 2008 г.
8. В.И. Канавец, С.В. Лебединский, Е.И. Васильев и др. Мощные многорезонаторные клистроны с высоким КПД (оптимизация группирования и энергообмена) // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ.1976 Вып. 11.
9. В.А. Царев, И.О. Чигуров, П.Д. Шалаев Улучшение выходных параметров многолучевого усилительного импульсного малогабаритного клистрона Ку- диапазона длин волн// Радиотехника. 2015. №7.
10. Мощные электровакуумные приборы СВЧ. Под редакцией Л. Клэмпитта. Москва. Изд. Мир. 1974 г.