

# Влияние тепловых деформаций на электродинамические параметры резонаторов непрерывного клистрона С-диапазона

Д.А. Комаров, Е.П. Якушкин, Ю.Н. Парамонов, С.В. Сурков

АО «НПП «Торий»

**Аннотация:** в данной работе рассматривается вопрос влияния тепловых деформаций узлов клистрона, вызванных токооседанием в приборе, на электродинамические параметры резонаторов. Описана методика проведения измерений, представлены результаты проведенных экспериментов, показывающие изменения электродинамических параметров в зависимости от мощности пучка.

**Ключевые слова:** токооседание, тепловой нагрев, деформация, непрерывный клистрон, электродинамические параметры резонатора

## 1. Введение

Характерной особенностью мощных усилительных клистронов является то, что сложно добиться стопроцентного токопрохождения (отношение тока коллектора к току катода) при моделировании, и тем более на этапе проведения испытаний прибора. В статическом режиме работы (без подачи на вход клистрона ВЧ сигнала) токооседание может достигать 2-3, а то и 5%. Особенно сильно эта проблема начинает сказываться в клистропах непрерывного действия, где достаточно высокая мощность пучка. Это небольшое, как кажется, токооседание при больших плотностях тока может вызвать тепловую нагрузку на узлы прибора порядка 500 Вт и более, что в свою очередь, приводит к изменению внутренних объемов резонаторов.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию влияния тепловых деформаций, вызванных токооседанием, на выходные параметры приборов и возможностям преодоления принципиальных трудностей настройки широкополосных электровакуумных СВЧ приборов непрерывного действия на примере клистрона КУ-409, разработанного в АО «НПП «Торий» и представленного на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Внешний вид непрерывного широкополосного клистрона С-диапазона КУ-409, разработанного в АО «НПП «Торий»

## 2. Описание методики исследования электродинамических параметров резонаторов

Для регулировки частоты и добротности всех резонаторов (входного, промежуточных и выходного, связанного с фильтровой системой) на этапе проведения холодных измерений используются настроечные элементы, а снятие электродинамических характеристик происходит при помощи двух зондов (запитывающего и детекторного). Но в дальнейшем, при испытаниях прибора в динамическом режиме на испытательном стенде, эти характеристики резонаторов могут меняться (в результате тепловых уходов и нагрузки пучком). К тому же прибор во время динамических испытаний полностью собран и с помощью зондов невозможно проводить оценку электродинамических параметров резонаторного блока. Предлагаемая методика работает с применением векторного анализатора цепей R&S (Rohde & Schwarz) [1], внутренний генератор которого можно использовать в режиме «sweep», т.е. в полосе частот.

Схема основных элементов и фото испытательного стенда, позволяющая понять суть метода измерений параметров резонаторов клистрона на этапе динамических испытаний [2], представлены на рисунке 2.

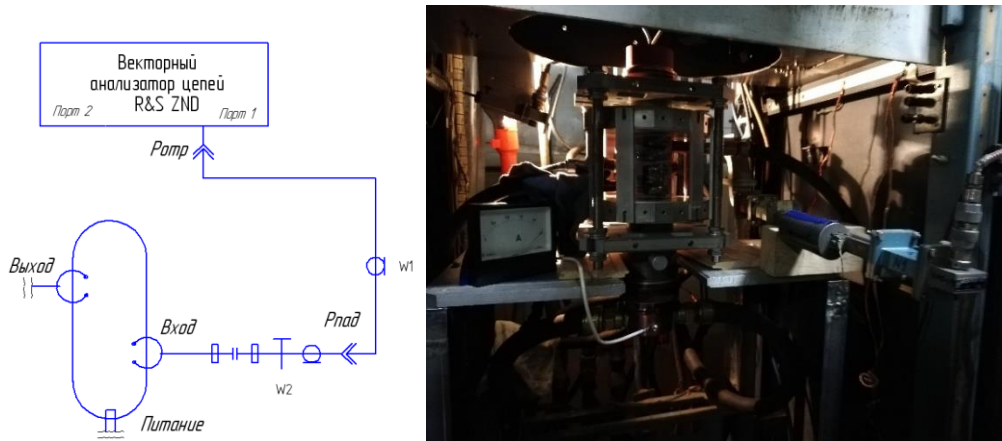


Рисунок 2. Схема измерений (где, W1 – коаксиальный кабель, W2 – коаксиально-волноводный переход) и фото испытательного стенда

Входной сигнал на клистрон идет от внутреннего генератора векторного анализатора цепей ZND, при этом входная мощность подается в полосе частот, а не в точке, таким образом, мощность этого сигнала усредняется во всей выбранной полосе. Далее сигнал с порта 1 анализатора поступает по волноводному тракту на входной резонатор прибора ( $P_{пад}$ ), часть этого сигнала отражается от входного резонатора и поступает обратно на порт 1 векторного анализатора цепей ( $P_{отр}$ ). Поступающие сигналы обрабатываются анализатором, и он отображает АЧХ резонатора (зависимость КСВн от частоты) во всей полосе выбранных частот.

## 3. Исследование зависимости изменения электродинамических параметров резонаторов от параметров пучка

В экспериментальных исследованиях проводился анализ зависимости электродинамических параметров (смещение центральной частоты) входного резонатора при увеличении ускоряющего напряжения. Предположительно, из-за токооседания пучка возникал тепловой нагрев полюсного наконечника, что способствовало тепловым деформациям узлов прибора, образующего входной резонатор клистрона. Проведенные экспериментальные исследования показаны в таблице 1.

Таблица 1. Экспериментальные данные

$U_0$ , кВ	$I_0$ , А	$I_{кол}$ , А	$f_0$ , МГц	КСВН
0	0	0	7035	17
5	0,3	0,29	7032	3,3
10	0,8	0,78	7030	2,35
15	1,48	1,44	7020	1,97
17	1,78	1,74	7015	1,95
18	1,91	1,88	7010	1,94

По представленным результатам в таблице 1 видно, что с ростом напряжения, токопрохождение ухудшается, а при номинальном напряжении 18 кВ, составляет 98,4%. Мощность, которая оседает на узлах прибора, составляет 540 Вт. При этом смещение частоты входного резонатора составило 25 МГц. Зависимость смещения частоты резонатора от величины резонаторного тока представлена на рисунке 3.

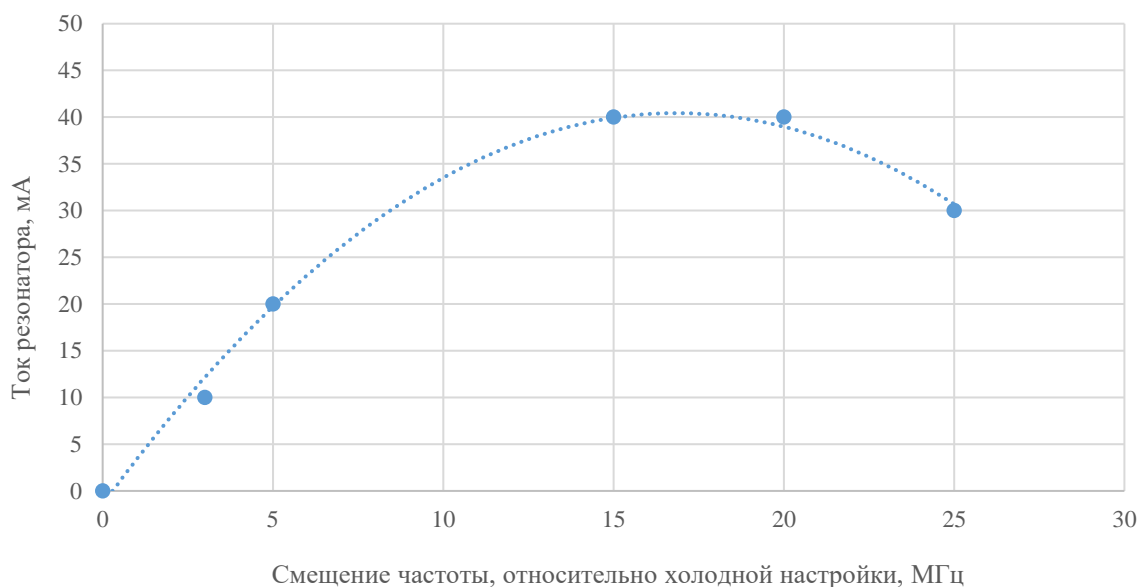
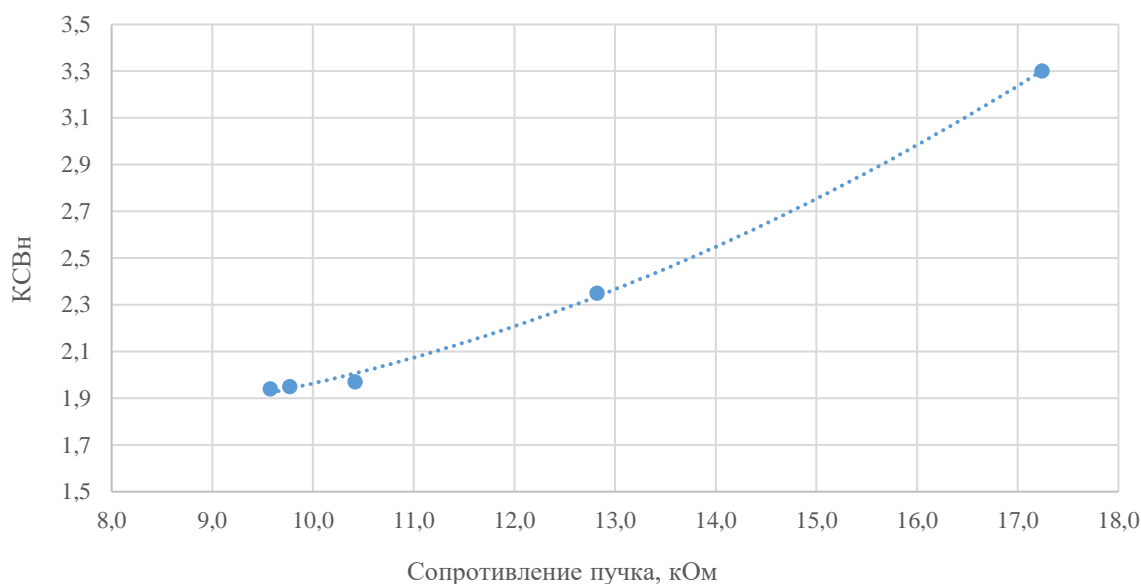


Рисунок 3. Экспериментальная зависимость смещения резонансной частоты входного резонатора клистрона КУ-409 от величины тока, оседающего на резонаторе

Полученная зависимость показывает, что рост величины резонаторного тока приводит к тепловым деформациям в приборе и вызывает смещение электродинамических характеристик резонатора. В некоторых точках, как видно из графика, при увеличении ускоряющего напряжения, резонаторный ток уменьшается, при этом смещение частоты продолжает расти, что вызвано тепловой нагрузкой при меньших напряжениях.

На рисунке 4 приводится зависимость уровня КСВн резонатора от величины сопротивления пучка.



**Рисунок 4.** Экспериментальная зависимость уровня КСВн входного резонатора клистрона КУ-409 от величины сопротивления пучка

Согласно таблице 1, без подачи напряжения на прибор, величина КСВн входного резонатора в холодном состоянии равна 17. Исходя из рисунка 4, видно, что как только мы начинаем подавать ускоряющее напряжение, сопротивление пучка начинает снижаться, тем самым он всё больше нагружает входной резонатор, КСВн которого стремительно уменьшается.

#### 4. Заключение

Предложена методика и схема испытаний электродинамических параметров резонаторов клистрона непрерывного действия в полосе рабочих частот. Благодаря использованию векторного анализатора удалось осуществить снятие АЧХ резонатора на этапе динамических испытаний, что позволило показать влияние тепловых деформаций, возникающих в узлах прибора вследствие токооседания, на электродинамические параметры входного резонатора.

#### Список литературы

1. Хибель М. «Основы векторного анализа цепей» / Михаэль Хибель. – пер. с англ. С.М. Смольского; под ред. У. Филипп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009.-500 с.: ил.
2. С.В. Сурков, М.А. Кравченко, Д.А. Комаров, Ю.Н. Парамонов, Д.А. Калашников «Методика исследования АЧХ клистрона непрерывного действия в динамическом режиме работы», СТНО-2020: сб. тр. III междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.2./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2020; Рязань. – 174 с.,: ил.