

УДК 621.385.624

Усилительный клистрон с распределенным взаимодействием коротковолновой части миллиметрового диапазона

А. И. Тореев, В. К. Фёдоров

Выполнено моделирование распределенных резонаторов миллиметрового диапазона. Проведены численные расчеты и оптимизация схемы взаимодействия электронного пучка с высокочастотными полями распределенно-резонансной системы. Показана возможность обеспечения в клистроне с распределенным взаимодействием 3-мм диапазона выходной мощности 1,2—2,0 кВт, усиления 54—47 дБ, полосы частот 250—370 МГц при ускоряющем напряжении 17,5 кВ и токе пучка 0,7 А. Найдены условия расширения полосы частот до 1,2 %.

PACS: 41.75.-j

Ключевые слова: клистрон, распределенное взаимодействие, высокочастотное поле.

Введение

Среди приборов О-типа миллиметрового диапазона с уровнем выходной мощности порядка киловатта, работающих при относительно невысоких ускоряющих напряжениях (менее 20 кВ), наиболее перспективными являются клистроны с распределенным взаимодействием (КРВ). Применение в них многозонарных резонаторов с распределенным взаимодействием позволяет повысить характеристический импеданс системы и обеспечить более высокую, чем в обычных клистронах, величину электронной нагрузки и, следовательно, существенно улучшить амплитудно-частотные характеристики приборов.

КРВ обладает также рядом преимуществ перед лампой бегущей волны (ЛБВ), особенно в тех применениях, где не требуется чрезвычайно широкая полоса частот. В КРВ могут быть получены более высокие значения выходной высокочастотной (ВЧ) мощности, коэффициента полезного действия (КПД), усиления, меньшие величины фазовых искажений и т. д. Так, например, в 4-резонаторном пакетированном с постоянным магнитом, КРВ средневолновой части миллиметрового диапазона [1] при ускоряющем напряжении 18 кВ и токе пучка

0,5 А обеспечивается выходная импульсная мощность до 3 кВт и более, КПД ~ 30 %, относительная полоса частот 0,25—0,35 % и усиление 25—35 дБ, а в 5-резонаторном КРВ [2] с выходной мощностью более киловатта достигается усиление более 50 дБ.

В данной работе проведены исследования по возможности создания КРВ в коротковолновой части миллиметрового диапазона с киловаттным уровнем выходной мощности и с достаточно высокими значениями КПД, усиления и полосы частот. Основные затруднения в достижении требуемых параметров связаны с существенным уменьшением геометрических размеров элементов резонаторов и, как следствие, со снижением эффективности взаимодействия электронного пучка с ВЧ-полями распределенных резонаторов. В связи с этим для достижения в коротковолновой части миллиметрового диапазона ВЧ-параметров, близких к таковым получаемым в КРВ средневолновой части миллиметрового диапазона, потребовалось: увеличить ток электронного пучка от 0,5 до 0,7 А, ввести в схему взаимодействия дополнительный (по сравнению с [2]) 6-й распределенный резонатор, а также провести оптимизацию схемы взаимодействия по таким основным параметрам, как выходная ВЧ-мощность, усиление, полоса частот. Были проведены численные расчеты схемы взаимодействия аксиально-симметричного электронного пучка с ВЧ-полями распределенных резонаторов, выполненных в виде короткозамкнутых отрезков цепочек тороидальных резонаторов с индуктивной связью.

Выбор исходных параметров схемы взаимодействия

При выборе исходных параметров для расчета схемы взаимодействия, в первую очередь, необхо-

Тореев Александр Иванович, старший научный сотрудник. Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского.

Россия, 420012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83.

E-mail: Levin@cas.ssu.runnet.ru

Фёдоров Виталий Константинович, доцент.

Саратовская государственная академия права.

Россия, 410056, г. Саратов, ул. Вольская, 1.

Статья поступила в редакцию 22 января 2010 г.

© Тореев А. И., Фёдоров В. К., 2011

димом найти геометрические размеры таких основных элементов распределенных резонаторов, как внутренний диаметр d_1 резонансной полости, внешний диаметр трубки дрейфа d_2 , диаметр пролетного канала d_3 , а также емкостной зазор взаимодействия t . Эти размеры определяются масштабным моделированием по результатам экспериментальных измерений осевого распределения

электрической компоненты ВЧ-поля $\frac{E_z}{\sqrt{W}}$ (E_z —

электрическая компонента поля на оси резонатора, W — величина запасенной энергии) на разборных макетах крупномасштабных моделей резонаторов в сантиметровом диапазоне. Как показали теоретические и экспериментальные исследования [1, 2], такой подход дает хорошие результаты при проектировании КРВ средневолновой части миллиметрового диапазона и может быть использован при моделировании более коротковолновых резонаторов. При моделировании периода L необходимо также учесть его связь не только с резонансной частотой ω_0 , но и с ускоряющим напряжением U_0 , сдвигом фазы поля на период $\beta_\varphi L = \frac{\omega}{v_\varphi} L$ и углом

пролета электронов $\beta_e L = \frac{\omega}{v_e} L = \varphi$. Последнее вы-

ражение с учетом известного соотношения $\frac{c}{v_e} = \frac{505}{\sqrt{U_0}}$ можно записать в виде $L = \frac{\lambda \varphi \sqrt{U_0}}{2\pi 505}$.

В данных соотношениях: v_φ — фазовая скорость ВЧ-волны, v_e — скорость электронов, c — скорость света, λ — длина волны. В [1, 2] показано, что синфазный вид колебаний ($\beta_\varphi L = 2\pi$) обладает преимуществами перед другими видами по эффективности взаимодействия, стабильности, низковольтности и другим параметрам. Как известно, в группирующих распределенных резонаторах необходимо использовать условие $\beta_e L = \beta_\varphi L = 2\pi$, так как при этом обеспечивается максимальная амплитуда сгруппированного тока и наименьший разброс по скоростям. В выходном же резонаторе при $\beta_e L \approx 1,6\pi$ — $1,7\pi$ осуществляется наиболее эффективный отбор энергии в нагрузку. Ввиду этого период резонаторов группирователя будет $L = \frac{\lambda \sqrt{U_0}}{505}$, а в выходном резонаторе

$$L = \frac{0,8\lambda \sqrt{U_0}}{505}.$$

Результаты моделирования резонаторов, полученные с учетом этих замечаний, представлены в табл. 1.

Таблица 1

f , ГГц	U_0 , кВ	L , мм	t , мм	d_1 , мм	d_2 , мм	d_3 , мм	Резонаторы
57,5	18	1,54	0,465	3,05	0,7	0,5	Входной и промежуточные
93,5	17,5	0,933	0,286	1,89	0,431	0,308	
57,5	18	1,18	0,3	3,05	0,7	0,5	Выходной
93,5	17,5	0,715	0,185	1,89	0,431	0,308	

Величину магнитного фокусирующего поля, необходимого для транспортировки электронного пучка с током 0,7 А и ускоряющим напряжением 17,5 кВ через пролетный канал диаметром d_3 , можно определить по известным соотношениям:

$$B_B^2 = 6,9 \cdot 10^{-7} \frac{I_0}{r_n^2 \sqrt{U_0}}; \quad B_0 = 1,6 B_B; \quad 2r_n = 0,6 d_3,$$

где B_B — бриллюэновское магнитное поле;

B_0 — требуемая величина магнитного фокусирующего поля;

r_n — радиус ламинарного пучка.

Для пролетного канала с диаметром $d_3 = 0,308$ из табл. 2 имеем $B_B = 0,655$ Тл, $B_0 = 1,048$ Тл. Практическая реализация таких больших уровней магнитных полей потребует применять слишком тяжелые пакетированные магниты [1, 2] и создаст проблемы, связанные с насыщением материала полюсных наконечников [3]. Увеличение ускоряющего напряжения до 20 кВ лишь незначительно уменьшает величину B_0 (до 1,013 Тл).

Существенный результат может быть получен за счет увеличения диаметра пролетного канала d_3 . Как видно из табл. 2, при увеличении d_3 до 0,38 мм ($r_n = 0,114$ мм.) B_0 уменьшается до вполне допустимого для практической реализации уровня 0,850 Тл.

Таблица 2

U_0 , кВ	I_0 , А	d_3 , мм	$2r_n$, мм	B_B , Тл	B_0 , Тл
17,5	0,7	0,308	0,183	0,655	1,048
17,5	0,7	0,32	0,192	0,630	1,008
17,5	0,7	0,36	0,216	0,560	0,896
17,5	0,7	0,38	0,228	0,531	0,850
17,5	0,7	0,40	0,240	0,505	0,808

Необходимо отметить [1, 2], что увеличение диаметра пролетного канала может привести к снижению эффективности взаимодействия электронного пучка с ВЧ-полями (на 8—10 %).

Этот вынужденный компромисс обусловлен также тем, что при практически реализуемой плотности токоотбора $\sim 10 \frac{A}{cm^2}$ диаметр катода равен 3,2 мм и, следовательно, "холодная" компрессия пучка по площади будет ~ 200 . При такой компрессии в значительной степени проявляется возмущающее влияние начальных тепловых скоростей

электронов [4], приводящее к значительному расплыванию пучка в пролетном канале. Диаметр огибающей "теплого" пучка в пучностях при токосодержании 98 % внутри огибающей может увеличиться до 0,32 мм [5]. Выбранные в результате проведенного рассмотрения геометрические размеры распределенных резонаторов (табл. 3) послужили в качестве исходных при расчете и оптимизации схемы взаимодействия электронного пучка с ВЧ-полями распределенно-резонансной системы.

Таблица 3

f , ГГц	U_0 , кВ	I_0 , А	L , мм	t , мм	d_1 , мм	d_2 , мм	d_3 , мм	Резонаторы
93,5	17,5	0,7	0,933	0,286	1,89	0,48	0,38	Входной и промежуточные
93,5	17,5	0,7	0,715	0,185	1,89	0,48	0,38	Выходной

Методика и результаты расчета амплитудно-частотных характеристик

Расчет схемы взаимодействия электронного пучка с ВЧ-полями распределенных резонаторов выполнялся с использованием программы расчета выходных характеристик КРВ [1, 2], составленной на основе использования метода согласованного поля в предположении одного вида колебаний, совместного решения уравнения движения, уравнения возбуждения резонаторов с заданным током [6] и уравнения первой гармоники тока. Использование такой программы при разработке 4- [1] и 5-резонаторных [2] КРВ показало достаточно хорошее совпадение результатов расчета и экспериментальных данных. При проведении данной работы программа расчета была модифицирована для обеспечения возможности расчета более сложных схем взаимодействия, а также ускорения итерационного процесса. Была выполнена серия расчетов схемы взаимодействия (рис. 1) электронного пучка при ускоряющем напряжении 17,5 кВ и токе пучка 0,7 А с ВЧ-полями распределенно-резонансной системы, состоящей из шести 2- и 3-зазорных резонаторов, на частоте 93,5 ГГц на синфазном виде колебаний.

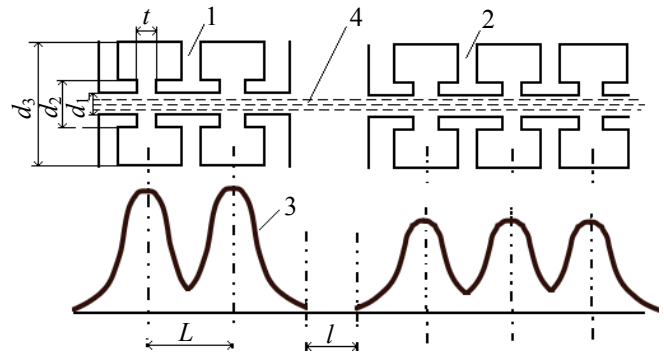


Рис. 1. Схема взаимодействия электронного пучка с ВЧ-полями распределенных резонаторов:

1 и 2 — 2- и 3-зазорные резонаторы, соответственно; 3 — распределение электрической компоненты ВЧ-поля в резонаторе; 4 — электронный пучок

Определялись амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) КРВ при различных значениях геометрических размеров распределенных резонаторов (периода L , диаметра пролетного канала d_3 , емкостного зазора t , длин дрейфа l и т. д.), вариации собственной и нагруженной добротности резонаторов, а также их относительных частотных расстройек $\frac{\Delta F}{F}$. В качестве исходных данных были

выбраны параметры электронного пучка и размеры резонаторов, представленные в табл. 3. В результате оптимизации частотных расстройек резонаторов, длин дрейфа, величин и числа зазоров в резонаторах, периода во входном, промежуточных и выходном резонаторах, собственных и нагруженных добротностей резонаторов для значений параметров, представленных в табл. 4, были получены АЧХ (рис. 2), а также зависимости коэффициента усиления и полосы усиливаемых частот от уровня входного сигнала (рис. 3). Следует отметить, что все параметры в табл. 4, кроме геометрического зазора, вводятся непосредственно. Геометрический зазор вводится в виде отношения "эффективной" протяженности зазора к периоду резонатора. Величина же протяженности из-за "провисания" электрического поля внутри трубок дрейфа (см. рис. 1) в 2—3 раза больше геометрического зазора.

Таблица 4

Параметры	Номер резонатора					
	1	2	3	4	5	6
Добротность собственная	400	400	400	400	400	400
Добротность нагруженная	100	400	400	400	400	130
Число зазоров в резонаторе	3	2	3	2	2	3
Частотная расстройка $\Delta F/F$, %	-0,07	-0,05	-0,02	0,07	0,09	0,03
Период резонатора L , мм	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,72
Зазор/период	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Диаметр канала d , мм	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
Длины дрейфа l , мм		1,5	1,3	1,2	1,0	0,8

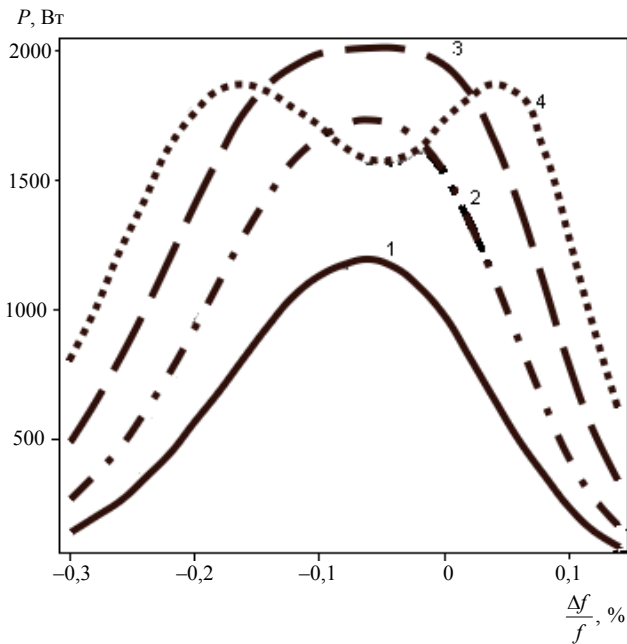


Рис. 2. Частотные зависимости выходной ВЧ-мощности P при ускоряющем напряжении 17,5 кВ, токе пучка 0,7 А и заданных в табл. 4 значениях параметров схемы взаимодействия.

Кривые 1—4 — зависимости при уровнях входной мощности $P_{in} = 0,005, 0,010; 0,020; 0,040$ Вт

Как видно из рис. 2, максимальное значение выходной мощности ~ 2 кВт достигается при достаточно малой величине входного сигнала $\sim 0,02$ Вт. При дальнейшем увеличении входной мощности до 0,04 Вт наступает режим насыщения. По мере увеличения входной мощности наблюдается также увеличение КПД и полосы усиливаемых частот $\frac{\Delta f}{f}$ с одновременным уменьшением коэффициента усиления. При увеличении входного сигнала от 0,005 до 0,04 Вт полоса частот (см. рис. 3) увеличивается от 0,25 до 0,4 %, а усиление уменьшается от 53 до 47 дБ. Значение КПД при этом изменяется в интервале 7—17 %.

Влияние изменения входных параметров на выходные характеристики

В КРВ, так же как в любом приборе О-типа, одним из важных условий практической реализации является то, насколько критичны выходные характеристики к изменению входных параметров. Расчеты, выполненные при входных параметрах, отличающихся от приведенных в табл. 4, показали следующее:

- уменьшение числа зазоров во входном резонаторе до двух не приводит к значительным изменениям выходных характеристик. Аналогичное уменьшение числа зазоров в выходном резонаторе

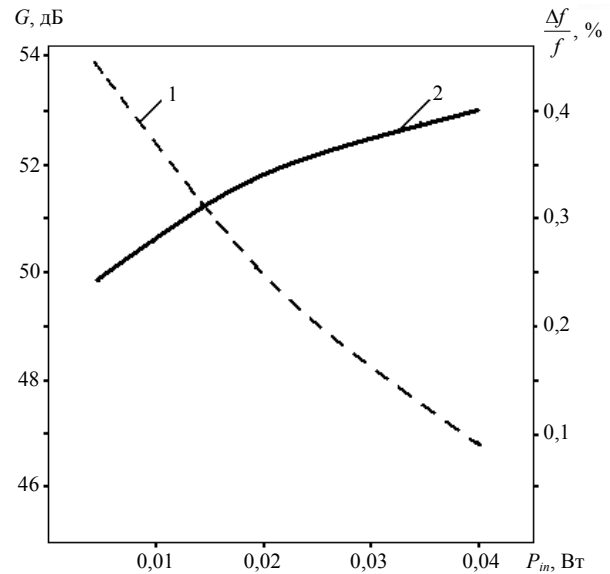


Рис. 3. Зависимости от уровня входного сигнала P_{in} параметров клистрона:

1 — коэффициент усиления G ; 2 — полоса частот. Расчеты сделаны при ускоряющем напряжении 17,5 кВ, токе пучка 0,7 А и заданных в табл. 4 значениях параметров схемы взаимодействия

приводит к уменьшению на ~ 25 —30 % выходной мощности и КПД и небольшому увеличению полосы усиливаемых частот $\frac{\Delta f}{f}$ на 0,03—0,04 %;

- подобное уменьшение числа зазоров в 3-м (промежуточном) резонаторе снижает на 1,5 % выходную мощность и уменьшает на 0,03 % полосу частот;
- увеличение периода входного и промежуточных резонаторов на 3 % приводит к уменьшению на 14 % усиления и увеличению полосы частот на 0,02 %;
- изменение собственной добротности резонаторов на 12 % ведет к изменению выходной мощности и усиления на 4—5 %;
- изменение нагруженной добротности выходного резонатора на 30 % приводит к подобному изменению выходной мощности и КПД (~ 30 —40 %). Аналогичное изменение нагруженной добротности входного резонатора не ведет к существенным изменениям в амплитудно-частотных характеристиках;
- при уменьшении отношения зазора к периоду на 3—3,5 % коэффициент усиления увеличивается на 2 %, а КПД и полоса частот практически не изменяются;
- увеличение диаметра пролетного канала на 5 % (при постоянном заполнении пролетного канала пучком) не приводит к значительным изменениям выходных характеристик;

- при увеличении заполнения пролетного канала пучком на 10—15 % усиление увеличивается на 4—6 %, выходная мощность и полоса частот почти не изменяются;

- увеличение заданной амплитуды поля на 10—15 % в 3-зазорных резонаторах увеличивает выходную мощность, КПД на 10—11 %, усиление на 3 %, полосу частот на 0,03 %. При таком же увеличении амплитуды в 2-зазорных (промежуточных) резонаторах усиление увеличивается на 2 %. Выходная мощность и полоса частот не изменяются.

Проведенный численный анализ схемы взаимодействия показал, что заданием входных параметров можно в широких пределах регулировать усиление и выходную мощность. При этом схема взаимодействия достаточно устойчива — не наблюдаются резкие изменения выходных характеристик с изменением входных условий. Наиболее трудно решаемой задачей, как это видно из проведенного рассмотрения, является обеспечение значительного расширения полосы частот. Это потребовало провести дополнительно исследования по нахождению условий расширения полосы частот.

Возможности расширения полосы частот

Значительные трудности в достижении широкополосности схемы взаимодействия связаны как с электродинамической системой, состоящей из резонаторов (хотя и с распределенным взаимодействием), являющихся в принципе узкополосными системами, так и с относительно малой величиной первеанса электронного пучка. Тем не менее, схема, состоящая из достаточно большого числа резонаторов, открывает возможности по значительному расширению полосы частот путем специальной частотной настройки распределенных резонаторов. При такой настройке одна группа резонаторов настраивается синхронно (или почти синхронно) на частоты ближе к длинноволновой границе полосы пропускания, а другая группа на частоты ближе к коротковолновой границе. Резонаторы каждой группы располагаются в схеме непосредственно

друг за другом, обеспечивая кумулятивный эффект взаимодействия. Поскольку на коротковолновом участке полосы пропускания сопротивление связи значительно выше, чем на длинноволновом, 1-й и 2-й резонаторы настраиваются на длинноволновом, а 4-й и 5-й резонаторы на коротковолновом участках полосы пропускания. Проведенные расчеты показали, что такой подход позволяет значительно расширить полосу усиливаемых частот КРВ. Так, например, при частотных расстройках резонаторов, представленных в табл. 5, амплитудно-частотные характеристики схемы взаимодействия КРВ 3-мм диапазона (93,5 ГГц) имеют вид, показанный на рис. 4. Как видно из рисунка, выходная мощность и полоса усиливаемых частот возрастают с увеличением входной мощности и при уровне входного сигнала 0,20 Вт составляют 1,25 кВт и 0,66 % (по уровню 3 дБ), соответственно.

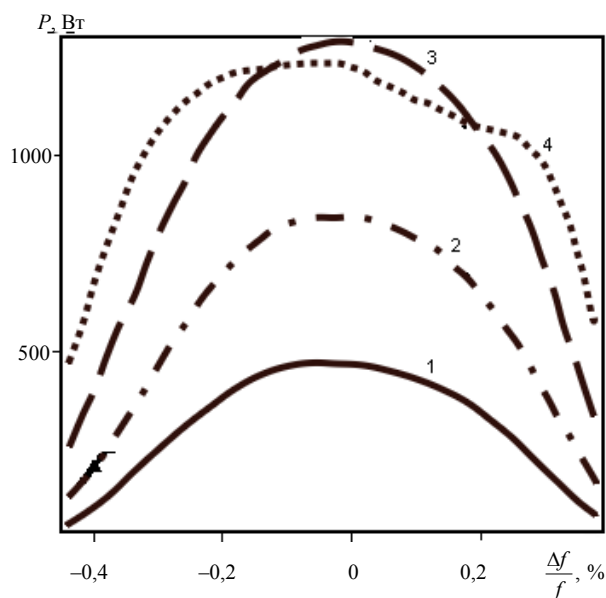


Рис. 4. Частотные зависимости выходной ВЧ-мощности P_2 при ускоряющем напряжении 17,5 кВ, токе пучка 0,7 А и заданных в табл. 5 значениях параметров схемы взаимодействия.

Кривые 1—4 получены при уровнях входного сигнала $P_{in} = 0,05; 0,10; 0,20; 0,40$ Вт, соответственно

Таблица 5

Параметры	Номер резонатора					
	1	2	3	4	5	6
Добротность собственная	400	400	400	400	400	400
Добротность нагруженная	50	400	400	400	400	73
Число зазоров в резонаторе	3	2	3	2	2	3
Частотная расстройка $\Delta F/F$, %	-0,5	-0,35	-0,05	0,45	0,35	0,02
Период резонатора L , мм	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,72
Зазор/период	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Диаметр канала d , мм	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
Длины дрейфа l , мм		2,8	3,1	1,1	0,6	1,7

В режиме насыщения (при входной мощности 0,40 Вт) выходная мощность почти не изменяется (1,2 кВт), а полоса усиления увеличивается до 0,8 % (740 МГц). При этом частотная характеристика становится более ровной — полоса частот по уровню 1 дБ увеличивается до 0,65 % (640 МГц). Расширение полосы частот, достигнутое за счет частотной расстройки групп указанных резонаторов $\frac{\Delta F}{F} \cdot 100\% = 0,95\%$, потребовало значительно

изменить величины нагруженных добротностей входного и выходного резонаторов и длин дрейфа между резонаторами (см. табл. 5) по сравнению с приведенными в табл. 4. Необходимо также отметить влияние 3-го распределенного резонатора группирователя, настроенного на частоту приблизительно в центре полосы расстройки, на формирование достаточно равномерной АЧХ. Смещение его частоты к длинноволновой или к коротковолновой границе полосы пропускания приводит к искажению АЧХ (нарастанию выходной мощности в одной части полосы и уменьшению в другой ее части). Большое значение имеет также выбор числа зазоров в этом "центральной" резонаторе — уменьшение их числа с 3 до 2 приводит к почти 25%-ному уменьшению полосы частот КРВ. Заметим, что увеличение числа зазоров до 4 и более не рассматривалось, так как при проведении экспериментальных исследований КРВ 5 мм диапазона с четырьмя и пятью зазорами [1] наблюдалась генерация схемы.

В результате выполнения аналогичных расчетов для различных значений частотных расстроек групп резонаторов были получены зависимости полосы усиливаемых частот и коэффициента усиления G (дБ) от величины $\frac{\Delta F}{F}$ (рис. 5). Как видно из

рисунка, в интервале значений $\frac{\Delta F}{F} \cdot 100\% \sim 0,2$ —1,2 % полоса усиления увеличивается от 0,4 до 0,86 %, а коэффициент усиления уменьшается от 45,6 до 34 дБ. Дальнейшее увеличение полосы усиления можно реализовать выбором таких параметров схемы взаимодействия, как добротность резонаторов, а также величиной коэффициента заполнения пролетного канала электронным пучком. Так, например, при увеличении коэффициента заполнения от 0,75 до 0,85 и уменьшении нагруженной добротности до 65 полоса усиливаемых частот (по уровню -3 дБ) увеличивается до 0,98 %, а усиление снижается до 33 дБ. Уменьшение коэффициента усиления можно в значительной мере компенсировать путем подбора параметров схемы взаимодействия и, в первую очередь, увеличением числа зазоров в распределенных резонаторах, например,

заменой 2-зазорных промежуточных резонаторов 3-зазорными. Такое изменение электрической длины резонаторов при некоторой корректировке других параметров (уменьшение периода L промежуточных резонаторов до 0,88 мм и увеличение заполнения пролетного канала электронным пучком до 0,9) позволяет повысить коэффициент усиления до 42 дБ (при сохранении ширины полосы частот $\sim 0,92\%$ (860 МГц) и, следовательно, обеспечить достижение выходной мощности усилителя $\sim 1,2$ кВт при входном сигнале $\sim 0,080$ Вт.

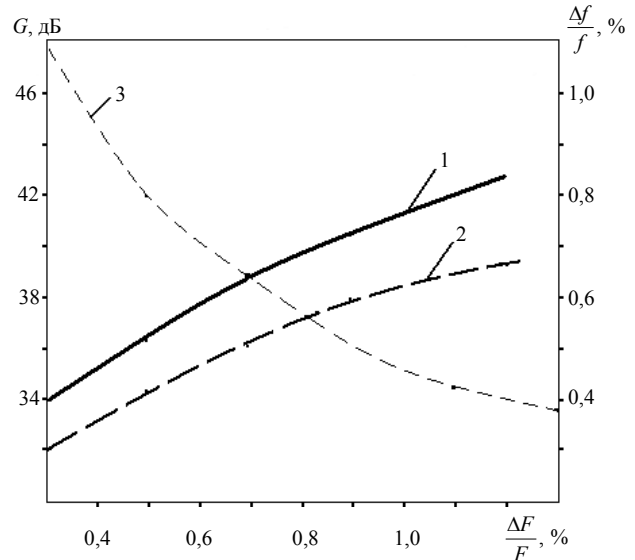


Рис. 5. Зависимости от относительной частотной расстройки $\Delta F/F, \%$ параметров распределенных резонаторов:

1 — полоса частот по уровню 3 дБ; 2 — полосы частот по уровню 1 дБ; 3 — коэффициент усиления G . Все данные получены при ускоряющем напряжении 17,5 кВ, токе пучка 0,7 А и заданных в табл. 5 значениях параметров схемы взаимодействия

Оптимизационный расчет, проведенный с учетом влияния указанных входных параметров, показал, что в КРВ с распределенно-резонансной системой с 3-зазорными резонаторами группирователя и 4-зазорным выходным резонатором можно обеспечить полосу усиления 1,2 %, усиление 36 дБ, выходную мощность 940 Вт при токе и напряжении пучка 0,7 А и 17 кВ, соответственно.

Заключение

Выполнено моделирование с учетом условий транспортировки интенсивных электронных пучков многозазорных резонаторов для мощных КРВ 3-мм диапазона. Проведены численный расчет и оптимизация схемы взаимодействия электронного пучка с ВЧ-полями распределенно-резонансной системы, состоящей из шести 2- и 3-зазорных тороидальных резонаторов, и показана возможность обеспечения на частоте 93,5 ГГц выходной мощности 1,2—2,0 кВт, усиления 54—47 дБ, полосы уси-

ливаемых частот 25—370 МГц при ускоряющем напряжении 17,5 кВ и токе пучка 0,7 А. Рассмотрено влияние параметров распределенно-резонансной системы и электронного пучка на амплитудно-частотные характеристики схемы взаимодействия.

Найдены условия расширения полосы усиления КРВ до 850—900 МГц (по уровню 3 дБ) и до 500—600 МГц (по уровню 1 дБ) при выходной мощности 1,2 кВт и усилении 42—35 дБ. В схеме с 3-зазорными резонаторами группирователя и 4-зазорным выходным резонатором может быть получена полоса усиления 1,2 %, усиление 36 дБ и выходная мощность 940 Вт при токе и напряжении пучка 0,7 А и 17 кВ, соответственно.

Полученные результаты могут быть полезны при разработке мощных пакетированных КРВ коротковолновой части миллиметрового диапазона.

Л и т е р а т у р а

1. Торева А. И., Фёдоров В. К., Патрушева Е. В. // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54. № 8. С. 1001.
2. Торева А. И., Фёдоров В. К. // Прикладная физика. 2008. № 5. С. 117.
3. Grant T. J., Garcia R., Miram G. V., Smith. // Int. Electron Devices Meet., Washington, D. C., Technical Digest, New York. 1983. P. 141.
4. Gamayunov Y. G., Toreev A. I., Patrusheva E. V. // Abstracts of 2006 IEEE Int. Vacuum Electr. Conf With 2006 IEEE Int. Vacuum Electr. Sources, April 25—27, 2006, Monterey, California, USA. P. 167.
5. Торева А. И., Гамаюнов Ю. Г., Патрушева Е. В. // Прикладная физика. 2008. № 3. С. 79.
6. Вайнштейн Л. А., Солнцев В. А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. — М.: Сов. радио, 1973.

Shortwave millimeter-wave extended interaction amplifier klystron

A. I. Toreev

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya str., Saratov, 430012, Russia

E-mail: Levin@cas.ssu.runnet.ru

V. K. Fedorov

Saratov State Law Academy, 1 Volskaya str., Saratov, 410056, Russia

Extended resonators modeling of the millimeter wave diapason have been executed. Numerical simulations and optimization of the interaction schemes of the electron beam with high frequency (HF) fields of the extended resonance system have been conducted. Possibility of providing in the W-band extended interaction klystron (EIK) the output powers of 1,2—2,0 kW, gain values of 54—47 dB and bandwidths 250—370 MHz at the beam voltage 17,5 kV and beam current 0.7 A are showed. Conditions of the klystron bandwidth widening to 1.2 % are found.

PACS: 41.75.-j

Keywords: klystron, distributed interaction, high-frequency field.

Bibliography — 6 references.

Received January 22, 2010