# ПОДАВЛЕНИЕ ЩЕЛЕВОГО ВИДА КОЛЕБАНИЙ В КОАКСИАЛЬНЫХ МАГНЕТРОНАХ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Омиров А. А. ОАО «Владыкинский механический завод» 58, Дмитровское ш., Москва, 127238, Россия E-mail: mosvmz@mail.ru

Аннотация — Рассмотрены способы реактивного подавления щелевого вида колебаний в коаксиальном магнетроне. Показаны недостатки и проведено исправление существующего метода расчета частоты щелевого вида. Предложена одна модификация расчета и один новый метод, применимый при использовании анодной замедляющей системы с толщиной периферийной стенки более 0.1 $\lambda_e$ . Рассмотрено реактивное «разрушение» спектра пространственных гармоник ВЧ поля щелевого вида колебаний при изготовлении прямоугольных щелей связи различной высоты.

#### I. Введение

В коаксиальном магнетроне (КМ) возможно селективное подавление всех конкурирующих видов колебаний, за исключением щелевого вида, практически без ущерба рабочему виду H<sub>011</sub> стабилизирующего резонатора (СР).

Мешающее воздействие щелевого вида колебаний, называемого также длинноволновым *т* видом (ДПВ), связано с тем, что потенциал синхронизации ДПВ меньше, чем у рабочего вида колебаний анодной замедляющей системы, а потери во внешней нагрузке отсутствуют. Известны различные методы его подавления – диссипативный (или активный), реактивный и комбинированный.

Диссипативный метод реализуется установкой поглотительной керамики у конца щелей связи анодной замедляющей системы (АЗС). При этом поглотительная керамика влияет не только на щелевой, но и на рабочий вид колебаний. Известно, что в некоторых приборах (например, МИ-463) при постановке керамики наблюдается падение добротности рабочего вида колебаний на величины до 45%. Падение КПД, соответствующее столь сильному росту потерь на рабочем виде колебаний, в современных условиях неоправданно.

Реактивное подавление представляет собой объединение щелей связи в различные группы, отличающиеся конфигурацией. Изготовление щелей связи различной формы эквивалентно нарушению однородности резонаторной системы, что, как известно, приводит к увеличению количества пространственных гармоник в суммарном высокочастотном поле щелевого вида колебаний, вследствие чего уменьшается амплитуда конкурирующей гармоники. Также увеличивается интенсивность низших по отношению к основной пространственных гармоник, и происходит рост излучения в торцы системы.

В чистом виде реактивное подавление не применяется – дополнительное понижение эффективности щелевого вида происходит с помощью активного поглощения, и метод называется комбинированным. Этот способ получил наибольшее распространение в современных КМ сантиметрового диапазона длин волн. В миллиметровом диапазоне длин волн в настоящее время используют только диссипативный метод подавления, что связано с ухудшением теплоотвода при изготовлении щелей связи гантельной формы. Целью данной работы является поиск метода технологической реализации реактивного «разрушения» спектра пространственных гармоник (ПГ) ВЧ поля длинноволнового *п*-вида колебаний в КМ миллиметрового диапазона длин волн.

#### II. Основная часть

Анализ литературных источников показывает наличие большого числа усилий по разработке методики реактивного «разрушения» спектра ПГ ВЧ поля ДПВ, однако на практике большая часть из них применения так и не нашла.

В докладе будет представлен анализ литературных источников [1-8]. Будут внесены исправления в метод [5], и на его основе предложен новый метод– шлейфовый.

В миллиметровом диапазоне длин волн из-за необходимости улучшения отвода тепла возможно изготавление АЗС с толщиной периферийной стенки  $t_{cm} > 0,1\lambda$  (в дальнейшем такие стенки будем называть «толстыми»). В связи с этим потребовалась разработка новой методики расчета щелей связи «толстыми» стенками АЗС. Щель связи в этом подходе рассматривается как участок прямоугольного (или гантельного) волновода, возбуждаемого на волне типа H<sub>10</sub>. Проводимость щели связи считается как величина, обратная комплексному входному сопротивлению волновода (1):

$$Y_{ex} = \frac{1}{Z_{ex}} \tag{1}$$

Величина потерь в волноводе столь малой длины пренебрежимо мала, что позволяет считать входное сопротивление мнимым. Согласно [9], выражение для входного сопротивления принимает вид (2):

$$Z_{ex} = Z_e \cdot \frac{377 + Z_e \cdot \tan\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\lambda_e}\right)}{Z_e + 377 \cdot \tan\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\lambda_e}\right)},$$
 (2)

где:

Z<sub>e</sub> – эквивалентное сопротивление волновода;

 / – длина широкой стенки волновода прямоугольной формы (для волновода гантельной формы – длина участка между отверстиями);

 $Z_{\mbox{\tiny CB}} = 377 \mbox{ Ом} - \mbox{ сопротивление свободного пространства.}$ 

Согласно [10], для прямоугольного волновода Z<sub>e</sub> рассчитывается по (6):

$$Z_e = \frac{b}{a} \cdot \frac{377}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{ce}}{\lambda_{\kappa p}}\right)^2}},$$
(3)

где *а*, *b* – размеры широкой и узкой стенки волновода соответственно (для гантельного волновода – размеры перемычки). Для краткости в дальнейшем этот метод будет называться волноводным. При малой толщине периферийной стенки АЗС он неприменим в силу значительного влияния краевых эффектов, которые в расчете не учитываются. При использовании «толстых» периферийных стенок АЗС с физической точки зрения расчет этим методом является наиболее корректным.

В качестве прототипа для расчета взяты A3C двух импульсных КМ длинноволновой части миллиметрового диапазона длин волн. A3C 1 соответствует высоковольтному КМ, A3C 2 – низковольтному. Для каждой из систем сравнение результатов расчета выполнено по трем параметрам (табл. 1):

- варианты 1 и 2 показывают изменение частоты ДПВ при уменьшении ширины щелей связи классического вида с толщиной периферийной стенки АЗС менее 0.1*λ*<sub>s</sub> и более 0.1*λ*<sub>s</sub> соответственно;

 вариант 3 показывает изменение частоты щелевого вида колебаний при увеличении толщины периферийной стенки АЗС с использованием щелей связи неклассического вида.

Результаты расчета сведены в таблицу 1.

Та	бл	٦И	ца	1	
	~		40		1

	A3C 1			A3C 2			
	вар. 1	вар. 2	вар. 3	вар. 1	вар. 2	вар. 3	
N	40			44			
<i>г</i> <sub>а</sub> , ММ		2.9		1.9			
<i>г</i> <sub>л</sub> , мм		4.48		3.75			
<i>T</i> , MM		0.22		0.13			
<i>h</i> , мм	2.0			2.0			
<i>f<sub>раб</sub>,</i> ГГц	37.334				30.910		
<i>t<sub>ст</sub>,</i> мм	0.4	2	0.4/2	0.5	2.5	0.5/2.5	
<i>t</i> <sub>щ</sub> , мм	0.4/0.2	0.4/0.2	0.4	0.3/0.15	0.3/0.15	0.3	
<i>I</i> щ, мм	6.0	6.0	4.5	6.0	6.0	4.5	
<i>r<sub>отв</sub>,</i> мм		0.4		0.3			
<i>г<sub>экв. пр</sub></i> (м. Шлифера), мм	6.10/5.92	5.52/5.15	5.77/4.97	5.32/4.92	4.38/4.09	4.90/4.08	
<i>г<sub>экв. гант</sub></i> (м. Шлифера), мм	6.25/19.0	6.03/3.74	5.97/5.21	5.45/5.85	4.55/5.64	5.08/4.19	
<i>г<sub>экв. пр</sub></i> (шлейфовый м.), мм	6.30/6.30	6.29/6.27	5.91/5.12	5.61/5.36	4.84/4.42	5.08/4.18	
<i>г<sub>экв. гант</sub></i> (шлейфовый м.), мм	6.29/11.0	6.25/3.87	5.97/5.22	5.43/6.02	4.52/6.46	5.03/4.15	
<i>г<sub>экв. пр</sub></i> (волноводный м.), мм	5.47/5.16	4.71/4.59	5.83/5.32	5.07/4.74	4.19/3.98	5.84/6.69	
<i>г<sub>экв. гант.</sub></i> (волноводный м.), мм	5.46/5.09	4.67/4.53	5.61/4.78	4.94/4.44	4.01/3.81	5.10/4.14	
Примечания: N – количество резонаторов; <i>r</i> <sub>n</sub> – радиус периферийной стенки АЗС; <i>т</i> – толщина ламелей; <i>f<sub>раб</sub></i> – частота π вида колебаний АЗС; <i>r<sub>эке</sub></i> – радиус по периферийной стенке резонатора, эквивалентного открытому.							

В докладе будет представлен анализ приведенных в табл. 1 результатов.

Можно предположить, что при малой толщине стенок A3C корректным является метод [5] либо шлейфовый, так как щель связи в таком случае представляет собой тонкую диафрагму. Наоборот, при «толстой» периферийной стенке A3C необходимо использовать волноводный метод, так как рассмотрение щели связи как тонкой диафрагмы неприменимо. Для подтверждения правильности и определения границ применимости различных методов необходима экспериментальная проверка полученных результатов.

В миллиметровом диапазоне длин волн можно реализовать группировку щелей связи только прямоугольного сечения. Группировка может быть выполнена двумя способами - изменением аксиальной протяженности или ширины щелей связи.

Анализ магнетронов сантиметрового диапазона длин волн с применением гантельных щелей связи позволяет сделать вывод, что на модуляцию вида H<sub>011</sub> стабилизирующего резонатора (СР) влияет только ширина щели связи на уровне высоты анода.

Поэтому применение группировки щелей связи прямоугольной формы целесообразно только с помощью изменения аксиальной протяженности в различных группах.

Ниже рассмотрены группировки щелей связи в A3C, имеющих малую толщину периферийной стенки. По этой причине дальнейший расчет будет проводиться на основе метода [5] (результаты расчета шлейфовым методом в случае прямоугольных щелей связи имеют лишь незначительное количественное отличие). Известно, что максимальное «разрушение» спектра ПГ ВЧ поля ДПВ достигается при наибольшем размере неоднородности, соответствующем максимальному различию по высоте щелей связи. Однако слишком большая разница по высоте между короткими и длинными щелями связи может привести к модуляции вида H<sub>011</sub> СР. По этой причине разница между аксиальной протяженностью длинных и коротких щелей связи выбрана равной 15% от высоты длинной щели связи.

В [6] показано, что наибольшее реактивное «разрушение» спектра ПГ ВЧ поля щелевого вида колебаний происходит при наличии двух групп щелей связи различной формы. Аксиальная протяженность щелей связи при этом не изменялась. Максимальное «разрушение» спектра ПГ ВЧ поля ДПВ достигается, когда количество «открытых» резонаторов с большей глубиной меньше N/4. Состав групп зависит от разницы по проводимости между различными щелями связи – чем она больше, тем количество щелей связи, соответствующих более глубоким «открытым» резонаторам должно быть меньше. Ниже представлены результаты расчета «разрушения» спектра ПГ ВЧ поля ДПВ в различных магнетронах (АЗС 1 и 2 в таблице 1) с использованием группировки прямоугольных щелей связи по высоте. Длинные щели связи имеют аксиальную протяженность 6.0 мм, короткие – 5.1 мм. В таблице 2 и на рис. 1 приведены данные для АЗС 1, в таблице 3 и на рис.2 – для АЗС 2. Здесь и далее потери измеряются в условных единицах, связанных с тем, что в расчете не учитываются физические свойства материала системы.

Таблица	2.
---------	----

Тип групп.	Ширина щели 0.4мм			Ширина щели 0.2мм		
	Частота	Потери	Потери	Частота	Потери	Потери
			OTH.			OTH.
0д - 20к	25377	9905	1,000	27098	9777	1,000
5д - 15к	25007	11999	1,211	26168	17235	1,763
6д - 14к	24933	12297	1,241	26022	17255	1,765
7д - 13к	24868	12424	1,254	25907	16871	1,726
8д-12к	24812	12412	1,253	25816	16335	1,671
20д - Ок	24430	10014	1,011	25324	9910	1,014

Таблица 3.

Тип групп.	Ширина щели 0.3мм			Ширина щели 0.15мм		
	Частота	Потери	Потери отн.	Частота	Потери	Потери отн.
0д - 22к	22539	6764	1,000	24347	6638	1,000
6д - 16к	22339	7281	1,076	23951	9092	1,370
7д - 15к	22304	7364	1,089	23892	9209	1,387
8д - 14к	22271	7418	1,097	23841	9198	1,386
9д - 13к	22241	7441	1,100	23798	9098	1,371
10д - 12к	22214	7438	1,099	23762	8939	1,347
22д - Ок	21969	6835	1,010	23493	6681	1,006



Рис. 1. Зависимость относительных потерь от количества щелей связи в длинноволновой группе при щелях связи шириной 0.4 и 0.2 мм в АЗС 1

Согласно полученным данным, группировка по высоте при изготовлении более узких щелей связи приводит к более сильному «разрушению» спектра ПГ ВЧ поля щелевого вида колебаний, чем при изготовлении широких. При одинаковом изменении высоты прямоугольной щелей связи (15% от аксиальной протяженности длинной щели связи) максимально достижимое в 44-х резонаторной системе (АЗС 2) «разрушение» спектра ПГ ВЧ поля слабее, чем в 40резонаторной (АЗС 1).

Исходя из вышеизложенных физических предпосылок, следует отметить, что при изготовлении «толстых» стенок АЗС необходимо использовать волноводный метод расчета. «Открытым» резонаторам с большей глубиной соответствуют в этом случае щели связи меньшей аксиальной протяженности. Поэтому для максимального реактивного «разрушения» спектра ПГ ВЧ поля ДПВ таких щелей связи должно быть меньше, чем более длинных. Качественная картина при этом не изменяется. При группировке прямоугольных щелей связи с использованием вариации по высоте возможно разместить поглоти-





тельную керамику щелевого вида колебаний таким образом, чтобы она не перекрывала более короткие щели связи, а длинные имели значительное перекрытие. Это приведет к увеличению поглощения щелевого вида колебаний и уменьшению диссипативных потерь рабочего по сравнению с системой без использования группировки щелей связи.

### III. Заключение

Можно сделать вывод о принципиальной возможности реактивного «разрушения» спектра ПГ ВЧ поля ДПВ в миллиметровом диапазоне длин волн с помощью изменения высоты прямоугольных щелей связи. Применение такой группировки позволит повысить КПД КМ миллиметрового диапазона длин волн. Ввиду наличия упомянутых выше разночтений, результаты расчета требуют экспериментальной проверки и оценки границ применимости. Только после этого возможно выработать окончательные рекомендации по группировке прямоугольных щелей связи для достижения максимального «разрушения» ПГ ВЧ поля ДПВ.

## IV. Список литературы

- [1] Патент США №3.034.014. Кл.315-39.77. Приоритет в США – 1958г. Заявитель: "Bell Telephone Lab., Inc". Изобретатель: Jerom Drexler.
- [2] Патент США №2.976.458. Кл.315-39.77. Приоритет в США – 1958г. Заявитель: "Bell Telephone Lab., Inc". Изобретатель: Joseph Feinstein.
- [3] А. А. Гурко, Пути и средства совершенствования параметров магнетронов миллиметрового диапазона, дисс. на соискание степени д.т.н., М.: МИЭМ, 2004, 220 с.
- [4] А. А. Омиров, К. И. Чистяков, Способы подавления щелевого вида колебаний в коаксиальном магнетроне, «Труды XII межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине»», М.: МГУ, 2011, с. 185-190.
- [5] Э. Д. Шлифер, Расчет и проектирование коаксиальных и обращенно-коаксиальных магнетронов, М.: МЭИ, 1991, 168 с.
- [6] А. А. Омиров, Электродинамика анодной замедляющей системы коаксиального магнетрона с реактивным подавлением щелевого вида колебаний, 6-я отраслевая конференция «Технологии информационного общества», М.: МТУСИ, 2012.
- [7] Магнетроны сантиметрового диапазона, т.1. Перевод под редакцией С. А. Зусмановского, «Советское радио», Москва, 1950, 420 с.
- [8] Э. Д. Шлифер, Расчет многорезонаторных магнетронов, 2-е изд., М.: МЭИ, 1966, 144 с.

- [9] И. В. Лебедев, Техника и приборы сверхвысоких частот, т.1, М.-Ленинград: Государственное энергетическое издательство, 1961, 512 с.
- [10] К. И. Алмазов-Долженко, А. Н. Королёв, Техническая электродинамика и устройства СВЧ, М.: Научный мир, 2006, 263 с.

# SUPPRESSION OF THE SLOT OSCILLATION MODE IN COAXIAL MAGNETRONS THE MILLIMETRIC RANGE WAVELENGTHS

### Omirov A. A. Vladykinskiy mechanical plant JSC 58, Dmitrovskoye highway, Moscow, 127238, Russia E-mail: mosvmz@mail.ru

Methods for a slot oscillation mode reactive suppression in coaxial magnetrons (CM) are considered. The limitations of the existing methods to calculate the slot - type frequency are presented. One modified version of calculations and one novel method applicable to the anode slow-wave system whose thickness of the peripheral wall is over  $0.1\lambda_v$  are shown. Reactive "destruction" of the HF-field space harmonic of slot-type oscillation is considered in the process of manufacturing rectangular coupling slots of a variable height.