

СПОСОБЫ ПОДАВЛЕНИЯ ЩЕЛЕВОГО ВИДА КОЛЕБАНИЙ В КООКСИАЛЬНОМ МАГНЕТРОНЕ

А.А. Омиров, К.И. Чистяков

Московский государственный институт электроники и математики

E-mail: lmis@miem.edu.ru

Slot-hole kind fluctuations suppression ways in coaxial magnetron (CM) are considered. The existing methods of slot-hole kind fluctuations calculation are reviewed. The slot-hole communication grouping recommendations analysis is carried out.

Проблема подавления щелевого вида колебаний (называемого также длинноволновым π видом, или ДПВ) в настоящее время является актуальной для разработчиков коаксиальных магнетронов (КМ). При отсутствии подавления щелевой вид колебаний оказывает сильное мешающее воздействие. Это связано с тем, что его потенциал синхронизации меньше, чем у рабочего вида колебаний, а потери во внешней нагрузке отсутствуют.

Существует три метода подавления щелевого вида колебаний – диссипативный (или активный), реактивный и комбинированный. В современных магнетронах обычно применяется комбинированный метод подавления щелевого вида, при котором применяется как активное, так и реактивное подавление.

Диссипативный метод реализуется установкой поглотительной керамики у конца щелей связи. При уменьшении перекрытия щелей связи поглотительной керамикой уменьшается подавление щелевого вида колебаний, а при увеличении перекрытия – усиливается поглощение рабочего вида колебаний. Анализ литературных источников и технической документации показал, что во многих выпускаемых коаксиальных магнетронах как миллиметрового, так и сантиметрового диапазона длин волн до сих пор применяется только активное подавление с большим перекрытием щелей связи. В некоторых приборах (например, МИ-463) при постановке керамики потери на рабочем виде колебаний увеличиваются на 30-45%. Столь сильный рост потерь на рабочем виде колебаний в современных условиях неоправдан, поэтому чисто диссипативный метод поглощения при разработке новых магнетронов стараются не применять.

Второй метод – реактивный. Реактивное подавление представляет собой объединение щелей связи в различные группы, отличающиеся между собой формой и количеством щелей в группе. Анализ литературных источников 1950-х – 1960-х годов показывает наличие большого числа усилий по разработке методики реактивного разрушения ДПВ [1, 2], однако на практике большая часть из них применения так и не нашла.

Идея группировки щелей в КМ первоначально предложена в [1, 2]. Изготовление щелей связи различной формы фактически эквивалентно нарушению однородности резонаторной системы, что, как известно, приводит к разрушению структур полей каждого из видов колебаний и к увеличению

количества пространственных гармоник в суммарном высокочастотном поле. Это приводит к тому, что в структуре поля щелевого вида колебаний увеличивается интенсивность низших по отношению к нему пространственных гармоник. В свою очередь, это приводит к росту излучения в торцы системы и к увеличению потерь в поглотителе, расположенном у концов щелей связи.

Однако в патентах [1, 2] отсутствуют рекомендации по расположению щелей связи, а все описанные методы подавления связаны только с изменением формы щелей.

В настоящее время в литературе отсутствуют подтвержденные расчетным и(или) экспериментальным образом рекомендации по реактивному подавлению щелевого вида колебаний.

Наиболее уязвимым местом реактивного разрушения щелевого вида колебаний является высокая технологическая сложность изготовления щелей связи сложной формы в диапазоне длин волн менее 2 см и полная невозможность – в миллиметровом диапазоне длин волн. С целью группировки щелей связи в миллиметровом диапазоне длин волн вводится селективный металлический экран у концов щелей связи [3].

Согласно первым патентам [2], первоначально применялась группировка щелей связи по случайному закону. По замыслу авторов, это должно было привести к уменьшению связи между щелями связи. Однако такая группировка показала свою несостоятельность. На современном уровне понимания процессов, происходящих в магнетроне, разрушение щелевого вида колебаний связано с разрушением его спектра пространственных гармоник и уменьшением вклада синхронной гармоники π вида в суммарное поле. Эксперименты показали, что группировка щелей связи по закону случайного распределения не обеспечивает достаточного разрушения.

Для простоты будем рассматривать 32 резонаторную систему. Наиболее распространена группировка щелей по типу «4г-4п-4г-4п» (г – гантельные щели связи, п - прямоугольные щели связи). При развитии идеи группировки щелей связи и реактивного разрушения щелевого вида колебаний была опробована также группировка типа «3г-2п-3г-3п-2г-3п». Основная идея, лежащая в основе создания группировки такого типа, - различная конфигурация (по составу и количеству) противоположных групп щелей связи.

В [4] было исследовано влияние по-разному расположенных в кольцевом резонаторе неоднородностей на состав спектра пространственных гармоник. Расчетным и экспериментальным методами было показано, что при четном рабочем виде расположение диаметрально противоположных неоднородностей, одинаковых по модулю и знаку, ведет к образованию только четных пространственных гармоник; гармоники с нечетными номерами на этих неоднородностях взаимоуничтожаются. Поэтому разрушение щелевого вида группировкой второго типа оказалось сильнее.

В [5] описан еще один тип группировки, не получивший должного распространения. Было высказано предположение о наилучшем разрушении

при изготовлении двух групп щелей. Первая группа должна состоять из $N/4 - N/8$ гантельных щелей связи, вторая – из $N/4 - 3N/8$ прямоугольных щелей связи. Эксперимент показал увеличение влияния поглотителя на уровень собственной добротности щелевого вида на 15-20% по сравнению с группировками других типов. Однако расчетной оценки такого разрушения, а также рекомендаций по выбору в заданных пределах количества гантельных щелей связи проведено не было.

Анализ литературы показал полное отсутствие методов для расчета разрушения щелевого вида колебаний.

Как уже упоминалось выше, внесение различных групп щелей связи эквивалентно внесению неоднородности в однородную систему. Можно представить систему типа «восходящее солнце», в которой проводимость малых резонаторов равна проводимости «закрытых» (без щелей связи) резонаторов в анодной замедляющей системе (АЗС) со щелями связи, а проводимость больших соответствует проводимости «открытых» резонаторов (т.е., резонаторов, нагруженных на щель связи). В зависимости от параметров щели связи глубина большого резонатора может быть различна.

Дальнейший расчет этой системы может быть проведен с помощью – полевого метода, описанного в [6], где приведена формула для нахождения проводимости лопаточного резонатора Y :

$$Y = j \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \frac{h}{\phi a} \frac{J_0(ka)N_1(kb) - J_1(kb)N_0(ka)}{J_1(ka)N_1(kb) - J_1(kb)N_1(ka)}, \quad (1)$$

где: ϵ_0 , μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемости в вакууме соответственно;

h – высота резонатора;

ϕ – угол раскрытия резонатора;

a , b – эффективные радиусы по аноду и стенкам резонатора, соответственно;

$k = 2\pi/\lambda$ – волновое число свободного пространства;

j - мнимая единица;

J_0, J_1, N_0, N_1 – функции Бесселя и Неймана нулевого и первого порядков.

Также приведена формула, позволяющая рассчитывать проводимость лопаточного резонатора, нагруженного на конце проводимостью Y_t :

$$Y = j \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \frac{h}{\phi a} \frac{J_0(ka) - \frac{J_1(kb)Y_t - j \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \frac{h}{\phi b} J_0(kb)}{N_1(kb)Y_t - j \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \frac{h}{\phi b} N_0(kb)} N_0(ka)}{J_1(ka) - \frac{J_1(kb)Y_t - j \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \frac{h}{\phi b} J_0(kb)}{N_1(kb)Y_t - j \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \frac{h}{\phi b} N_0(kb)} N_1(ka)} \quad (2)$$

В дальнейшем полученные проводимости резонаторов (в конфигурации, соответствующей тому или иному типу группировки щелей) подставляются в дисперсионное уравнение, и находится решение, соответствующее π виду (в данном случае, соответствующему щелевому). Таким образом, общая задача вычисления эквивалентной глубины (или эквивалентной проводимости) открытого резонатора сводится к нахождению проводимости щели связи Y_t .

В литературе описана единственная методика, так или иначе применимая для расчета проводимости щелей связи. Речь идет о методике расчета АЗС, приведенной в [7].

Щели связи рассматриваются автором как участки шлейфа. Сама щель связи при этом делится на три участка: два короткозамкнутых шлейфа в обоих аксиальных направлениях от резонаторов АЗС и участок, находящийся на уровне высоты анода. Расчет проводимости короткозамкнутых шлейфов проводится по следующим формулам:

- для шлейфа прямоугольной формы:

$$Y_{шл} = \frac{-j}{377} \frac{t_{cm}}{t_{щ}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2} \operatorname{ctg} \left(\frac{2\pi l_{шл}}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2} \right), \quad (3)$$

где: λ – рабочая длина волны;

$\lambda_{кр} = 2 \cdot l_{щ}$ – критическая длина волны для прямоугольного волновода;

$l_{шл} = \frac{l_{щ} - h}{2}$ – длина шлейфа;

- для шлейфа сложной (в частности, гантельной) формы:

$$Y_{шл} = iY_0 \frac{j \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi l'}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2} \right) + \frac{B_{гант}}{Y_0}}{1 + j \frac{B_{гант}}{Y_0} \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi l'}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2} \right)}, \quad (4)$$

$$B_{\text{зант}} = \frac{1}{377} \frac{t_{\text{см}}}{2\pi r_{\text{омс}}} \left(\frac{J_0(kr_{\text{омс}})}{J_0'(kr_{\text{омс}})} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{\sin m \frac{\psi}{2}}{m \frac{\psi}{2}} \right)^2 \frac{J_m(kr_{\text{омс}})}{J_m'(kr_{\text{омс}})} \right), \quad (5)$$

$$Y_0 = \frac{1}{377} \frac{t_{\text{см}}}{t_{\text{ц}}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}} \right)^2}, \quad \text{где:} \quad (6)$$

ψ – угол, под которым видна щель связи толщиной $t_{\text{щ}}$ из центра отверстия;
 $\lambda_{\text{кр}}$ – критическая длина волны для волновода гантельного сечения, определяемая из [8]

l' – длина участка щели связи толщиной $t_{\text{щ}}$.

Сама щель связи считается следующим образом (без учета влияния стабилизирующего резонатора на частоту щелевого вида):

$$Y_t = 2 * Y_{\text{щл}} \quad (7)$$

В дальнейшем автор считает проводимости резонаторов, нагруженных на щели связи. Для этих целей используются формулы с эквивалентными параметрами. Фактически, (2) является аналогичной приведенным в [7] формулам, однако более точной, с одной стороны, и менее трудоемкой, с другой.

Подставляя результат (7) в качестве параметра Y_t в (2), находим проводимость открытых резонаторов, которую, в свою очередь, пересчитываем в эквивалентную длину большого резонатора системы «восходящее солнце».

Судя по всему, в последующем расчете допущена еще одна ошибка. Автор [7] говорит о наличии упрощения, заключающегося в отсутствии потерь. При таком допущении проводимость должна быть чисто мнимой величиной, о чем автор также упоминает. Однако в результате расчета по (4) получается комплексное число с наличием и мнимой, и действительной составляющих, что противоречит упрощению. Мало того, при попытке расчета по (4) щели связи прямоугольной формы ((3) фактически является упрощенной версией (4)) также получалось не мнимое число, а комплексное с действительной составляющей.

Таким образом, можно сделать вывод об отсутствии методик как для расчета разрушения щелевого вида в целом, так и для расчета проводимости щелей связи сложной формы. Для оценки наилучшего типа группировки щелей связи, вносящего наибольшее разрушение в структуру щелевого вида колебаний, необходима разработка новых способов для расчета проводимости щелей связи.

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. Э.Д. Шлифер Авторское свидетельство № 99718. Приоритет в СССР – 1975г.
4. В.Б. Штейншлейгер «Явления взаимодействия волн в электромагнитных резонаторах», Москва, 1955г, «Государственное издательство оборонной промышленности».
5. А.А. Гурко «Пути и средства совершенствования параметров магнетронов миллиметрового диапазона», диссертация на соискание ученой степени д.т.н., Москва, МИЭМ, 2004г.
6. «Магнетроны сантиметрового диапазона», т.1. Перевод под редакцией С.А. Зусмановского. «Советское радио», Москва, 1950г.
7. Э.Д. Шлифер «Расчет и проектирование коаксиальных и обращенно-коаксиальных магнетронов», МЭИ, Москва, 1991г.
8. Р.А. Силин «Расчет характеристик линий передачи СВЧ», «Электронная техника, сер. СВЧ-техника», вып. 5(449), 1992г, с. 41-49.