

# О ПРОДВИЖЕНИИ КОАКСИАЛЬНОГО МАГНЕТРОНА В КРОТКОВОЛНОВУЮ ЧАСТЬ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН И ТЕОРИИ «ПОМОГАЮЩИХ ВИДОВ»

А.А. Омиров

*Московский государственный институт электроники и математики*

E-mail: [lmis@miem.edu.ru](mailto:lmis@miem.edu.ru)

The possibilities of the short wavelength band coaxial magnetron (CM) creation are considered. Also the work on big modulation pulse front duration in CM reasons analysis is carried out.

В настоящее время в технике СВЧ известно большое количество разнообразных типов генераторов. В их числе заметное место занимает магнетрон. Этот тип генератора является одним из самых старых, но до сих пор востребованным в силу постоянного улучшения разработчиками его параметров и технологии изготовления.

Конструкция коаксиального магнетрона позволила достичь значительно лучших параметров выходного сигнала по сравнению с классическим типом магнетронов. Наличие коаксиального резонатора повысило собственную добротность колебательной системы и позволило увеличить связь с внешней нагрузкой без роста затягивания частоты. Механическая перестройка частоты в КМ обеспечила значительно больший диапазон перестройки и оказалась значительно проще в изготовлении по сравнению с системами механической перестройки в классических магнетронах. Наличие стабилизирующего резонатора (СР) позволило уменьшить электронное смещение частоты (ЭСЧ) и тем самым повысить стабильность частоты генерации от импульса к импульсу. Благодаря этим особенностям КМ они вытесняют магнетроны классического типа во многих областях применения.

При создании КМ коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн возникает ряд проблем. Из них наиболее труднопреодолимые:

- сложности в согласовании частоты  $\pi$  вида анодной замедляющей системы (АЗС) с частотой вида  $H_{011}$  СР, что является следствием и роста влияния погрешностей изготовления деталей на параметры колебательной системы;

- рост плотности перестройки частоты с уменьшением рабочей длины волны. Следствием слишком высокой крутизны перестройки частоты является плохая управляемость частотой и малая виброустойчивость;

- уменьшение толщины периферийной стенки АЗС (согласно рекомендациям [1], не более  $0.07\lambda$ , где  $\lambda$  – рабочая длина волны), что приводит к низкой механической прочности АЗС и значительно усложняет отвод тепла от ламелей;

- увеличение нагрузки на анод может привести к оплавлению ламелей, что в мощных магнетронах устраняется установкой защиты тугоплавким

металлом. Однако эта мера приводит к увеличению диссипативных потерь в стенках АЗС.

Были предприняты попытки создания конструкции не  $\pi$ -видных коаксиальных магнетронов [2]. Известно о двух экспериментальных образцах коаксиальных магнетронов поверхностной волны, созданных харьковскими исследователями, генерирующих на частоте 45 ГГц. Первый образец не перестраивался по частоте и обеспечивал мощность до 40 кВт при КПД 8%. Во втором образце перестройка частоты обеспечивалась в полосе 600 МГц (1,3%) при двукратном перепаде мощности. Оценка полученных результатов не была приведена. Полученные результаты значительно уступают характеристикам классических магнетронов, генерирующих колебания с аналогичной длиной волны.

Наиболее уязвимым параметром коаксиального магнетрона, ограничивающим области его применения, является работоспособность при большей по сравнению с классическими типами магнетронов длительности фронта модулирующего импульса. Короткая длительность фронта модулирующего импульса позволяет увеличить разрешающую способность радиолокатора по дальности, а также повысить общий КПД модулятора. Улучшение стабильности работы КМ на малой длительности фронта модулирующего импульса является одной из основных задач разработчиков магнетронов.

Наиболее подробно проблемой возбуждения КМ на короткой длительности фронта модулирующего импульса занимался Э.Д. Шлифер. На основе результатов исследований автором была сформулирована теория «помогающих видов». В [1] автор утверждает, что поля видов колебаний АЗС и СР «сшиваются». Этот термин «означает, что при соответствующих напряжениях анода возбуждение в АЗС магнетрона вида  $\gamma = N/2 - m$  или  $\gamma = m$  навязывают в СР распределение поля, соответствующее  $H_{mnp}$  виду, и наоборот»<sup>\*</sup> Соответственно, в АЗС и СР образуются т.н. «устойчивые колебательные состояния», состоящие из совпадающих или взаимоподдерживающихся по числу азимутальных вариаций структур полей соответствующих видов колебаний.

Также существуют и т.н. «неустойчивые колебательные состояния». Они образуются взаимонеподдерживающимися по числу азимутальных вариаций видами колебаний АЗС и СР. Особое внимание уделяется взаимонеподдерживающимся колебательным состояниям нерабочих видов АЗС и рабочего вида СР.

Автор [1] утверждает, что на фронте модулирующего импульса на весьма близких напряжениях анода происходит возбуждение видов колебаний, близких по номеру гармоники к рабочему, причем они помогают возбудить рабочий вид колебаний: «... в случае последовательного (эстафетного) возбуждения в АЗС (на фронте модулирующего импульса) видов колебаний и

---

<sup>\*</sup> Сохранена орфография автора. Судя по всему, имелся в виду вид колебаний  $n$ , а не номер гармоники  $\gamma$ .

их пространственных гармоник на частотах, соответствующих резонансной для  $H_{011}$  вида колебаний в СР, ... можно говорить об ансамбле помогающих колебательных состояний».

Однако далее автор пишет, что «если из эстафетного ансамбля помогающих колебательных состояния по той или иной причине ... выпадает какой-либо вид (а того хуже – несколько), то эстафетность процесса нарушается, и амплитуды колебаний предшествующего выпавшему виду колебаний смогут нарасти уже до уровней, затрудняющих возбуждение  $\pi$  вида АЗС».

При этом утверждается, что виды колебаний  $N/2 - 1$ ,  $N/2 - 3$  и  $N/2 - 4$  АЗС образуют устойчивые колебательные состояния с видами  $H_{121}$ ,  $H_{311}$ ,  $H_{411}$  СР соответственно. Так как эти виды колебаний СР подавлены, то должны быть подавлены и соответствующие виды колебаний АЗС. Таким образом, возбуждаться на фронте модулирующего импульса они не могут. Также, будучи связанными с видами  $H_{121}$ ,  $H_{311}$ ,  $H_{411}$  СР, эти виды колебаний АЗС уже не могут образовать неустойчивого колебательного состояния с  $H_{011}$ . Можно сделать вывод, что эстафетность нарушена, а из всех видов колебаний, помогающими могут быть лишь два -  $N/2 - 2$  и  $N/2 - 5$ . Мало того, согласно изложенной теории, эти виды колебаний могут нарастать до уровней, препятствующих возбуждению  $\pi$  вида, и оказывать уже не помогающее, а мешающее воздействие.

С целью получения высокого КПД технологические неоднородности стремятся уменьшить, и АЗС КМ можно считать однородной. Из общих физических соображений следует, что для организации связи помогающих видов колебаний с видом колебаний  $H_{011}$  СР через щели необходимо, чтобы в спектре пространственных гармоник присутствовали гармоники с периодичностью  $\gamma = 0$  и(или)  $\gamma = N/2$ , что, в свою очередь, возможно только в неоднородной системе. Самим автором также подтверждается этот факт: «... не имеющий азимутальных вариаций поля рабочий вид колебаний СР синфазно возбуждает все элементы связи и, следовательно, синфазно возбуждаются связанные с СР резонаторы АЗС (т.е. каждый второй резонатор). За счет внутренней электромагнитной связи между соседними резонаторами АЗС каждый такой соседний резонатор АЗС оказывается возбужденным в противофазе. Таким образом, в АЗС поддерживается распределение поля, соответствующее  $\pi$  виду колебаний. Соответственно и наоборот, если в АЗС возбудился  $\pi$  вид колебаний, то система элементов связи возбуждается синфазно и навязывает в СР выбранный вид».

Из вышесказанного следует, что для возбуждения вида колебаний  $H_{011}$  СР помогающими видами необходимо внести такую неоднородность, которая обеспечит появление в спектре пространственных гармоник с периодичностью  $\gamma = 0$  и(или)  $\gamma = N/2$ , и при этом сориентировать их относительно щелей связи необходимым образом. Внесение в АЗС таких неоднородностей не оправдано, так как влечет за собой «разрушение» структуры поля рабочего вида колебаний и снижает его конкурентоспособность и КПД.

Согласно теории «помогающих видов колебаний», чем большее количество помогающих видов существует в системе, тем быстрее будет возбуждаться  $\pi$

вид. Количество помогающих видов колебаний, в свою очередь, зависит от количества резонаторов АЗС и составляет примерно  $N/8$ . Автор утверждает, что для уменьшения длительности фронта модулирующего импульса необходимо увеличивать количество резонаторов: «С позиции ... облегчения возбуждения рабочего вида колебаний целесообразно увеличивать число помогающих видов колебаний. Этому способствует выбор наибольшего числа резонаторов  $N$ . ... В тех случаях, когда удастся синтезировать колебательную систему, реализующую указанные возможности использования ансамбля помогающих видов, допустимая крутизна фронта модулирующего импульса приближается к типичной для классического магнетрона».

Это утверждение противоречит [3], где утверждается, что длительность фронта модулирующего импульса, при котором магнетрон может стабильно возбуждаться, зависит от характеристического сопротивления системы: чем оно больше, тем более коротким может быть фронт модулирующего импульса. Из того же источника известно, что характеристическое сопротивление уменьшается с уменьшением угла раскрыва резонатора. В современных КМ применяются резонаторные системы с большим количеством резонаторов – до 42 – что ведет к значительному уменьшению угла раскрыва и, как следствие – меньшему по сравнению с классическими магнетронами характеристическому сопротивлению всей системы, что и обуславливает работу на увеличенной длительности фронта модулирующего импульса. Экспериментальные данные точнее соответствуют точке зрения [3].

Еще одним недостатком проектирования по методике [1] является необходимость создания «модели первого приближения»: «Проектирование магнетронов (в частности, формулирование скорректированных технических требований) требует расчетного аналогового или даже интуитивного создания первичной модели (модели первого приближения). Без этого этапа, продуктом которого являются «исходные» размеры и электрические режимы, невозможна их дальнейшая машинная оптимизация».

1. Э.Д. Шлифер «Расчет и проектирование коаксиальных и обращенно-коаксиальных магнетронов», МЭИ, Москва, 1991г.
2. В.Д. Еремка, О.П. Кулагин., В.Д. Науменко «Разработка и исследование магнетронов в институте радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова и радиоастрономическом институте НАН Украины», «Радиофизика и электроника», т.9, спец. вып. 2004, с. 42-67.
3. «Магнетроны сантиметрового диапазона», т.1. Перевод под редакцией С.А. Зусмановского. «Советское радио», Москва, 1950г.