# РАЗРАБОТКА ПАКЕТИРОВАННОГО МАГНЕТРОНА 2 ММ ДИАПЗОНА ДЛИН ВОЛН С УВЕЛИЧЕННЫМ СРОКОМ СЛУЖБЫ

Омиров А.А.[1], Чистяков К.И.[1]. Скрипкин Н.И.[2]
[1] *Московский государственный институт электроники и математики*
E-mail: lmis@miem.edu.ru;
[2]*ОАО «Плутон».*

The ability of creation 2 mm wavelengths range magnetron with increased to 1000 hours tube life was looked.

Целью работы является создание пакетированного магнетрона 2 мм диапазона длин волн нового поколения, с увеличенным до значений не менее 1000 часов сроком службы. В качестве прототипа был использован магнетрон с долговечностью 400 часов.

Анализ существующей конструкции магнетрона и экспериментальные исследования по проверке работоспособности магнетронов при испытаниях на безотказность и в штатной аппаратуре определили круг задач, которые необходимо решить:

- создание конструкции анодного блока, в частности, анодной замедляющей системы (АЗС), позволяющей выдерживать существенно большие тепловые нагрузки в сравнении с прототипом;
- создание конструкции и технологии изготовления металлосплавного иридий-лантанового катода, позволяющего обеспечить нормальную работу магнетрона при плотностях тока с катода не менее 150 А/см$^2$;
- улучшение конструкции магнитопровода с целью создания наилучшей равномерности магнитного поля в пространстве взаимодействия и снижения полей рассеивания;
- увеличение КПД магнетрона за счет сохранения симметрии синхронной пространственной гармоники рабочего вида колебаний благодаря устранению недостатков, связанных с правильностью подбора вывода энергии и обеспечения соосности анод-катод.

Моделирование медной анодной замедляющей системы, применяемой в прототипе, по методу Дугласа – Ганна показало, что приблизительно за 10-15 импульсов с момента включения прибора в ламели устанавливается стационарный режим. При условии, что температура ламели на периферии фиксирована и равна 100 ºС, ее температура у анода за время первого импульса достигает 296.5 ºС. После установления стационарного режима температура ламели на внутреннем радиусе (радиус анода) достигла 307.5 ºС и 111 ºС после охлаждения. При продолжении моделирования температура больше не поднималась.

Глубина прогрева ламели во время импульса составила 3.6% от ее длины (~ 11 мкм). В данном случае глубина прогрева определялась как место ламели, где температура в конце импульса отличается не более, чем на 1 ºС

от температуры в конце релаксации. Число разбиений вдоль оси ламели, по направлению которой распространяется тепло, было взято равным 1200.

Моделирование медной системы с измененной ламелью (ламель трапециидальной формы) показало, что приблизительно за 15-20 импульсов с момента включения прибора в ламели устанавливается стационарный режим при условии, что температура ламели на периферии фиксирована и равна 100 ºС. Ее же температура у анода за время первого импульса достигает 230 ºС. После установления стационарного режима температура ламели у анода достигла 287 ºС в центре, 294 ºС на углах и 157 ºС после охлаждения. При продолжении моделировании температура больше не поднималась.

Глубина прогрева ламели во время импульса составила 4.5% (~13 мкм) от ее длины.

На рисунках 1 и 2 показано распределение температуры для медных ламелей исходной конструкции и ламелей трапециидальной формы.

При расчете распределения тепла методом, описанным в [1], результаты для стационарного случая сходятся с моделированием. Порядок импульсной добавки температуры на конце ламели в исходной системе тот же, что и при моделировании. Расчет импульсной добавки для новой системы показал меньшее значение температуры, чем для исходной системы. Поэтому был сделан вывод, что новая система с ламелями трапециидальной формы испытывает меньший перегрев, чем исходная система, в результате чего меньше подвергается оплавлению, что было подтверждено на практике.

Мощность обратной бомбардировки распределена неравномерно за время действия импульса. Равномерно распределяется мощность только по 1/3 поверхности сегментов, значит, импульсная добавка по температуре возрастает в 3 раза [1] и может достигать в исходной конструкции 621 ºС и в конструкции с ламелями трапециидальной формы 411 ºС. Максимальную температуру анода можно рассчитать согласно формуле

$$T_а = T_{а\ ср} + T_{имп}\text{, где} \qquad (1)$$

$T_а$ – температура анода в данный момент времени,

$T_{а\ ср}$ – температура анода в стационарном режиме,

$T_{имп}$ – импульсная надбавка температуры.

Таким образом, максимальная температура в исходной конструкции на краях ламелей может достигать 732 ºС, а в конструкции с ламелями трапециидальной формы – 568 ºС.

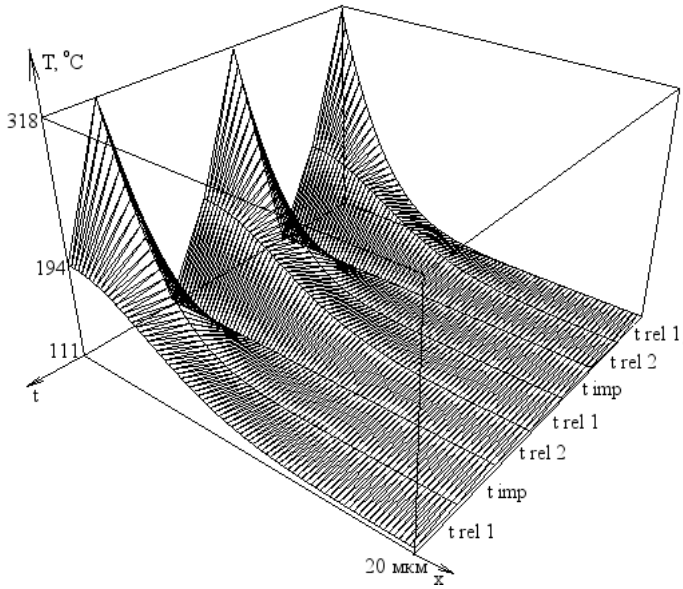


*Рис. 1. Распределение температуры в ламели исходной конструкции, изготовленной из меди, в зависимости от времени и координаты. Обозначения: $t_{imp}$ – время действия импульса ($t_{imp}$ = 0.08 мкс); $t_{rel1}$ – релаксация за время, равное длительности импульса ($t_{rel1}$ = 0.08 мкс); $t_{rel2}$ – релаксация за время до следующего импульса ($t_{rel2}$ = 80мкс).*

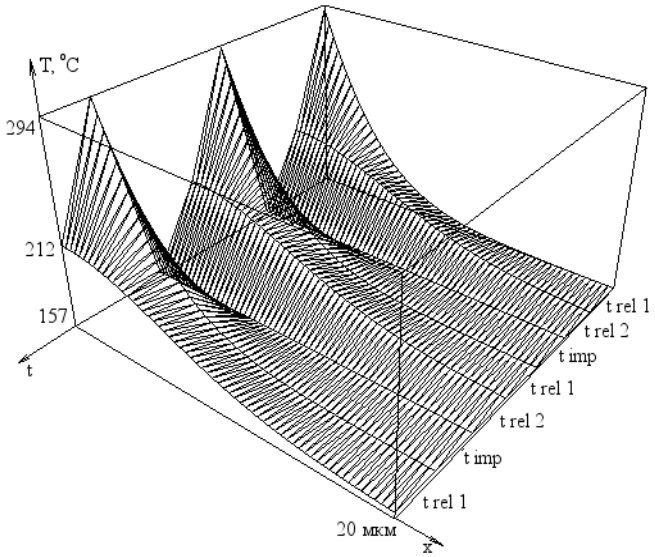


*Рис. 2. Распределение температуры в ламели трапециидальной конструкции, изготовленной из меди, в зависимости от времени и координаты. Обозначения: $t_{imp}$ – время действия импульса ($t_{imp}$ = 0.08 мкс); $t_{rel1}$ – релаксация за время, равное длительности импульса ($t_{rel1}$ = 0.08 мкс); $t_{rel2}$ – релаксация за время до следующего импульса ($t_{rel2}$ = 80мкс).*

Ламели АЗС, изготовленные из молибдена, имеют максимальную температуру на аноде 534 ºС и глубину прогрева ламели во время импульса 8.25 мкм. С учетом неравномерности обратной бомбардировки температура ламели на аноде может достигать значения 1200 ºС (при предельном значении рабочей температуры для молибдена 1700 ºС [2]). Учитывая значение упругости, из одинаковых ламелей, выполненных из меди при температуре 732 ºС и молибдена при температуре 1200 ºС, предпочтение,

конечно, отдается молибденовой конструкции, имеющей существенный запас по температуре.

Известно, что замедляющая система с минимальными потерями представляет наибольший интерес, так как электронный КПД в ней имеет максимальное значение. Расчетной оценке подлежали варианты конструкций анодных блоков, как изготовленных из разных материалов (меди, молибдена и их комбинации), так и разной конфигурации ламелей. Результаты расчетов приведены в таблице 1. На рис. 3 представлена схема анодной замедляющей системы.

Таблица 1.

Расчет потерь в анодных блоках различной конструкции.

| **№ п/п** | **$D_a$, мм** | **$D_в$, мм** | **$\tau_a$, мм** | **$\tau_b$, мм** | **$\tau$/w** | **Материал замедляющей системы (t, мм)** | **Собственные потери в системе** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3.2 | 3.86 | 0.156 | 0.156 | 1 | медь | 88.273 |
| 2 | 3.2 | 3.86 | 0.156 | 0.156 | 1 | молибден | 151 |
| 3 | 3.22 | 3.8 | 0.170 | 0.100 | 1.163 | медь | 79.287 |
| 4 | 3.22 | 3.8 | 0.170 | 0.100 | 1.163 | медь + молибден (0.2) | 93.466 |
| 5 | 3.22 | 3.8 | 0.170 | 0.100 | 1.163 | медь + молибден (0.1) | 87.9 |

где:

$D_a$ – диаметр анода;

$D_в$ – диаметр по задней стенке резонатора;

$\tau_a$ – толщина ламели у анода;

$\tau_в$ – толщина ламели на периферии;

$\tau_a$/w – отношение толщины ламели к зазору между ними;

t – толщина молибденовой напайки.

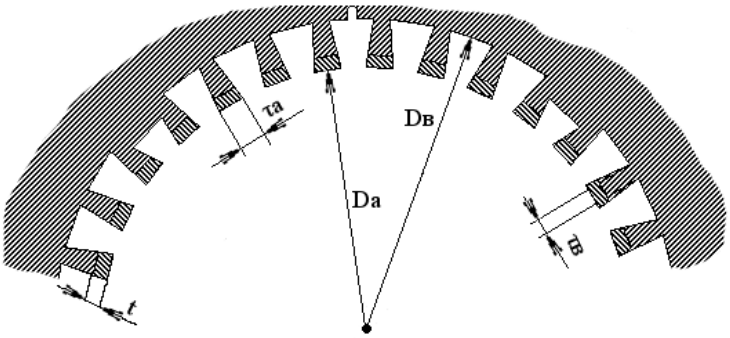


*Рис. 3. АЗС магнетрона с трапециидальными ламелями и молибденовыми напайками.*

Получить АЗС с минимальными потерями и при этом иметь максимальную формоустойчивость при работе магнетрона в генераторном режиме не удалось, поэтому были выбраны компромиссные решения. Интерес представляют два варианта конструкции, которые и были в дальнейшем исследованы: первый – чисто медная система с трапециидальной ламелью (№3), второй – медно-молибденовая система (№5).

Существующая конструкция магнитопровода, применяемая в прототипе, в свое время рассчитывалась с помощью программы «Weber». В настоящее

время, совместно с представителями предприятия ООО «Магнитные системы» Сергеевым С.В. и Исаевой И.Н., проведено улучшение конструкции магнитопровода с помощью более современной программы «BEMS». Работа была направлена на улучшение равномерности основных характеристик магнитного поля $B_z(z)$, $B_r(z)$ в пространстве взаимодействия и уменьшение полей рассеяния.

Для увеличения долговечности магнетрона был проанализирован катодно-подогревательный узел существующей конструкции и устранены некоторые дефекты его конструкции. В частности, втулка на изделии существующей конструкции имеет слишком малый размер. За счет увеличения длины втулки L до значений величин, равных двум диаметрам керна катода, удалось уменьшить биения керна относительно втулки с 0.18мм до 0.08мм максимум.

«Тонким» местом в конструкции КПУ является конфигурация трубки катода, представляющая собой трубу с четырьмя отверстиями в двух взаимно перпендикулярных направлениях, разнесенных по длине. Отверстия в данной конструкции прибора необходимы, так как они препятствуют распространению теплового потока вдоль оси трубки, увеличивая градиент температуры, но при этом возможна потеря формооустойчивости трубки и, как следствие, соосности анод-катод. В дальнейшем предполагается провести анализ формоустойчивости такой конструкции и, если понадобится, то ввести изменения конструкции с целью сохранения формоустойчивости КПУ.

Измерения параметров резонансной кривой рабочего вида колебаний замедляющей системы были проведены на установке низкого уровня мощности. Сравнительная оценка параметров анодных блоков медных(«М») и медно-молибденовых («ММ») систем позволяли сделать вывод о необходимости отработанной технологии химической очистки «ММ» систем. Измеренные образцы «ММ» блоков имели значения собственной добротности $Q_0$ ~ в 1.5 ÷ 2 раза ниже по сравнению с «М» блоками.

Была также поставлена задача по созданию конструктивного варианта изделия с четвертьволновым трансформатором гантельного типа. Преимущества его по сравнению с имеющимся трехсекционным цилиндрическим трансформатором очевидны (широкополосность, простота изготовления). Проведена расчетная часть трансформирующего устройства, были изготовлены макеты, необходимые для отработки на установке низкого уровня мощности («НУМ») геометрической длины четвертьволнового трансформатора.

Было изготовлено и исследовано на установке высокого уровня мощности («ВУМ») семь макетных образцов изделий, которые имеют ламели трапециидальной формы, из них:

- три изделия с медно-молибденовой АЗС и трехсекционными цилиндрическими трансформаторами (№5 в табл. 1);

- два изделия с медной АЗС и трехсекционными цилиндрическими трансформаторами (№3 в табл. 1);
- два изделия с медной АЗС и трансформаторами гантельной формы (№3 в табл. 1).

Магнетроны с медной системой и трехсекционными цилиндрическими трансформаторами удовлетворяют всем требованиям по электрическим параметрам. В настоящее время одно из этих изделий проходит испытания на безотказность. После 619 часов (1238 циклов) электрические параметры остались без изменений.

Из трех магнетронов с медно-молибденовой системой удовлетворяет требованиям по электрическим параметрам только одно изделие. Два других изделия имеют узкую область существования вида по магнитному полю. Проводится анализ этих недостатков.

Электрические параметры изделий с медной системой и трансформаторами гантельного типа не удовлетворяют требованиям по электрическим параметрам. Необходима тщательная экспериментальная проверка правильности геометрической длины четвертьволнового трансформатора на установке «НУМ».

Полученные результаты расчетов, электрические параметры изготовленных макетных образцов и результаты испытаний на безотказность позволяют надеяться на положительный результат разработки магнетрона 2-мм диапазона длин волн с увеличенным до 1000 часов сроком службы.

1. Д. Е. Самсонов «Основы расчета и конструирования многорезонаторных магнетронов», под редакцией С. Е. Темкина, М.: «Советское радио», 1966г.
2. В. Эспе «Технология электровакуумных материалов», т. 1 «Металлы и материалы с металлической проводимостью», под ред. Р. А. Нилендера и А. А. Котляра, М.: Государственное Энергетическое Издательство, 1962г.