

## ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕГЕНЕРАЦИИ МОЩНЫХ ЭВП. 1. АНОДНАЯ ЗАМЕДЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА

В настоящее время проблема развития электровакуумных приборов (ЭВП) СВЧ связана с одной стороны с совершенствованием конструкций и электрического режима работы данных приборов, а с другой – с упрощением технологического процесса их изготовления. Но из-за достаточно малого финансирования работы по созданию новых приборов ведутся не столь активно. Учитывая значительное количество сгоревших приборов, а также экономическую «невыгодность» их утилизации, процесс их восстановления является единственным эффективным путем решения проблемы воспроизводства данных приборов. Такой путь восстановления работоспособности приборов, получивший название регенерация ЭВП СВЧ, доказал свою экономическую целесообразность [1]. Однако в существующей концепции проектирования и разработки ЭВП СВЧ регенерации приборов не уделялось отдельного внимания и поэтому весь цикл их конструирования проходил без учета последующего возможного восстановления с целью повторного их использования в радиоэлектронной аппаратуре. Этот путь эффективно может быть применён к мощным магнетронам, которые длительное время выпускались промышленностью и продолжают эффективно эксплуатироваться в существующих радиоэлектронных системах, но в силу разных причин потерявших работоспособность.

В самой общей формулировке анодная система ЭВП – это электрод, являющийся приёмником электронов и имеющий положительный потенциал относительно катода. Конструктивные особенности и материал анодного узла (системы) определяются спецификой его работы в приборе. Помимо «чисто электронной» функции анод магнетрона обеспечивает отвод выделяющейся на нём мощности посредством теплоизлучения, теплопроводности, конвекции воздуха или с помощью систем охлаждения. В рассматриваемых мощных ЭВП применяются, как правило, медные аноды с принудительным, воздушным или водяным охлаждением, в зависимости от мощности прибора. В конструкциях анодов используется обычно бескислородная медь, обладающая чрезвычайно высокой теплопроводностью, газонепроницаемостью и механическими свойствами, позволяющими, в частности, изготавливать их методом пластических деформаций.

Достаточно универсальна роль анодной системы в приборах М-типа (магнетроны, амплитроны и др.). Дело в том, что в этих приборах анод и катод образуют рабочее пространство прибора, в котором одновременно реализуются все основные физические процессы, происходящие при взаимодействии электронного пучка с СВЧ-полем, включая фокусировку электронного потока, подпитку его за счёт вторичной эмиссии, обеспечение условий синхронизма электронов с ВЧ-полем, отдачу ВЧ-энергии в нагрузку, сбор отработавших электронов и т.д..

По существу анодные системы определяют диапазон частот, мощность, КПД, коэффициент усиления, устойчивость работы прибора и целый ряд других рабочих параметров, включая габариты и массу. Такая многофункциональность, сочетаемая с требованиями высокой надёжности и долговечности, как показывает практика, обуславливает сложность их конструкции, необходимость использования особо ценных материалов, высокий уровень технологии. Это делает анодный узел одним из самых дорогостоящих в общей конструкции ЭВП, поэтому анализ и обоснование возможности вторичного использования анодных узлов – одна из основных задач в общей проблеме регенерации. Общая методика регенерации магнетронных генераторов, включая перечень технологических операций, рассмотрена в [2].

Применительно к не пакетированным магнетронам таблица относительной стоимости изготовления различных узлов выглядит следующим образом.

Т а б л и ц а

№ п/п	Наименование узлов	Цена
1.	Катодный узел	0,1
2.	Замедляющая система	0,45
3.	Вывод энергии и армировочные детали	0,10
4.	Сборка	0,25
5.	Динамическая настройка	0,07
6.	Сдача ОТК и представителю заказчика	0,01

Это даёт возможность определить экономическую целесообразность проведения работ по восстановлению приборов. Анодные системы (блоки), как известно, представляют собой функционально чрезвычайно важную [3-6] и дорогостоящую часть ЭВП (практически половину стоимости прибора), тем важнее значимость их регенерационных технологий.

В процессе эксплуатации анодные блоки подвергаются воздействию различных физико-химических факторов. К ним относятся, прежде всего, термохимические напряжения и тепловые эффекты, возникающие вследствие бомбардировки электронным потоком рабочих поверхностей электродов, в особенности в импульсном режиме [7,8]. При этом могут иметь место электронная эрозия участков поверхности, проплавление и соответственно необратимая деформация. Рассмотрим основные физико-химические факторы и процессы, влияющие на состояние анодных узлов мощных ЭВП в процессе их эксплуатации. В первую очередь к ним, безусловно, следует отнести теплофизические процессы. Именно анод в магнетронах принимает основной поток электронов, вылетевших из катода и прошедших предварительно те или иные системы фокусировки и управления. Электрон, получивший определённый запас кинетической энергии в результате предварительно ускорения, при ударе о поверхность анода отдаёт свою энергию в виде тепла, реализуя процесс так называемой электронной бомбардировки. В ряде мощных электронных приборов, например амплитронах и магнетронах, интенсивность такой бомбардировки настолько велика, что вызывает эрозию поверхности анода, обращённой к электронному потоку. Поэтому нередко на ламели резонаторной системы наносятся защитные покрытия из тугоплавких металлов, например вольфрама, а сами ламели изготавливаются в виде трубок (бугелей), внутри которых протекает охлаждающая жидкость.

Процесс эрозии и напыления на торцы ламелей приводит к изменению их геометрических размеров. Как показано в работе [9], напыление, если рассматривать его как увеличение геометрических размеров, не приводит к существенным изменениям, хотя не исключает процесса очистки АЗС при регенерации.

Так как основной характеристикой замедляющей системы является дисперсионная характеристика, остановимся на рассмотрении этой характеристики, при некоторых возможных деформациях ламелей, что схематично изображено на рис. 1.

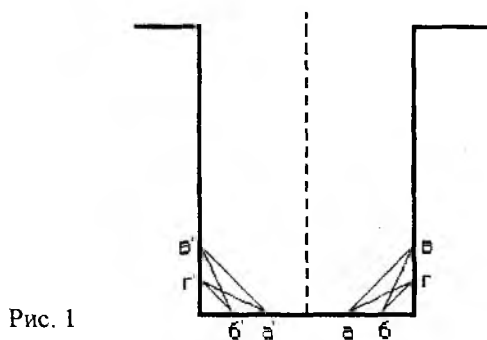


Рис. 1

Для этого воспользуемся подходом, изложенным в [10], и выберем к примеру обычную систему без связей со щелевым резонатором, так как для данных расчетов тип резонатора не является критичным. Поскольку мы будем рассматривать профиль окончания ламели на границе с пространством взаимодействия, процедура расчета дисперсионной характеристики ЗС сводится к нахождению корней резонансного уравнения (справедливого как для обычного магнетрона, так и обращенного):

$$Y_{np} + Y_{npus} = 0. \quad (1)$$

Проводимость пространства взаимодействия КМ определяется по формуле [11]:

$$Y_{np} = \frac{1}{377} \frac{Nh}{2\pi a} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left( \frac{\sin \gamma \theta}{\gamma \theta} \right)^2 \frac{Z_{\gamma}(kr_a)}{Z'_{\gamma}(kr_a)}, \quad (2)$$

где  $N$  – число резонаторов;

$\gamma = n + mN$  – номер вида (моды) колебания;

$m$  – целое число;

$n$  – номер основного вида колебания;

$h$  – высота анодного блока,

$k$  – волновое число, которое является корнем уравнения (1);

$Z_{\gamma}$  и  $Z'_{\gamma}$  – функции, которые определяются выражениями [10]:

$$Z_{\gamma}(kr_a) = J_{\gamma}(kr) - \frac{J'_{\gamma}(kr_k)}{N'_{\gamma}(kr_k)} N_{\gamma}(kr); \quad Z'_{\gamma}(kr_a) = J'_{\gamma}(kr) - \frac{J_{\gamma}(kr_k)}{N_{\gamma}(kr_k)} N'_{\gamma}(kr),$$

где  $J_{\gamma}, N_{\gamma}, J'_{\gamma}, N'_{\gamma}$  – Функции Бесселя и Неймана и их производные порядка  $\gamma$ ;

$r_k$  – радиус катода магнетрона;

$r$  – текущая координата.

Проводимость щелевого резонатора определяется выражением [10]:

$$Y_{pez} = -\frac{1}{377} \frac{h}{d} ctgkl, \quad (3)$$

где  $d$  – ширина щели,

$l$  – высота щелевого резонатора.

Пересчет проводимости резонатора к общей границе с пространством взаимодействия, т.е. учет скоса (выбоины), будем производить по формуле:

$$Y_{npus} = Y_{ob} \frac{Y_{oa} C_2 - Y_{pez} C_4}{Y_{pez} C_3 - Y_{oa} C_1}, \quad (4)$$

где  $Y_{oa} = \frac{1}{377} \frac{l_a}{2\theta a}$ ;  $Y_{ob} = \frac{1}{377} \frac{h}{2\theta b}$ ;

$$C_1 = J_0(ka)N_1(kb) - J_1(kb)N_0(ka); \quad C_2 = J_0(kb)N_0(ka) - J_0(ka)N_0(kb);$$

$$C_3 = J_1(ka)N_1(kb) - J_1(kb)N_1(ka); \quad C_4 = J_0(kb)N_1(ka) - J_1(ka)N_0(kb),$$

здесь  $a = r_a - \frac{\tau}{2 \sin \frac{\psi}{2}}$ ;  $b = r_l - \frac{\tau}{2 \sin \frac{\psi}{2}}$ ,

где  $\psi$  – центральный угол лопаточного резонатора;

$2\theta$  – центральный угол, соответствующий одной щели, определяется выражением:

$$\theta = \frac{\pi}{N} - \frac{\tau}{2r_a},$$

$\tau$  – толщина ламели;

$r_a$  – радиус анода;

$r_l$  – радиус ламели;

$w$  – расстояние между ламелями.

Результаты вычислений представлены на рис. 2. Кривая 1 (обозначенная кружками) на обоих графиках характеризует ход дисперсионной характеристики для недеформированного окончания ламели. Кроме этого на графиках представлены кривые при фиксированной длине скоса окончания ламели в радиальном направлении (0,01см на рис. 2а и 0,03 см на рис. 2б) и двух различных длинах скоса в азимутальном направлении (0,01см и 0,03см соответственно обозначенные 3 и 2).

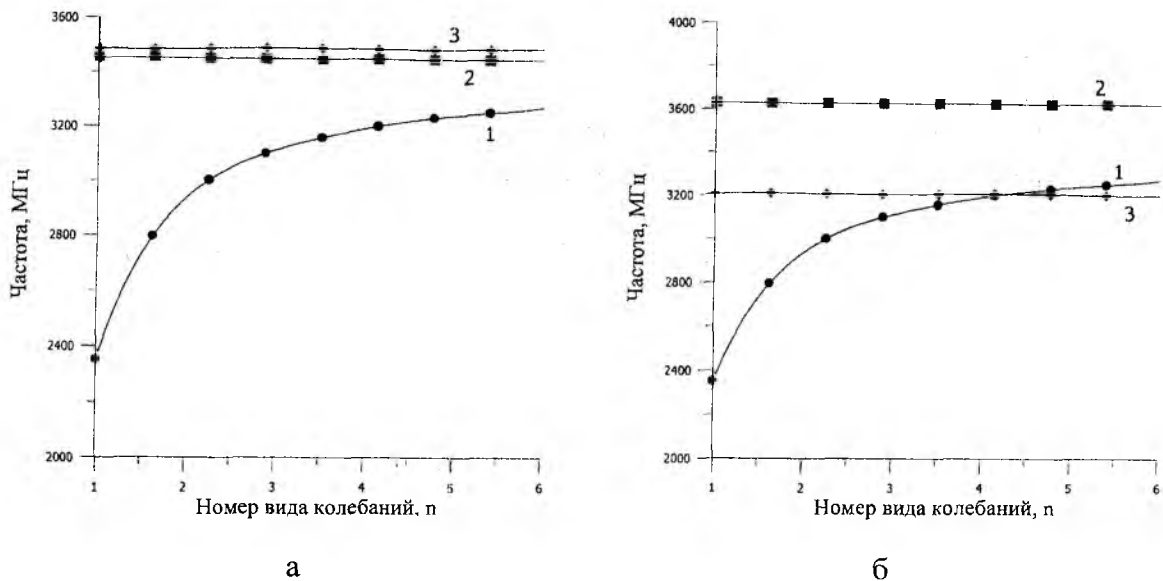


Рис. 2

Таким образом из графиков следует, что деформации торцов ламелей существенно влияют на ход дисперсионной характеристики, а следовательно на уход рабочей частоты. Поэтому анодную систему с деформированными торцами ламелей вторично лучше не использовать. Такие деформации возможны при нарушении режима охлаждения прибора. Поэтому тепловой режим работы прибора играет важнейшую роль.

Как известно, условия нагрева поверхности анодной системы электронным потоком в условиях работы прибора в непрерывном и импульсном режимах принципиально отличаются [12]. Основной фактор, ограничивающий увеличение импульсной мощности ЭПВ – это разрушение металла импульсным нагревом. Обычно приборы работают в импульсных режимах на скважностях 100-1000. Поверхностный слой металла АЗС быстро нагревается за время каждого импульса, и его температура поднимается в зависимости от продолжительности импульса и условий охлаждения до температуры  $T_0 + \Delta T$ . После прохождения импульса металл начинает охлаждаться, но время охлаждения металла больше, чем время, через которое следует следующий импульс. Такая быстрая смена температурных состояний вызывает напряжения в тонком поверхностном слое металла и при частом повторении импульсов приводит к микротрещинам. Микротрещины в свою очередь резко затрудняют передачу тепла и ведут к увеличению температуры. При этом поверхностный слой начинает испаряться и плавиться. Испарившийся металл оседает на изоляторы и катод, что соответственно приводит к пробоям и отравлению катода. Далее прибор не пригоден к эксплуатации.

Прибавка температуры за время длительности импульса определяется по формуле [12]:

$$\Delta T = \frac{0,27P\sqrt{\tau}}{\sqrt{\rho\lambda c}}, \quad (5)$$

где  $P$  – удельная мощность электронного потока, Вт/(см<sup>2</sup>с);

$\tau$  – удельная теплопроводность вещества, кал/смс;

$c$  – удельная теплоёмкость вещества, кал/(гС<sup>0</sup>);

$\rho$  – плотность вещества, г/см<sup>2</sup>.

Это соотношение выведено при условии, что входящие в формулу величины не меняются с температурой. Кроме того, оно не учитывает глубину проникновения электронов в металл, однако с увеличением глубины проникновения электронов в металл снижается  $\Delta T$ .

Для характеристики этого снижения вводится функция:  $G(\frac{\delta}{\sqrt{a\tau}})$ , в которой  $\delta$  – глубина проникновения (см),  $a = \frac{\lambda}{\rho c}$  – температуропроводность металла (см/с).

Тогда с учётом (5) для  $\Delta T$  будем иметь:

$$\Delta T(\delta) = \frac{0,27P\sqrt{\tau}}{\sqrt{\rho\lambda c}} G\left(\frac{\delta}{\sqrt{a\tau}}\right), \quad (6)$$

где значение  $G(\frac{\delta}{\sqrt{a\tau}})$  находится из графиков [12], в частности для меди  $\delta = 5,87 \cdot 10^{-3}$  см.

Расчёты, проведённые для медных анодных блоков импульсных магнетронов МИ-29 и МИ-285, показывают, что при удельных импульсных мощностях на поверхности 73,5кВт/см<sup>2</sup> и 76,9кВт/см<sup>2</sup> и длительностях импульсов 2,5мкс и 3,3 мкс соответственно, прибавка температуры составит 37<sup>0</sup>С и 44<sup>0</sup>С.

В случае не импульсного, а постоянного электронного потока температура поверхности металла определяется по формуле:

$$T_2 = \frac{d}{\lambda} P + T_1, \quad (7)$$

где  $d$  – толщина металла;

$T_1$  – температура охлаждаемой жидкости.

Чтобы уменьшить  $T_2$  при заданном  $P$ , надо снизить  $T_1$  и уменьшить толщину металла. В случае же импульсного нагрева такой путь неэффективен, так как за время импульса тепло не успевает дойти до охлаждаемой поверхности.

Расчёты в [12] показывают, что за время импульса порядка 2 мкс тепло успевает пройти вглубь металла на расстояние менее 0,1 мкм, и только при длительности 2 мс это расстояние возрастает до 1 мкм.

С точки зрения задач регенерации полезно также знать зависимость допускаемой импульсной мощности ЭВП от срока службы (для  $\Delta T > \Delta T_6$ ) [12]:

$$P\sqrt{\tau} = \frac{\sqrt{\lambda\rho c}}{0,27} \left[ \frac{0,0723U}{\lg N + \lg \frac{U}{U - 50T_0} + 1,22} - T_0 \right], \quad (8)$$

где  $U$  – теплота испарения, кал/моль;

$T_0$  – постоянная составляющая температуры;

$N$  – количество импульсов;

$\Delta T_6$  – безопасная амплитуда импульсной температуры.

Из работы [12] следует, что приближенная оценка безопасной амплитуды импульсной температуры  $\Delta T_6$  определяется по формуле:

$$\Delta T_6 = \frac{2\delta_r}{\alpha E}, \quad (9)$$

где  $\delta_r$  – предел текучести (при растяжении отожжённого металла при 20<sup>0</sup>С);  
 $\alpha$  – коэффициент линейного растяжения при 20<sup>0</sup>С;  
 $E$  – модуль упругости 20<sup>0</sup>С.

В частности для меди и вольфрама эта температура, по приведённой формуле, равна соответственно 110<sup>0</sup>С и 843<sup>0</sup>С.

Формулы (5-9) дают возможность по выходной мощности определить амплитуду импульсной температуры, сравнить её с безопасной амплитудой, сопоставить долговечность регенерированной АЗС (с учётом проработанного времени, до регенерации). При импульсном режиме работы предельно допустимые температуры должны иметь более низкие значения, так как при таком режиме работы происходит быстрое накопление неоднородностей внутри металла и резкое нарастание температуры частиц, бурному испарению которых способствуют появляющиеся трещины.

Достаточно важным параметром теплового режима анода является безопасная температура. Существует два подхода к определению этой величины. Первый – это температура, ниже которой не происходит отравление катода парами меди. Безопасной температурой считается температура, при которой за определённое время с поверхности анода испарится монослой металла. Как следует из [12], для меди безопасная температура составляет приблизительно 500<sup>0</sup>С, при этом монослой испарится за 30000 часов. Второй способ связан с образованием проводящих плёнок на изоляторах. Безопасной температурой считается такая, при которой толщина осаждённой плёнки будет не более 100мкм. По этой методике для меди эта величина составляет приблизительно 550<sup>0</sup>С.

Например для импульсного магнетрона МИ-262, работающего при удельной импульсной мощности 87500Вт/см<sup>2</sup> и длительности импульса 4\*10<sup>6</sup>, расчётная долговечность во много раз превышает долговечность по ТУ, с учётом отработанного срока до регенерации. В реально работающих конструкциях температура анодных блоков менее 500<sup>0</sup>С, следовательно, она удовлетворяет требованиям безопасной температуры. Таким образом, из всего вышесказанного следует, что если при эксплуатации прибора не был допущен его перегрев и прибор не получил механических повреждений, то анодная система может быть успешно использована вторично.

**Список литературы:** 1. Чурюмов Г.И., Копоть М.А., Козорезов Г.Г. Концепция развития электровакуумных приборов (ЭВП) СВЧ: от проектирования до регенерации // Материалы 1-го Междунар. радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития.» Сб. науч. трудов. Харьков: ХНУРЭ. 2002. С. 353 – 355. 2. Козорезов Г.Г., Копоть М.А., Чурюмов Г.И. Подход к вопросам регенерации магнетронных генераторов // Сб.науч. трудов 7-ой Междунар. конф. «Теория и техника передачи, приёма и обработки информации»: Харьков: ХТУРЭ, 2001. С. 465 – 468. 3. Силин Р.А., Сазонов В.П. Замедляющие системы. М.: Сов. радио, 1966. 632 с. 4. Тараненко З.И., Трохименко Я.К. Замедляющие системы. Киев: Техника, 1965. 307 с. 5. Замедляющие системы: Обзоры по электронной технике / Под ред. Р.А. Силина. 1972. Вып. 1(53). Ч. 1 и 2. 6. Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями / Пер. с англ.; Под ред. М.М. Федорова. М.: 1961. Т. 1. 456 с. и Т. 2. 471 с. 7. Захаров М.И. Нагрев тела импульсным электронным потоком // Электронная техника. 1971. Сер. 1. Вып. 11. С. 12 – 22. 8. Хмара В.А. К вопросу о долговечности материала анода мощных импульсных электронных приборов // Электронная техника. 1971. Сер.1. Вып.1. С. 77 – 82. 9. Нікітенко О.М. Проектування резонаторної системи магнетронів // Радіотехніка: Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 1999. Вип. 109. С. 103 – 109. 10. Магнетроны сантиметрового диапазона: Пер. с англ. Под ред. С.А. Зусмановского. М.: Сов. радио, 1950. Т. 1. 420 с. 11. Шлиффер Э.Д. Расчет и проектирование коаксиальных и обращенно-коаксиальных магнетронов. М.: Изд. МЭИ, 1991. 167 с. 12. Коваленко В.Ф. Теплофизические процессы и электровакуумные приборы. М.: Сов. радио, 1975. 216 с.