

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МАГНЕТРОНОВ С БЕЗНАКАЛЬНЫМ ЗАПУСКОМ

### SOME FEATURES OF THE FUNCTIONING OF MAGNETRONS WITH INITIAL START

В.А.Мельников, С.А.Платонов, И.П.Ли, Ю.В.Поляков

V.A.Melnikov, S.A.Platonov, I.P.Li, Y.V.Polyakov

АО «Плутон», Москва

*Более детальное изучение механизмов работы магнетронов с «холодным» катодом, в том числе с использованием практических результатов применения в АО «Плутон», позволит выработать рекомендации по конструированию и использованию источников питания и модуляторов для повышения качества, надежности и долговечности комплексов на основе магнетрона с безнакальным запуском.*

*A more detailed study of the mechanisms of operation of magnetrons with a "cold" cathode, including using the practical results of application in JSC "Pluton", will allow to develop recommendations for the design and use of power sources and modulators to improve the quality, reliability and durability of complexes based on a magnetron with an initial launch.*

*Ключевые слова: магнетрон с «холодным» катодом, магнетрон с безнакальным запуском, модулятор, импульсный источник питания.*

*Key words: magnetron with a "cold" cathode, magnetron with an initial launch, modulators, switching power supply.*

При разработке импульсных магнетронов особую сложность занимают расчеты и эксперименты, связанные с предгенерационным режимом работы. От процессов возбуждения рабочего вида колебаний на фронте и стабильности поддержания генерации в течение всего модулирующего импульса зависит качество характеристик магнетрона и сохранение параметров в течение всего срока службы. Важным фактором, влияющим на работоспособность магнетрона, является обеспечение требуемых условий возбуждения колебаний в магнетроне со стороны источника питания и модулятора. Особый интерес представляют особенности функционирования комплекса источника питания, модулятора и безнакального магнетрона.

В настоящее время известен безнакальный магнетрон [2, 3], процесс ввода в режим генерации в котором происходит без подачи напряжения накала за счет подачи анодного напряжения. Единственным разработчиком и изготовителем безнакальных магнетронов является АО «Плутон». Применение безнакальных магнетронов в современных радиолокационных станциях различного назначения обусловлено следующими преимуществами: большая (до 10000 часов и более) долговечность, практически мгновенный (до 0,5 с) запуск прибора, меньшая стоимость передатчика по сравнению с дорогостоящими электровакуумными усилителями, малые массы и габариты приборов. Поэтому вопросы, связанные с повышением качества и надежности комплексов с использованием безнакальных магнетронов, являются актуальными как для используемых в настоящее время систем, так и для создания перспективных образцов с улучшенными характеристиками.

Катод безнакального магнетрона представляет собой чередующиеся эмиттеры двух типов:

- первый тип эмиттеров - автоэлектронный катод (далее - АЭК), обеспечивает запуск магнетрона за счет туннельного эффекта электронов с острий [3] и наноструктурных элементов – вискерсов [4]. Такие электроны принято называть первичными. Материал АЭК – тугоплавкие материалы толщиной несколько микрон.

- второй тип эмиттеров - вторичноэмиссионный катод (далее – ВЭК), обеспечивает поддержание режима генерации [3] за счет обратной бомбардировки поверхности электронами (первичными и вторичными). ВЭК изготавливается преимущественно методами порошковой металлургии из смеси металлов платиновой группы (платина, палладий) и интерметаллических соединений, например, палладия с барием [5]. Еще одна важная функция ВЭК – активирование АЭК и, собственно, ВЭК путем диффузии и массопереноса активного компонента бария на поверхности АЭК и ВЭК с целью уменьшения работы выхода электронов.

В литературе подробно рассмотрены явления, происходящие в начальный момент времени подачи анодного напряжения. Например, в [1] при рассмотрении предгенерационных явлений указано, «что при повышении анодного напряжения достигается точка, в которой обратная бомбардировка и анодный ток начинают одновременно». Далее мощность обратной бомбардировки быстро (единицы наносекунд) возрастает до максимального значения при увеличении анодного напряжения. Указанные явления подробно описаны в литературных источниках для магнетронов с термокатодом. Учитывая использование безнакальных магнетронов в современных и перспективных радиолокационных системах, представляет интерес подробнее рассмотреть предгенерационные явления данного типа электровакуумных приборов с последующей оценкой режима генерации. В результате исследования возможно выработать рекомендации по оптимальным режимам работы безнакального магнетрона с целью их реализации при разработке источников питания импульсного напряжения.

Рассмотрим физические явления, происходящие на различных участках импульса модулирующего напряжения на примере одного из безнакальных магнетронов 2-см диапазона длин волн коаксиальной конструкции с максимальным напряжением анода 4,75 кВ, импульсным током 1,5 А и минимальной импульсной мощностью 1,5 кВт. Работа магнетрона обеспечивается модулятором с импульсным трансформатором. Осциллограмма импульса модулирующего напряжения, импульса тока и огибающей высокочастотного (далее – ВЧ) импульса представлена на рис. 1. Методами математического моделирования, из импульса тока вычтена емкостная составляющая, все импульсы синхронизированы по времени. Напряжение работы магнетрона не превышает установленный уровень для генерации на основном виде колебаний. Детектирование импульса напряжения проводилось с помощью делителя напряжения типа АСА-6039, импульса тока с помощью датчика тока ТСР2020.

Из осциллограммы рис.1 очевидно, что при достижении напряжения порогового значения  $U_{0h} = \frac{\omega_c B (r_a^2 - r_k^2)}{2} - \frac{1}{2} \frac{m}{e} \omega_c^2 r_a^2$ , где  $\omega_c$  – угловая частота движения ВЧ поля,  $B$  – индукция постоянного магнитного поля,  $r_a$  – радиус анода,  $r_k$  – радиус АЭК [6], начинается протекание тока через магнетрон (участок а-б). В этот момент времени огибающая радиоимпульса не детектируется, что может говорить о природе возникшего тока. Действительно, в момент времени, когда энергия электрического поля достаточна, начинается процесс протекания автоэмиссионного тока из АЭК. В [6] указано, что пороговое напряжение  $U_{0h}$  больше напряжения анода  $U_{01}$ . Напряжение  $U_{01}$  соответствует скорости  $\omega_c$  электронов на границе объемно-пространственного заряда. Таким образом, из [6] можно сделать вывод, что объемно-пространственный заряд (далее – ОПЗ) уже сформирован до начала протекания тока. Однако, соотношение  $U_{0h} > U_{01}$  рассчитано для накаливаемых магнетронов. Механизм формирования ОПЗ для безнакального магнетрона требует более детального описания и экспериментального подтверждения. На участке а-б (рис.1) вероятнее всего происходит наведение первичным током заряда на концах ламелей [7], что приводит к возбуждению колебаний в анодно-резонаторной системе и

возникновению ВЧ поля, «провисание» которого в пространство между катодом и анодом [8] способствует изменению траекторий движения электронов с АЭК. Изменение траекторий приводит к повышению интенсивности электронной бомбардировки ВЭК, накоплению объемно-пространственного заряда и началу генерации магнетрона. Это предположение подтверждается участком б-в осциллограммы рис. 1: увеличение скорости нарастания активного тока магнетрона при наличии ВЧ поля и появление огибающей ВЧ импульса. Далее, на участке в-г происходит генерация ВЧ колебаний, магнетрон имеет конечное сопротивление.

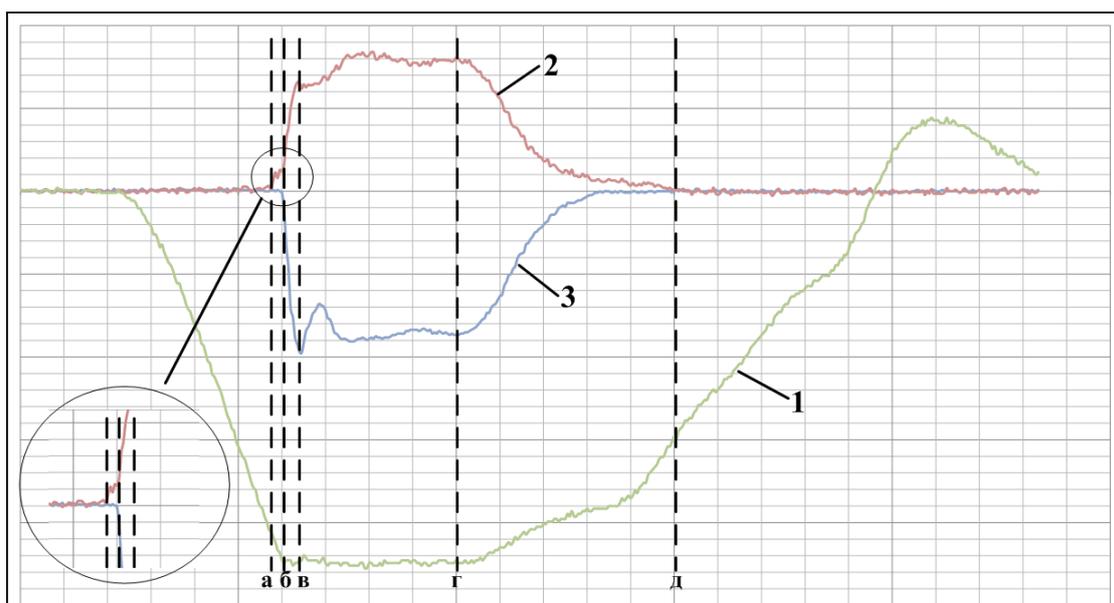


Рис. 1. Осциллограмма импульсов напряжения (1), тока (2) и огибающей ВЧ импульса (3).

Одним из основных факторов продолжительной безотказной работы безнакального магнетрона является обеспечение максимально быстрого прекращения генерации и протекания активного тока через магнетрон путем снятия анодного напряжения. В некоторых случаях, схемотехнические решения источников питания приводят к тому, что с прекращением генерации достаточно длительное время (до 100 – 150 нс.) сохраняется анодное напряжение (рис. 1, участок г-д), что приводит к возникновению процессов, характерных для предгенерационного режима, но более длительных по времени (до 10 раз): протекание автоэлектронного тока в отсутствие ОПЗ. Эта характеристика безнакального магнетрона определяется параметром скоса модулирующего импульса, обычно не превышающего 3 – 4 %. Продолжительное воздействие электрического поля, не предусмотренное режимом работы безнакального магнетрона, приводит к повышению температуры поверхности АЭК. ОПЗ несёт важную функцию по экранировке АЭК [3] в процессе генерации безнакального магнетрона, для чего размеры АЭК должны быть сопоставимы с диаметром втулки ОПЗ. В случае отсутствия такой экранировки, например, при уменьшении напряжения от расчетного значения, происходит постоянное протекание автоэмиссионного тока и бомбардировка поверхности АЭК ионами остаточных газов. Эти факторы приводят к дополнительному разогреву АЭК и разрушению автоэмиссионных центров на кромке и боковой поверхности АЭК. Происходит интенсивная деградация автоэмиссионных свойств во времени, что приводит к увеличению времени для накопления ОПЗ с последующим увеличением флуктуаций тока и огибающей радиоимпульса, вплоть до пропусков импульсов и отсутствию генерации. Это подтверждается осциллограммами (Рис. 2), снятыми в исследуемом магнетроне с тем же модулятором. Схемотехника используемого модулятора

с частичным разрядом ёмкости и импульсным трансформатором допускает превышение максимально допустимого анодного напряжения.

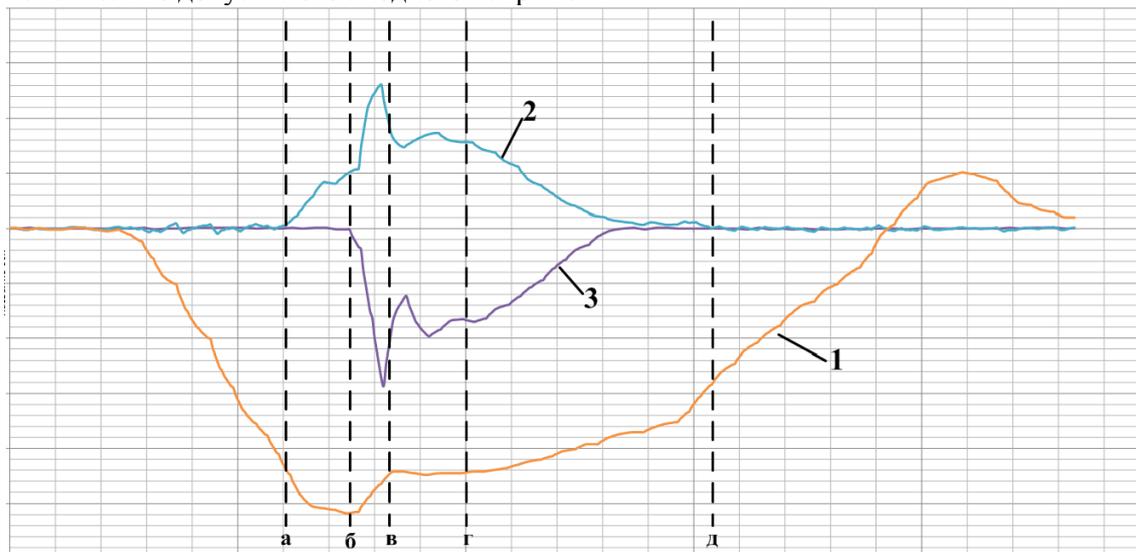


Рис. 2. Осциллограмма импульсов напряжения (1), тока (2) и огибающей ВЧ импульса (3) при превышении напряжения допустимого значения.

До установления колебаний, магнетрон имеет очень высокое внутреннее сопротивление, в результате чего анодное напряжение в начале импульса может быстро достичь увеличенной величины [8]. Участок а-б рис. 2 показывает, что превышение напряжения разрешенного значения на 15% привело к более длительному времени протекания первичного тока (в 4 раза), а значит и к более длительному времени воздействия электрического поля на АЭК, что негативно влияет на эмиссионные характеристики. Нарастание тока на участке б-в происходит одновременно с ростом огибающей ВЧ импульса. Протекание первичного тока при повышенном значении анодного напряжения приводит к дополнительному разогреву АЭК в процессе автоэмиссии и активной бомбардировке АЭК ионами в отсутствие экранирующего действия ОПЗ. Увеличение тока магнетрона происходит до тех пор, пока не настанет область устойчивых колебаний в-г. Участок г-д аналогичен приведенному на рис. 1.

Исходя из изложенных особенностей предгенерационного режима работы магнетронов с безнакальным запуском, а также учитывая многолетний опыт разработки и производства приборов подобного класса в АО «Плутон», следует важнейшее условие их функционирования: не допускается превышение амплитуды на фронте и превышения скоса импульса модулирующего напряжения. Выполнение указанных условий позволяет обеспечить требуемые характеристики безнакальных магнетронов и надежную эксплуатацию в течение всего срока службы, что может составлять более 10000 часов наработки. Эту особенность работы безнакальных магнетронов необходимо учитывать при разработке систем импульсного электрического питания аппаратуры применения и комплексированных изделий на их основе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Cross-Field Microwave Devices, Vol. 1, Principal Elements of Crossed-Field Devices, editor in chief E. Okress, 1961; pages 163 – 165.
2. Копылов М.Ф. и др. Авторское свидетельство № 1780444. Приоритет в СССР от 23.10.77 г.
3. Пипко Ю.А., Семенов Л.А., Галактионова И.А., Еремеева Г.А., Есаулов Н.П., Ильин В.Н., Марголис Л.М. Патент № 2019877 «Магнетрон с безнакальным катодом». Предприятие «Плутон», дата подачи заявки 17.04.1991 г.

4. Ли И.П. «Наноструктуры в палладий-бариевых катодах СВЧ-приборов», «Электроника. Наука, технология, бизнес», № 5, 2018 год, с. 144-151.

5. Патент РФ № 2380784. Магнетрон с безнакальным катодом // Ли. И.П., Дюбуа Б.Ч. и др. Приоритет от 24 октября 2008 г.

6. Бычков С.И. «Вопросы теории и практического применения приборов магнетронного типа», издательство «Советское радио», 1967 г., стр. 20 -24.

7. «Microwave Magnetrons», перевод с английского под редакцией С.А. Зусмановского, издательство «Советское радио», Москва, 1950 год, с. 29 – 30.

8. Лебедев И.В. «Техника и приборы сверхвысоких частот». Том II, Издательство энергия, 1964 год, с. 372 – 399, 449.

### **ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ИМПУЛЬСНЫХ МОДУЛЯТОРОВ С МАГНЕТРОНАМИ С БЕЗНАКАЛЬНЫМ ЗАПУСКОМ**

### **FEATURES OF OPERATION OF PULSE MODULATORS WITH MAGNETRONS WITH COLD CATHODE**

**В.А.Мельников, С.А.Платонов, И.П.Ли, Ю.В.Поляков.** s.platonov@pluton.msk.ru

**V.A.Melnikov, S.A.Platonov, I.P.Li, Y.V.Polyakov.**

АО «Плутон», Москва

*В статье рассмотрены особенности работы модуляторов на основе импульсных трансформаторов с магнетронами с безнакальным запуском. Отмечена высокая надёжность работы таких магнетронов при обеспечении требований по параметрам модулирующего импульса. Дается рекомендация по применению современных твердотельных модуляторов без импульсных трансформаторов.*

*The article discusses the features of the operation of modulators based on pulse transformers with magnetrons with cold cathode. The high reliability of the operation of such magnetrons is noted when meeting the requirements for the parameters of the modulating pulse. A recommendation is given for the use of modern solid-state modulators without pulse transformers.*

*Ключевые слова: безнакальный магнетрон, твердотельный модулятор.*

*Key words: magnetron with cold cathode, solid-state modulator.*

В настоящее время требования к информативности радиолокационных систем (РЛС) стремительно увеличиваются. За счёт совершенствования ЭКБ появляется возможность формировать радиолокационные сигналы методом прямого цифрового синтеза с последующей цифровой обработкой отраженных от целей сигналов. В случае необходимости обеспечения большой дальности работы РЛС в таких схемах требуется использовать весьма дорогостоящий усилитель СВЧ сигналов (твердотельный или электровакуумный). Однако, во многих применениях, таких как метеолокаторы, локаторы обзора окружающего пространства и т.п., по прежнему целесообразно использование простых РЛС на основе сравнительно дешёвых магнетронных передатчиков импульсного действия. Одним из существенных недостатков таких передатчиков является небольшой срок службы магнетронов.