

Прогнозирование надежности безнакальных магнетронов. Расширение технических возможностей

В. Мельников¹, д. т. н., Н. Скрипкин², С. Платонов³, к. т. н., Ю. Поляков⁴

УДК 621.385 | ВАК 05.27.02

Разработанный в ходе исследований физических процессов в безнакальном магнетроне мобильный автоматизированный измерительный комплекс позволяет произвести замеры ряда параметров, оказывающих критическое влияние на надежность изделия и исключить влияние человеческого фактора в процессе измерений его характеристик, а также обеспечить выработку дополнительных параметров – показателей, по изменению которых возможно прогнозирование надежности электровакуумных приборов. Целью исследований является систематизация известных подходов (методов), описывающих переход от параметров технологического цикла к параметрам прогнозирования надежности электровакуумных приборов.

Из литературных источников известны различные представления о работоспособности магнетронов с автоэмиссионным запуском [1, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14], ведутся постоянные дискуссии по созданию конструктивных вариантов катодов с разными комбинациями материалов. Проводятся обсуждения особенностей предгенерационного режима, влияния длительности фронта, амплитуды, формы модулирующего импульса, степени обратной бомбардировки заряженными частицами, степени экранировки автоэммиттеров объемно-пространственным зарядом (для правильного выбора выступающей кромки автоэммиттера) на работоспособность магнетрона с безнакальным катодом. Дальнейшее изучение процессов в магнетроне с «холодным» катодом является основанием для поиска критериев и разработки математической модели, с помощью которой возможно создать систематизированный подход к оценке надежности изделия. Системный анализ изменения критериальных электрических параметров и характеристик магнетрона, являющихся показателями качества конструкции и технологического процесса производства изделий, является основой для прогнозирования надежности прибора. В данной статье описывается разработанный с использованием процедур математической обработки мобильный автоматизированный ком-

плекс по инженерной экспресс-оценке и прогнозирования надежности.

Наиболее сложной и трудоемкой частью анализа является определение корреляционных зависимостей между упомянутыми выше показателями качества и показателями надежности, а также поиск оптимальных значений этих показателей по критерию наивысшей надежности изделия в эксплуатации. Учитывая режим использования магнетронов в изделиях более высокого уровня иерархии, представляется обоснованным применять для оценки надежности магнетронов такой показатель, как коэффициент оперативной готовности ($K_{о.г.}$), который характеризуется вероятностью того, что в произвольный момент времени изделие будет работоспособным [2], в ответ на требование штатно проработает необходимый для выполнения задачи период времени.

В настоящее время, для магнетрона с «холодным» катодом в литературных источниках отсутствует информация для проведения подобной оценки. Анализ качества функционирования безнакального магнетрона в аппаратуре применения проводится по принятым критериям технических условий, являющихся частным вариантом общих технических условий (ОТУ), не предусматривающих разделения по типам конструкции генераторов М-типа. ОТУ содержат общие рекомендуемые параметры и методы их оценки, используемые для разработки проекта технических условий на этапе опытно-конструкторских работ с учетом конкретных данных технического задания. Техническое задание, согласованное с потребителем-разработчиком аппаратуры, также не включает в себя критерии и методы оценки

¹ АО «Плутон», генеральный директор.

² ООО «ОКБ «Плутон», начальник лаборатории – главный конструктор.

³ ООО «ОКБ «Плутон», начальник лаборатории радиотехнического оборудования – главный конструктор.

⁴ АО «Плутон», директор по технической политике – главный технолог.

и прогнозирование надежности в рамках текущих показателей качества, а содержит только граничные значения этих показателей, превышение которых расценивается как дефект. Наличие подобного дефекта на разных этапах жизненного цикла изделия, в том числе в составе аппаратуры применения, приводит к забракованию, как в процессе производства аппаратуры применения или ее эксплуатации.

С повышением степени завершенности производства электровакуумного прибора (ЭВП) в составе аппаратуры вплоть до поставки в эксплуатацию, материальные затраты от вышедшего из строя ЭВП в составе изделия применения могут значительно возрасти. При этом следует рассматривать комплекс «безнакальный магнетрон (или любой другой ЭВП) – аппаратура применения». Влияние источника питания и его модулятора на изменение характеристик безнакального магнетрона подробно указано в [3], поэтому необходимо рассматривать именно комплекс аппаратуры и ЭВП, учитывая, что требования ГОСТов по приемке и испытаниям серийных изделий требуют проводить испытания и контроль качества ЭВП в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации.

В качестве основных, базовых критериев качества, могут быть рассмотрены существующие в нормативных документах параметры. Постановка задачи сводится к оценке изменения действующего параметра и влияния указанного изменения на надежность. Например, в случае с безнакальным магнетроном, изменение флуктуации огибающей ВЧ-импульса внутри существующего допуска, как правило, не превышающего более 10 нс (среднеквадратическое отклонение) по техническим условиям, может быть использовано как критерий оценки качества комплекса «магнетрон – источник питания». Увеличение значения флуктуаций в процессе производства может свидетельствовать о необходимости дополнительной тренировки магнетрона, или необходимости дополнительной регулировки источника питания [3], при этом оценка влияния данных процессов на надежность носит только качественный характер, количественно оценить надежность, ввиду отсутствия соответствующей модели надежности и методики оценки пока не представляется возможным.

Наличие дополнительных параметров – критериев качества комплексов «ЭВП – аппаратура применения» и их анализ в процессе производства аппаратуры позволит прогнозировать дальнейшую надежность аппаратуры и конечного изделия на его основе при наличии адекватной модели оценки надежности и степени влияния дополнительных показателей качества на надежность.

При решении вышеупомянутых задач, появляется возможность дополнительного повышения надежности в эксплуатации за счет устранения отдельных

несовершенств комплекса «магнетрон – модулятор», выявленных при анализе причин отказов. Комплексы с отклонением от оптимальных значений по параметрам в процессе производства могут быть подвергнуты контролю по дополнительным параметрам, а также дополнительному воздействию в виде технологических операций, например по дополнительной тренировке, прогону, регулировке или настройке комплексов. При этом, увеличение стоимости затрат на проведение указанных операций, включающих практически только внутриводскую трудоемкость, будет значительно меньше и не сопоставимо по размерам потерь от ухудшения надежности и выхода из строя аппаратуры на более поздних этапах технологического цикла и тем более в эксплуатации.

Наиболее актуальным представляется использование именно автоматизированных систем для сбора и анализа параметров – критериев качества, во-первых, исключающих влияние человеческого фактора, во-вторых, обеспечивающих не только визуальное представление измеренных параметров и сравнение их оператором с установленной нормой, но и оригинальную математическую обработку, в результате которой возможно формирование рекомендаций по содержанию дополнительных мероприятий по обеспечению надежности в перспективе.

Например, при измерении флуктуации фронта огибающей ВЧ-импульса магнетронов в соответствии с требованиями [4] предусматриваются два метода:

- метод 1 – осциллографирование, предусматривающее только визуальную оценку флуктуаций;
- метод 2 – использование специальных измерителей флуктуаций, позволяющих аппаратным методом измерить изменение по времени флуктуации фронта с последующей математической обработкой результатов.

При этом определение границы «размытия» флуктуаций по методу 1 может быть довольно субъективным и вносить погрешность в оценке математического веса не учтенных импульсов в нормальном распределении случайной величины флуктуаций. Осциллограмма флуктуации фронта импульса ВЧ огибающей безнакального магнетрона, накопленная в режиме «послесвечения» осциллографа в течение 5 с; что соответствует 150 тыс. импульсов для данного магнетрона, показана на рис. 1. Сильная «размытость» участков не позволяет объективно оценить их вклад в нормальное распределение флуктуаций, что приводит к погрешности при их оценке и закладывает ошибку для дальнейшего анализа качества и надежности. Поэтому, предпочтительнее использование метода 2, позволяющего оценить математически дисперсию случайной величины флуктуаций с дальнейшим вычислением ее среднеквадратического отклонения.

При этом сохраняется возможность измерения и предельных значений флуктуации, а также частоты

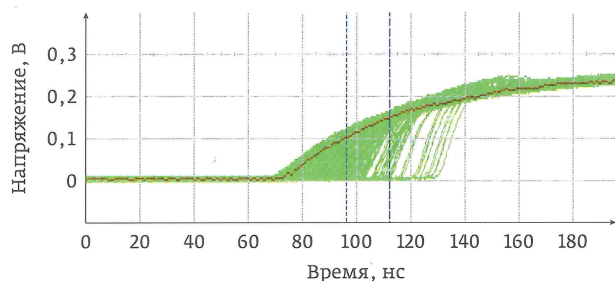


Рис. 1. Оциллограмма флуктуации фронта огибающей ВЧ-импульса безнакального магнетрона

возникновения флуктуаций того или иного значения (интервала значений).

Приборы для измерений флуктуаций – флуктуометры, возможно реализовать на базе стандартных средств измерений без необходимости разработки и изготовления специальной измерительной аппаратуры и программ и методик их аттестации. Таким стандартным средством измерения является цифровой запоминающий осциллограф с возможностью преобразования полученных результатов измерений в математические величины. Преимуществом такого технического решения также является присутствие осциллографов в реестре средств измерений.

Современные средства измерений позволяют предложить новый подход к задаче выработки дополнительных параметров – критериев качества. Основной целью предлагаемого подхода является не только измерение электрических параметров функционирования комплекса «магнетрон – модулятор», но и определение их стабильности, дисперсии, предельных значений,

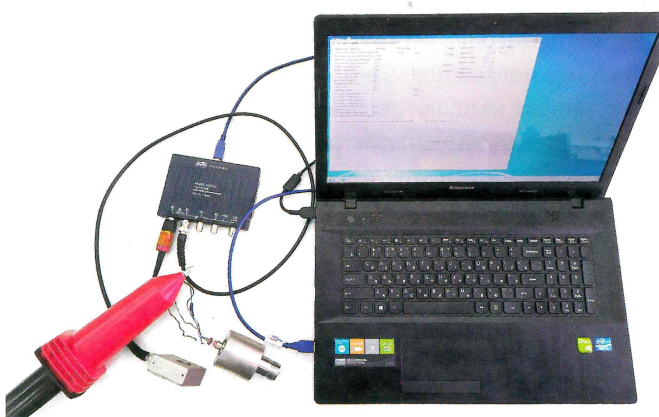


Рис. 2. Мобильный автоматизированный измерительный комплекс для контроля безнакального магнетрона, в составе которого цифровой осциллограф, ноутбук с программным обеспечением, датчик тока, делитель напряжения

тенденции и скорости изменения, параметров их распределений, соотношений и корреляционных зависимостей друг от друга, а также от условий внешних факторов. Сутью предлагаемого подхода является применение процедур математической обработки такого массива информации в соответствии с разработанной моделью прогнозирования надежности; автоматическое формирование и, на следующем этапе, автоматизированная реализация индивидуального для каждого изделия технологического процесса, целью которого является устранение причин ненадежности изделий за счет приведения комплекса их параметров – критериев качества, к заранее определенному оптимальному и сбалансированному значению. При этом, траектория и длительность прогона, тренировки, формирование рекомендаций по настройке комплекса «магнетрон – модулятор» должны определяться исходя из особенностей каждого изделия (нормального технологического разброса, определенного в ходе измерений в процессе производства) для максимального соответствия конструктивно-технологических свойств и запасов режимам использования с целью достижения заданных показателей надежности. Более того, компактность и малая масса существующих средств измерений и вычислительных устройств позволяют создавать на их основе мобильные автоматизированные измерительные комплексы (МАИК). Прототип МАИК для оценки характеристик безнакальных магнетронов разработан и изготовлен в лаборатории радиотехнического оборудования АО «Плутон» (рис. 2). Разработанное с использованием стандартного языка программное обеспечение позволяет проводить математическую обработку и оценку изменения величин, измеренных цифровым осциллографом. В случае безнакального магнетрона такими величинами является напряжение начала генерации, скос плоской части модулирующего импульса напряжения, флуктуации фронта радиоимпульса, выброс импульса напряжения на фронте, ток начала генерации и др. Интерфейс программы МАИК с построенными графиками на основании данных, полученных в процессе измерений параметров безнакального магнетрона, показан на рис. 3.

Применение МАИК возможно в условиях производства магнетронов, в том числе с безнакальным запуском, например в составе стендов динамических испытаний. Возможно и необходимо использование МАИК в процессе производства аппаратуры применения с целью оценки качества комплекса «магнетрон – модулятор», в том числе начиная с операций по входному контролю. В качестве оборудования для входного контроля при производстве радиоэлектронной аппаратуры, как правило, используется идентичный по своим характеристикам стенд, в состав которого возможно включение МАИК. Удобство МАИК заключается в исключении человеческого фактора при оценке параметров – критериев качества с возможностью

оформления протокола испытаний в автоматическом режиме. Отличительной особенностью МАИК является низкая стоимость входящих в него компонентов (цифровой осциллограф, ноутбук с программным обеспечением, датчик тока, делитель напряжения). Применение МАИК у производителя аппаратуры позволяет выявлять по изменению параметров – критериев качества на разных этапах технологического цикла изделия с наименьшим конструктивно-технологическим запасом (КТЗ). Недостаточный КТЗ является отрицательным фактором и может послужить причиной появления несогласованных режимов применения, сопровождающихся дальнейшей деградацией и последующим отказом всего изделия. Добавляя в технологический процесс производства комплексов «магнетрон – модулятор», как указано выше, различные операции по настройке, регулировке, тренировке или прогону с одновременным контролем параметров – критериев качества, устанавливается оптимальный состав параметров, оказывающих влияние на надежность и сохранение КТЗ всего комплекса, вплоть до этапа применения изделия по прямому назначению.

Одной из целевых функций разработки и внедрения МАИК является снижение средней трудоемкости и себестоимости магнетронов, в том числе за счет увеличения процента выхода годных, а также за счет более эффективного использования оборудования для прогонов и тренировки изделий.

Так, трудоемкость может быть снижена за счет анализа МАИК параметров – критериев качества на примере технологического прогона при производстве аппаратуры с безнакальным магнетроном. Как правило, время технологического прогона устанавливается практическим путем и составляет одинаковую величину для всех изготавливаемых изделий и не учитывает особенности и КТЗ каждого из них. При анализе изменений параметров – критериев качества возможно сокращение времени у отдельных изделий за счет непрерывного контроля с помощью МАИК, то есть в тех случаях, где происходит стабилизация и улучшение в более короткие интервалы времени, чем это предписано для усредненного технологического процесса, что свидетельствует о высоком КТЗ и оптимально установленных режимах функционирования.

При наличии условий и физического доступа к контрольным контактам, возможно применение МАИК в эксплуатации при промежуточном контроле изделий, хранящихся на складах, в том числе при постановке задачи продления срока службы.

Изложенный выше принцип является универсальным и подходит для любых типов магнетронов и других электровакуумных приборов. Исследование и анализ с помощью МАИК параметров – критериев качества магнетронов (в том числе безнакальных), комплексов «магнетрон – модулятор» в составе аппаратуры применения является приоритетной задачей прогнозирования надежности.

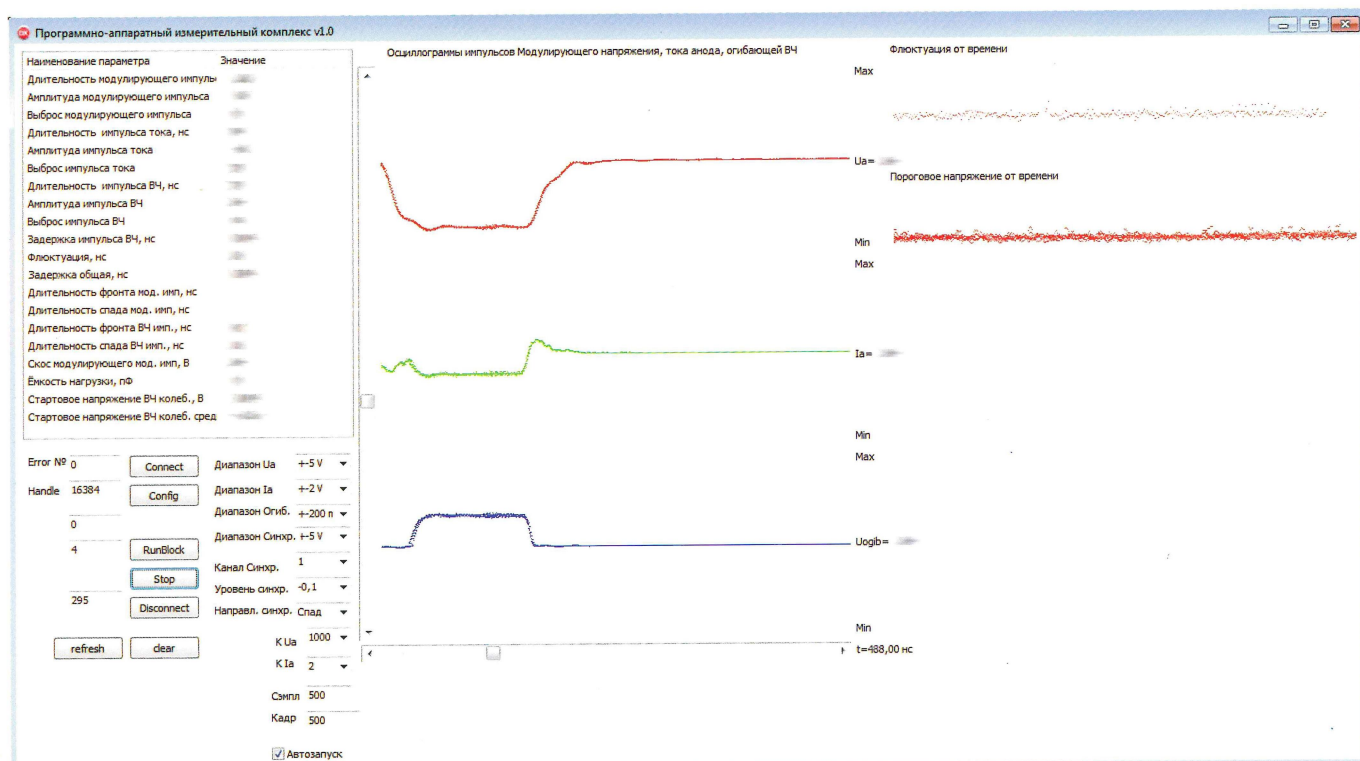


Рис. 3. Интерфейс программного обеспечения МАИК на примере работы безнакального магнетрона

Выполнение указанной задачи позволит выйти на качественно новый уровень в области организации контроля и оценки качества и надежности, позволит повысить эффективность используемых производственных мощностей, применяя их в первую очередь для изделий с наименьшим КТЗ (в рамках нормального технологического разброса).

Появляется возможность применения нового, адаптивного метода управления качеством на основании прогнозирования надежности и точечного увеличения КТЗ тех изделий и комплексов, где это необходимо в первую очередь. В АО «Плутон» указанный подход, в первую очередь, нужно использовать для безнакальных магнетронов. Это обусловлено уникальными свойствами функционирования наноструктурных элементов АЭК [5], обеспечивающих мгновенный запуск прибора, для чего необходима стабильная подача импульсного напряжения требуемого качества на всех этапах жизненного цикла изделия. Имеющийся разброс изделий по КТЗ позволит быстро оценить эффект от использования МАИК при их производстве в АО «Плутон» и у потребителя.

* * *

В процессе проведения работ создан мобильный автоматизированный измерительный комплекс, позволяющий на разных этапах производства проводить объективную инженерную экспресс-оценку качества и надежности изделий, осуществлять прогнозирование дальнейшей работоспособности на основе измерения электрических параметров изделия.

Основными задачами предстоящих исследований являются:

- поиск зависимостей, описывающих надежность комплексов «магнетрон – модулятор» от суперпозиции параметров – критериев качества и режимов функционирования;
- разработка математической модели надежности комплексов «магнетрон – модулятор»;
- разработка методов построения адаптивного технологического процесса в зависимости от конструктивно-технологических особенностей комплексов «магнетрон – модулятор» в рамках нормального технологического разброса;
- разработка и реализация автоматизированной технологии изготовления комплексов «магнетрон – модулятор» с применением средств инструментального контроля электрических параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мельников В. А., Платонов С. А., Ли И. П., Поляков Ю. В.** Некоторые особенности функционирования магнетронов с безнакальным запуском // Вакуумная наука и техника. Материалы XXVIII научно-технической конференции с участие зарубежных специалистов. С. 289–293.
2. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения.
3. **Мельников В. А., Платонов С. А., Ли И. П., Поляков Ю. В.** Особенности работы импульсных модуляторов с магнетронами с безнакальным запуском // Вакуумная наука и техника. Материалы XXVIII научно-технической конференции с участие зарубежных специалистов. С. 293–298.
4. ОСТ II 0354-86. Отраслевой стандарт. Магнетроны. Методы измерений электрических параметров.
5. **Ли И. П.** Наноструктуры в палладий-бариевых катодах СВЧ-приборов // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технологии, Бизнес. 2018. № 5. С. 144–151.
6. Патент США № 3.109.123. Кл. 315–39.63. Приоритет в США – 1962 г. Заявитель: Raytheon. Изобретатель: Persy L. Spencer.
7. **Поляков В. С., Ли И. П. и др.** Эмиссионные свойства прессованных металлосплавных палладий-бариевых катодов // Материалы XIX научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника». 2012. С. 210–212.
8. **Воген.** Газонаполненный магнетрон с холодным катодом // Сборник «Электронные СВЧ приборы со скрещенными полями». Т. 2 / Пер. под об. ред. Федорова М. М. М.: Иностранная литература, 1961. С. 268–279.
9. **Елинсон М. И., Васильев Г. Ф.** Автоэлектронная эмиссия. Государственное издательство физ.-мат. литературы. М., 1958. 272 с.
10. **Ли И. П. и др.** Прессованный металлосплавной палладий-бариевый катод для магнетронов с безнакальным запуском // Материалы XIX научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника». 2012. С. 213–216.
11. Симс. Предгенерационные явления в облаке пространственного заряда ниже основного порога колебаний // Сб. «Электронные СВЧ приборы со скрещенными полями». Т. 1 / Пер. под об. ред. Федорова М. М. М.: Иностранная литература, 1961. С. 157–180.
12. **Скрипкин Н. И., Гурко А. А., Марин В. П.** Механизм образования пространственного заряда в безнакальном магнетроне с автоэмиссионным запуском // Научные технологии. 2006. Т. 7. № 9. С. 38–41.
13. **Гурко А. А., Еремка П. Д., Науменко В. Д., Скрипкин Н. И.** О физических процессах при образовании пространственного заряда в безнакальном магнетроне с автоэмиссионным запуском // Радиофизика и электроника / Сб. научных трудов НАН Украины. Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова. Харьков, 2008. Т. 13. № 1.
14. **Гурко А. А., Скрипкин Н. И., Поляков Ю. В.** Развитие представлений о принципе работы катода в магнетроне с автоэмиссионным запуском // Материалы XV Научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника». Сочи. 2008 г.