

УДК 621.455-192

Т.Н. ЖУКОВА-БОЙКО, А.И. ОРАНСКИЙ, А.А. ТИТОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина

ПУТИ СОКРАЩЕНИЯ ОБЪЕМА ИСПЫТАНИЙ ГПВК НА НАДЕЖНОСТЬ В НОМИНАЛЬНОМ РАБОЧЕМ РЕЖИМЕ

Анализируются известные методы физической надежности и предложен ряд новых путей сокращения объема (времени) испытаний газоразрядных полых высокоэмиссионных катодов (ГПВК) на надежность в номинальном рабочем режиме. Показано, что большинство из рассмотренных методов ускоренных испытаний носит характер научно-обоснованных идей. Приводится перечень основных работ, необходимых для создания методики ускоренных испытаний ГПВК на надежность.

электроракетные двигатели, газоразрядные полые высокоэмиссионные катоды, физическая надежность, методы ускоренных испытаний на надежность

Введение

Рост энерговооруженности космических летательных аппаратов, увеличение сроков их активного существования, усложнение и расширение полетных программ неизбежно приводит к повышению требований к ресурсу и надежности электроракетных двигателей (ЭРД).

Эти повышенные требования к электроракетным двигателям в настоящее время не могут быть выполнены потому, что им не отвечают, прежде всего, катоды, которые входят в их состав, поскольку именно катоды в большинстве случаев определяют ресурс и надежность ЭРД.

Данная работа посвящена одному из направлений решения проблемы надежности катодов ЭРД - анализу путей сокращения объема их испытаний на надежность.

1. Формулирование проблемы. Цель работы

1.1. Характеристика проблемы надежности ЭРД. Сложность и ответственность задач, решаемых с помощью ЭРД, заставляет предъявлять к их надежности весьма высокие требования: задаваемые вероятности безотказной работы определяются ве-

личинами $P(\tau) = 0,9 \dots 0,999$ при значениях времени работы ЭРД $\tau = 10^3 \dots 10^4$ часов.

Для определения соответствия изделий таким высоким требованиям согласно представлениям, основанным на базе математической статистики, необходимы большие объемы испытаний: большие величины выборок и значительная продолжительность испытаний. При этом объемы выборок исчисляются десятками и сотнями образцов, а время испытаний может достигать такой продолжительности, что для ЭРД и их основных элементов подобные испытания становятся проблемой. При больших значениях заданного времени безотказной работы τ они очень дороги и не обеспечивают необходимой оперативности контроля надежности изделий, а при больших значениях вероятности безотказной работы не дают достаточной достоверности результатов контроля.

Таким образом, классическая вероятностная теория надежности для электроракетных двигателей является неприемлемой.

Сложность проблемы заключается еще и в том, что количество образцов большинства основных элементов электроракетных двигателей, в том числе и катоды, которые могут быть предъявлены на испытания, часто исчисляются единицами.

По-существу, в электроракетодвигателестроении при решении проблемы их надежности на основе сокращенного объема испытаний мы имеем дело с двумя неразрывно связанными в практическом отношении задачами: задачей сокращения времени испытаний (ускоренных испытаний) и задачей сокращения объема выборки.

1.2. Критерии отказов газоразрядных полых высокоэмиссионных катодов. С широким использованием в ЭРД перспективных газоразрядных полых высокоэмиссионных катодов (ГПВК) [1] наблюдается значительный прогресс в достижении требуемого ресурса и надежности.

В настоящее время наиболее перспективной с точки зрения энергозатрат и ресурса является схема ГПВК (рис. 1), обладающая следующими отличительными особенностями:

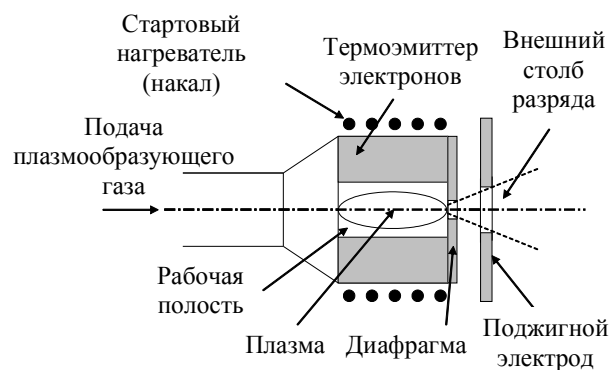


Рис. 1. Схема ГПВК

- расход плазмообразующего газа через рабочую полость с образованием положительного (по отношению к эмиссионной поверхности) столба плазмы, в результате чего снижается разрядное напряжение и улучшаются эмиссионные свойства поверхности, благодаря эффекту Шоттки в термоэлектронной эмиссии;

- наличие диафрагмы с отверстием, при котором требуемое давление плазмообразующего газа в рабочей полости достигается при меньшем его расходе;

- использование активирующих веществ (активаторов) либо эффективных термоэмиттеров для

улучшения эмиссионных свойств рабочей поверхности в результате снижения работы выхода электронов.

Отказы современных ГПВК с импрегнированными вольфрамо-бариевыми термоэмиттерами, непосредственно связанные с рабочими процессами, происходят в основном по двум причинам. Первой из них является уменьшение массы запасенного в термоэмиттере барий-содержащего активатора до минимального критического значения, при котором резко снижается его доставка к эмиттирующей поверхности рабочей полости катода [2]. Второй причиной является достижение диаметром выходного отверстия диафрагмы ГПВК некоторой предельной критической величины $d_{кр}$ [3].

1.3. Цель работы. Целью данной работы является анализ путей сокращения объема испытаний ГПВК ЭРД на надежность в номинальном рабочем режиме.

В качестве примера, критерием отказа ГПВК в данной работе выбран эрозионный износ выходного отверстия диафрагмы катода до некоторого критического значения диаметра $d_{кр}$.

2. Решение проблемы

2.1. Общие положения о методах ускоренных испытаний на надежность изделий, подверженных износным отказам, в номинальном рабочем режиме. Одним из распространенных методов ускоренных испытаний в номинальном режиме является метод прогнозирования ресурса изделия по результатам испытаний в течение времени t_u , меньшим ресурса. Этот метод обычно применяют в случае, когда полученные на предварительных испытаниях реализации случайного процесса $X(t, \varepsilon_0)$ могут быть аппроксимированы элементарной функцией, выбор которой проводят на основании анализа базовой информации.

Если изделие состоит из элемента или групп элементов, подверженных износу, то для ускорения

испытаний на долговечность изделия проводят испытание в номинальном режиме с размерами узлов изделия, измененными механическим, химическим или другим способом, соответствующими износу исследуемых узлов изделия за ресурс.

Этот же метод можно применить для получения базовой информации. Для этого изготавливают ряд узлов изделия, подверженных износу с различными геометрическими размерами, соответствующими предполагаемому износу конструкционных материалов в моменты времени t_1, \dots, t_L . Испытывают изделия в течение времени, необходимого для определения скоростей уноса материалов узлов. После проведения испытаний производят замеры изменений геометрических размеров и вычисляют скорость их изменений. Затем с помощью метода аппроксимации восстанавливается конкретный вид зависимости износа материалов изделия от времени его работы.

Для сокращения объема выборки могут быть использованы методы определения закона распределения на основе малого числа наблюдений [4, 5].

2.2. Методы ускоренных испытаний ГПВК на ресурс в номинальном режиме. Износостойкий отказ ГПВК связан в основном с постепенным увеличением диаметра отверстия (d) диафрагмы катода. Поэтому при наличии устойчивых базовых характеристик надежности и ресурса ГПВК, полученных в результате испытаний на долговечность конечной по объему выборки катодов в номинальном режиме работы, таких как $\mu_T(d) = f(t, \varepsilon_0)$ – математическое ожидание диаметра отверстия диафрагмы катода в интервале времени t_1, \dots, t_L ; $\mu_T(d_{кр}) = f(t, \varepsilon_0)$ – математическое ожидание критического диаметра отверстия, при котором произошел отказ катода; $\mu(T)$ – математическое ожидание ресурса катода, а также дисперсий этих величин, можно применить способ ускорения испытаний на долговечность катодов в номинальном режиме его работы, основанный на методах прогнозирования [6]. Суть метода заключается в следующем. Если зависимость диа-

метра отверстия диафрагмы катода от времени испытаний с хорошей степенью точности может быть аппроксимирована элементарной функцией, то по наблюдениям в течение времени, меньшем $\mu(T)$, можно представить параметры надежности катодов за период времени, равный ресурсу катодов. Использование этого метода возможно при очень точном методе измерения геометрических размеров отверстия диафрагмы и с минимальной амплитудой колебаний по току и напряжению разряда.

Более эффективный способ ускорения испытаний в номинальном режиме заключается в следующем. На основе базовых характеристик надежности изготавливают и испытывают выборку малого объема катодов с диаметрами отверстий, меньшими $\mu_T(d_{кр})$ на величину приработки отверстия плюс величину, соответствующую предполагаемому износу материала диафрагмы в течение 50...100 часов. По результатам испытаний вычисляют $\mu_T^Y(d_{кр})$. Если выполняется условие $\mu_T^Y(d_{кр}) \geq \mu_T(d_{кр})$, то контролируемая партия катодов удовлетворяет заданным параметрам надежности.

Использование этого способа ускорения испытаний на долговечность ГПВК позволяет получить высокие коэффициенты ускорения и допускает возможность применения совместно с любым форсированным видом испытаний.

При наличии нескольких базовых экспериментальных данных для оценки приближенной зависимости геометрии отверстия диафрагмы от времени наработки катода для получения необходимой предварительной информации о надежности катода в номинальном режиме его работы можно применить метод, основанный на испытании катодов в номинальном режиме.

Суть метода заключается в следующем. На номинальном режиме горения разряда испытываются несколько катодов с различными диаметрами отверстий диафрагмы.

1. Катод с номинальной геометрией отверстия испытывается в течение времени стабилизации расхода материала катода (времени приработки).

В процессе этого испытания производят периодические измерения изменений геометрии отверстия диафрагмы катода. После того, как скорость уноса материала катода стабилизировалась, испытание катода прекращают, измеряют геометрию отверстия диафрагмы и рассчитывают скорость изменения геометрических размеров диафрагмы $\left(V_u = \frac{\Delta d}{\Delta t} \right)$.

2. Исходя из гипотезы постоянной скорости износа материала катода прогнозируют геометрические размеры диафрагмы следующего катода, подлежащего испытанию, на период времени, равный предполагаемому ресурсу τ_1 , по формуле $d_2 = d_1 + V_1 \tau_1$. Изготавливают и проводят испытания в номинальном режиме катода с геометрией отверстия диафрагмы меньше расчетных на величину, равную приработке отверстия диафрагмы. После стабилизации расхода материала катода испытания продолжают столько времени, сколько необходимо для расчета скорости уноса материала катода (V_2). В процессе испытаний возможны три исхода. Если $V_2 < V_1$, производят уточнение ресурса катода τ , используя линейную зависимость скорости уноса материала от времени $V_2 = V_1 + a\tau_2$ и соответствующую ей зависимость геометрических размеров $d_2 = d_1 + V_1 \tau_2 + 0,5a\tau_2^2$. Затем, как и для случая $V_2 = V_1$, назначают следующий ресурс $\tau_3 > \tau_2$ и рассчитывают соответствующие геометрические размеры диафрагмы. Затем повторяют испытания до тех пор, пока $V_i > V_{i-1}$. В этом случае проводят испытания катода до его отказа и определяют критические размеры отверстия диафрагмы.

Для более точного восстановления зависимости износа геометрии отверстия диафрагмы катода от времени испытывают ряд катодов с геометрическими размерами отверстий, соответствующими пред-

полагаемому износу диафрагмы каждого катода за период $\Delta t \leq 1000$ часов. Тогда число испытываемых катодов в ряде равно предполагаемому ресурсу, деленному на период Δt . Затем по замеренным изменениям геометрических размеров отверстий и расходам материала диафрагм с помощью одного из методов аппроксимации восстанавливается конкретный вид зависимости износа диафрагмы катода от длительности его работы. Недостатком этого метода является необходимость учета изменения диаметра отверстия диафрагмы за время приработки отверстия, которое возникает за счет наличия шероховатостей микротрещин и других дефектов механической обработки отверстий.

Итак, будем считать, что для применения одного или комбинации из нескольких методов ускоренных испытаний ГПВК получена необходимая предварительная информация в процессе износа отверстия диафрагмы катода в номинальном режиме в виде зависимости диаметра отверстия от времени наработки, а также соответствующие математические ожидания измеренных величин и дисперсии.

2.3. Перечень основных работ необходимых для создания методики укороченных испытаний ГПВК на надежность.

1. Провести испытания нескольких катодов в номинальном режиме до отказа катодов с целью выяснения закономерности износа диафрагмы от времени работы, для чего в процессе испытаний необходимо проводить соответствующие измерения с максимальной точностью.

2. На основе информации, полученной с помощью обработки предыдущего эксперимента, выбрать ряд ГПВК с диаметрами выходных отверстий от начального до критического. Изготовить необходимое число катодов каждого диаметра. Провести испытание каждого катода в течение времени приработки отверстия диафрагмы и времени, необходимого для расчета либо измерения скорости изменения размеров отверстия.

3. На основе полученных экспериментальных данных рассчитать параметры надежности ГПВК в номинальном режиме. В результате соответствующей математической обработки получить базовые характеристики надежности и ресурса ГПВК.

Заключение

Большинство из рассмотренных в данной работе методов сокращения объема (времени) испытаний ГПВК на надежность носит характер научно-обоснованных идей. Для доведения предложенных методов до законченных технических решений в виде методик ускоренных испытаний или экспресс-анализа ресурса необходимо выполнить большую работу (см. п.п. 2.3).

Имеющихся экспериментальных данных по надежности и ресурсным характеристикам ГПВК совершенно недостаточно для создания методик их ускоренных испытаний. Прежде всего, необходимы базовые статистические характеристики изменения во времени основных параметров катодов (электрических, геометрических, температурных, массовых и др.) до достижения отказа (до полной выработки ресурса) при работе в номинальном режиме.

Литература

1. Оранский А.И. Перспективные катоды электроракетных двигателей // *Авіаційно-космічна*

техніка і технологія: Зб. наук. праць. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т “Харк. авіац. ін-т”. – 2002. – Вип. 31. Двигуни та энергоустановки. – С. 257-259.

2. Timothy R. Sarver-Verhey. 28000 hour Xenon Hollow Cathode Life Test Results. IEPС Paper 97-168; To be presented at the 25th IEPС // *NASA/CR-97-206231*, November, 1997. – 8 p.

3. Захарченко А.В., Нестеренко С.Ю., Оранский А.И. Прогнозирование ресурсных характеристик полых катодов // *Авиационно-космическая техника и технология: Труды Харьк. авиаци. ин-та им. Н.Е.Жуковского* (1996). – Х.: ХАИ, 1997. – С. 239-244.

4. Чавчанидзе В.В., Кумсишвили В.А. Об определении законов распределения на основе малого числа наблюдений // *Применение вычислительной техники для автоматизации производства: Сб. тр.* – М.: Машгиз, 1961. – С. 187-194.

5. Хеттманспергер Т. Статистические выводы, основанные на рангах. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 334 с.

6. Перроте А.И., Карташов Г.Д., Цветаев К.Н. Основы ускоренных испытаний радиоэлементов на надежность. – М.: Сов. радио, 1968. – 224 с.

Поступила в редакцию 24.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.И. Костюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.