

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ АВТОМАТИЧЕСКИХ МАСС-СПЕКТРОМЕТРОВ

В. А. Михайлов, Ю. С. Никулин

Сумы

Структурную схему безотказности автоматического масс-спектрометра можно представить в виде последовательно соединенных в смысле надежности измерительной и вакуумной систем. Надежность измерительной системы легко рассчитать, используя экспоненциальный закон и справочники по интенсивностям отказов элементов. Инженерных методов расчета надежности вакуумных систем в настоящее время не существует. Подавляющее большинство элементов и устройств вакуумной системы проектируется для каждого прибора индивидуально и выпускается в ограниченном количестве. Разнообразие конструкций и рабочих режимов ограниченный выпуск и высокая стоимость элементов не позволяют экспериментально определять законы распределения их времени жизни. Создание инженерной методики расчета надежности вакуумной системы упростится, если вид распределения принимать теоретически. Постоянные распределения можно рассчитать с использованием ограниченной статистики, которую легко получить при макетировании.

Физика отказов подогревателей вакуумной системы такая же, как у проволочных резисторов, физика отказов датчиков измерения вакуума аналогична физике отказов маломощных радиоламп. Отказы вакуумных уплотнений и трубок происходят очень редко и в основном из-за скрытых дефектов. На основании всего сказанного можно утверждать, что для этих элементов справедлив экспоненциальный закон надежности. Механические и диффузионные вакуумные насосы, вакуумные вентили и электромагнитные клапаны отказывают в основном в результате износа и старения, реже — в результате грубых поломок. Практика испытаний различных устройств показывает, что износные отказы хорошо описываются нормальным законом, хотя в отдельных случаях лучшее приближение дают другие виды распределений [1]. Учитывая большое разнообразие устройств и материалов, применяемых при конструировании вакуумной системы, целесообразно считать, что внезапные отказы описываются экспоненциальным распределением, а износные — нормальным.

Надежность прибора до первого отказа

Надежность любого элемента до первого отказа полностью характеризуется функцией надежности $P(t)$, которая равна вероятности безот-

казной работы элемента в течение времени t . В случае нормального закона функция надежности элемента

$$P(t) = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{t-T_0}{\sigma}}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{T_0}{\sigma}}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx},$$

где T_0 — среднее время жизни элемента;

σ — среднее квадратическое отклонение времени жизни элемента.

При хорошо отработанной технологии изготовления обычно $T_0 \gg \sigma$ и вероятность безотказной работы элемента выражается через нормированную функцию Лапласа

$$P(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{T_0 - t}{\sigma}\right).$$

В случае экспоненциального закона функция надежности элемента

$$P(t) = \exp[-\lambda t],$$

где λ — интенсивность отказов.

Функцию надежности любого сложного устройства вакуумной системы определяем через функции надежности его элементов, для чего достаточно составить структурную схему безотказности устройства и знать физику отказов, вошедших в нее элементов. Выразим функцию надежности вакуумного вентиля через функции надежности сильфона $P_c(t)$, запорного органа $P_z(t)$ и условного элемента $P_u(t)$, характеризующего грубые поломки. Отказы сильфона и запорного органа носят износостойкий характер. Так как отказ любого из них приводит к отказу вентиля в целом, функция надежности его

$$P(t) = P_u(t) P_c(t) P_z(t) = \\ = e^{-\lambda t} \left[0,5 + \Phi\left(\frac{T_{0,c} - t}{\sigma_c}\right) \right] \left[0,5 + \Phi\left(\frac{T_{0,z} - t}{\sigma_z}\right) \right],$$

где λ — интенсивность грубых поломок вентиля;

$T_{0,c}$ — среднее время жизни сильфона;

σ_c — среднее квадратическое отклонение времени жизни сильфона;

$T_{0,z}$ — среднее время жизни запорного органа;

σ_z — среднее квадратическое отклонение времени жизни запорного органа.

Если известны средняя циклопрочность N_0 элемента и ее среднее квадратическое отклонение σ_N , а также число циклов его срабатывания в единицу времени g , определяем среднее время жизни элемента и его среднее квадратическое отклонение

$$T_0 = \frac{N_0}{g}, \quad \sigma = \frac{\sigma_N}{g}.$$

Средняя циклопрочность сильфонов зависит от величины рабочего хода, рабочего давления и находится по номограммам, приводимым в нормальных на сильфоны. Сославшись на опыт различных организаций, можно считать, что среднее квадратическое отклонение циклопрочности

$$\sigma_N = 0,2 \div 0,3 N_0.$$

Аналогичным способом получаем выражение для функции надежности вакуумных откачных устройств

$$P(t) = P_v(t) P_{ж}(t) = e^{-\lambda t} \left[0,5 + \Phi \left(\frac{T_{о.ж} - t}{\sigma_{ж}} \right) \right],$$

где $P_v(t)$ — вероятность отсутствия грубых поломок в течение времени t
 $P_{ж}(t)$ — вероятность безотказной работы рабочей жидкости насоса в течение времени t ;

λ — интенсивность грубых поломок;

$T_{о.ж}$ — среднее время жизни рабочей жидкости;

$\sigma_{ж}$ — среднеквадратическое отклонение времени жизни рабочей жидкости.

При расчете вероятности безотказной работы вакуумного механического насоса интенсивность грубых поломок находим суммированием интенсивности отказов электродвигателя λ_d и интенсивности грубых поломок насоса λ_n , т. е.

$$\lambda = \lambda_n + \lambda_d.$$

Для паромасляных насосов эта величина определяется в основном интенсивностью отказов пелчки.

Если прибор можно представить в виде n последовательно соединенных в смысле надежности элементов,

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t),$$

где $P_i(t)$ — вероятность безотказной работы i -го элемента за время t .

Чтобы получить удобную для практического пользования формулу среднего времени до первого отказа прибора $T_{ср.}$, заменим k элементов системы, отказы которых описываются экспоненциальным законом, одним условным с интенсивностью отказов

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^k \lambda_i.$$

Оставшиеся l элементов, отказы которых описываются нормальным законом, можно также заменить одним условным. Результирующее распределение для этих элементов нормальное с параметрами T_0 и σ , близкими к параметрам самого ненадежного элемента [2, 3].

При таком представлении структурной схемы безотказности прибора воспользовавшись зависимостью

$$T_{ср.} = \int_0^{\infty} P_c(t) dt,$$

после ряда преобразований получим

$$T_{ср.} = \frac{1}{\lambda_c} \left[1 - \frac{0,5 - \Phi \left(\frac{\lambda_c \sigma^2 - T_0}{\sigma} \right)}{0,5 + \Phi \left(\frac{T_0}{\sigma} \right)} e^{\frac{\lambda_c^2 \sigma^2}{2} - \lambda_c T_0} \right].$$

Если же $\sigma \ll T_0$, а T_0 и $\frac{1}{\lambda_c}$ одного порядка,

$$T_{ср.} \approx \frac{1}{\lambda_c} \left(1 - e^{\frac{\lambda_c^2 \sigma^2}{2} - \lambda_c T_0} \right).$$

Подобный результат при таких же допущениях был получен в работе [4].

Надежность прибора с учетом восстановлений

При исследовании надежности прибора с учетом восстановлений бывает, что его наработка в течение срока службы соизмерима со средним временем жизни большинства элементов вакуумной системы.

В этом случае принимаемое обычно при расчете радиоэлектронных и автоматических систем допущение, что поток отказов простейший с параметром

$$\lambda_c(t) = \lambda_c + \sum_{j=1}^l \frac{1}{T_{oj}} = \text{const}$$

может привести к значительным ошибкам. При достаточно общих допущениях поток отказов автоматического масс-спектрометра по крайней мере приближенно простейший нестационарный [4], когда для расчета надежности прибора достаточно иметь функцию среднего числа отказов его $m_{\text{ср.с}}(t)$.

Вероятность безотказной работы системы в интервале $(t, t + \tau)$

$$P(t, t + \tau) \approx \exp[m_{\text{ср.с}}(t) - m_{\text{ср.с}}(t + \tau)].$$

Средняя наработка на один отказ в интервале (t_1, t_2)

$$T_{\text{ср.с}}(t_1, t_2) = \frac{t_2 - t_1}{m_{\text{ср.с}}(t_2) - m_{\text{ср.с}}(t_1)}.$$

Если учесть, что при экспоненциальном законе среднее число отказов элемента

$$m_{\text{ср}}(t) = \lambda t,$$

а при нормальном

$$m_{\text{ср}}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi\left(\frac{t - nT_{oj}}{\sigma_j \sqrt{n}}\right),$$

среднее число отказов прибора

$$m_{\text{ср.с}}(t) = \lambda_c t + \sum_{j=1}^l \sum_{n=1}^{\infty} \Phi\left(\frac{t - nT_{oj}}{\sigma_j \sqrt{n}}\right).$$

Представим среднее число отказов прибора в виде суммы

$$m_{\text{ср.с}}(t) = m_{\text{ср.э}}(t) + m_{\text{ср.в}}(t),$$

где $m_{\text{ср.э}}(t)$, $m_{\text{ср.в}}(t)$ — соответственно среднее число отказов электронной и вакуумной систем прибора за время t .

Среднее число отказов электронной системы прибора за время t .

$$m_{\text{ср.э}}(t) = \lambda_s t,$$

где λ_s — интенсивность отказов электронной системы.

Если вакуумная система состоит из r устройств, соединенных в смысле надежности последовательно, среднее число ее отказов за время t

$$m_{\text{ср.в}}(t) = \sum_{i=1}^r m_{\text{ср.и}}(t),$$

где $m_{\text{ср.и}}(t)$ — среднее число отказов i -го устройства за время t .

Выражения среднего числа отказов отдельных устройств составляются на основании их структурных схем безотказности. При этом необходимо учесть, что для подогревателей вакуумной системы, печек диффузионных насосов опасен не сам факт отказа, а его продолжительность. Если за время t среднее число отказов такого элемента равно $m_{\text{ср}}(t)$, то с учетом вероятности его восстановления $v(\tau_d)$ за допустимое время τ_d среднее число аварийных отказов

$$m_{\text{ср}}(t, v) = m_{\text{ср}}(t) [1 - v(\tau_d)].$$

Для указанных выше элементов характерно относительно малое количество восстановлений за малые и большие промежутки τ ; чаще всего их восстановление происходит за время, близкое к среднему времени восстановления T_v . В работе [2] показано, что при аналогичных условиях время восстановления распределяется по закону Эрланга и вероятность восстановления элемента за время, меньшее τ_d , определяется выражением

$$v(\tau_d) = 1 - (1 + 2\beta) e^{-2\beta},$$

где

$$\beta = \frac{\tau_d}{T_v}.$$

Среднее число отказов диффузионного и механического вакуумных насосов

$$m_{\text{ср}}(t) = t\lambda + \sum_{n=1}^{\infty} \Phi\left(\frac{t - nT_{\text{ож}}}{\sigma_{\text{ж}} \sqrt{n}}\right)$$

при прежних обозначениях.

Если конструктивно предусматривается восстановление печки диффузионного насоса за время, не большее допустимого,

$$m_{\text{ср}}(t, v) = t\lambda (1 + 2\beta) e^{-2\beta} + \sum_{n=1}^{\infty} \Phi\left(\frac{t - nT_{\text{ож}}}{\sigma_{\text{ж}} \sqrt{n}}\right).$$

Среднее число отказов подогревателя вакуумной системы

$$m_{\text{ср}}(t) = \lambda t.$$

Если конструктивно предусматривается замена подогревателя за время, не большее допустимого,

$$m_{\text{ср}}(t, v) = \lambda t (1 + 2\beta) e^{-2\beta}.$$

Среднее число отказов вакуумного вентиля

$$m_{\text{ср}}(t) = \lambda t + \sum_{n=1}^{\infty} \Phi\left(\frac{t - nT_{\text{о.с}}}{\sigma_{\text{с}} \sqrt{n}}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} \Phi\left(\frac{t - nT_{\text{о.з}}}{\sigma_{\text{з}} \sqrt{n}}\right).$$

В практике вместо громоздкой формулы для среднего числа отказов элемента в случае нормального закона очень удобно пользоваться формулой [4]

$$F(t) \leq m_{\text{ср}}(t) \leq \frac{F(t)}{1 - F(t)},$$

где $F(t)$ — функция распределения времени жизни элемента.

Для нормального закона эта функция, выраженная через нормированную функцию Лапласа, имеет вид

$$F(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{t - T_0}{\sigma}\right).$$

При $t < T_0$ и $T_0 \gg \sigma$ обычно $F(t) \ll 1$ и $m_{cp}(t) \approx F(t)$.

По предлагаемой методике рассчитана надежность вакуумной системы автоматических масс-спектрометров МХ-1211, МХ-1212 при условии, что в течение гарантированного срока они наработывают по 5000 ч.

При расчете использовались данные, приведенные в табл. 1 и 2. Полученное значение средней наработки на один отказ $T_{срз} = 2660$ ч хорошо согласуется с эксплуатационными данными. Опытное значение этой величины 3250 ч. С доверительной вероятностью 0,9 нижняя граница для истинного значения $T_{срз}$ — 1850 ч, верхняя — 7450 ч. Расчет надежности при допущении, что поток отказов простейший с параметром

$$\Lambda = \lambda_c + \sum_{j=1}^i \frac{1}{T_{oj}}$$

определил значение $T_{срз} = 1560$ ч.

Таблица 1

Элемент вакуумной системы	Интенсивность отказов $\times 10^5$ 1/ч
Вакуумные уплотнения	0,087
Подогреватели вакуумной системы	1,0
Печка диффузионного насоса Н1С2	44
Печка диффузионного насоса Н1С2 при потребляемой мощности, равной 0,8 Р _н	9,35
Грубые поломки механического вакуумного насоса ВП-461М	3,9

Таблица 2

Тип вакуумного масла в насосе	$T_{0ж}$, ч	$\sigma_{ж}$, ч
Масло ВМ-1 в насосе Н1С2	2 280	760
Масло ВМ-4 в насосе ВП-461М	8 500	2700
Масло ПФМС-2 в насосе Н1С2	10 700	2100

Область применения экспоненциального закона при расчете надежности прибора

Область применения экспоненциального закона при расчете надежности автоматического масс-спектрометра до первого отказа может быть определена из условия, характеризующего допустимую степень влияния износовых отказов. В работе [5] таким условием является предположение, что износовые отказы начинают проявляться с момента t , которому соответствует минимум функции плотности распределения времени безотказной работы прибора $f_c(t)$. Для системы, состоящей из двух последовательно соединенных в смысле надежности элементов, отказы одного из которых описываются экспоненциальным законом, а второго нормальным, степень влияния износовых отказов в момент t оценивается отношением

$$\theta(t) = \frac{\lambda_2(t)}{\lambda_1(t) + \lambda_2(t)},$$

где $\lambda_1(t)$, $\lambda_2(t)$ — соответственно интенсивность внезапных и износных отказов в момент t .

При ранее сделанных допущениях интенсивность отказов прибора

$$\lambda_c(t) = \sum_{i=1}^k \lambda_i + \sum_{j=1}^l \lambda_j(t),$$

где $\sum_{i=1}^k \lambda_i$, $\sum_{j=1}^l \lambda_j(t)$ — соответственно значения интенсивностей внезапных и износных отказов в момент времени t .

Отсюда степень влияния износных отказов в момент времени t

$$\theta(t) = \frac{\sum_{j=1}^l \lambda_j(t)}{\sum_{i=1}^k \lambda_i(t) + \sum_{j=1}^l \lambda_j(t)}.$$

При $\theta(t) \ll 1$ износными отказами можно пренебречь, так как в этом случае

$$\lambda_c(t) \approx \sum_{i=1}^k \lambda_i = \lambda_c.$$

Таким образом, для определения области применения экспоненциального закона при расчете надежности прибора до первого отказа нет необходимости находить параметры результирующего нормального распределения. Этим методом можно пользоваться и для определения начального интервала эксплуатации, на котором время между соседними отказами прибора распределено по экспоненциальному закону, а параметр потока отказов

$$\Lambda_c(t) = \lambda_c = \text{const.}$$

Известно, что на интервалах эксплуатации, где время между соседними отказами распределено по экспоненциальному закону, параметр потока отказов $\Lambda_c(t) = \text{const.}$ Если учесть, что

$$\Lambda_c(t) = \frac{dm_{\text{ср.с}}(t)}{dt},$$

на этих участках $m_{\text{ср.с}}(t)$ является линейной функцией с коэффициентом при t , равным параметру потока.

Таким образом, определение области применения экспоненциального закона при расчете надежности прибора с учетом восстановлений сводится к выделению на графиках $m_{\text{ср.с}}(t)$, $m_{\text{ср.с}}(t, v)$ интервалов, где эти зависимости практически линейны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Шишонов, В. Ф. Репкин, Л. Л. Барвинский. Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники. Изд-во «Советское радио», 1962.
2. Я. Б. Шор. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. Изд-во «Советское радио», 1962.
3. Г. Л. Глузман и И. П. Падерно. Надежность установок и систем управления. Изд-во «Машиностроение», 1966.
4. Б. В. Гнеденко, Ю. К. Беляев, А. Д. Соловьев. Математические методы в теории надежности. Изд-во «Наука», 1965.
5. Л. П. Леонтьев. Область применения экспоненциального закона при определении надежности. Изв. АН Латвийской ССР, № 12/173, 1961.