ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ АВТОМАТИЧЕСКИХ МАСС-СПЕКТРОМЕТРОВ

Ю. С. Никулин

Сумы

Автоматический масс-спектрометр является весьма перспективным газоанализатором для непрерывного контроля состава сложных газовых смесей и регулирования ряда технологических процессов в химической промышленности. Надежность — важнейшая характеристика приборов данного типа, так как их отказ в процессе эксплуатации может привести к значительным материальным потерям, а в отдельных случаях даже к авариям.

Однако надежность автоматических масс-спектрометров изучена еще слабо, что в значительной степени препятствует широкому внедрению их в промышленность.

В связи с этим определенный интерес представляют изученные нами эксплуатационные характеристики надежности освоенных советской промышленностью автоматических масс-спектрометров МХ-1201, МХ-1211, МХ-1212. Данные об отказе снятых с производства приборов МХ-1201 были получены при изучении записей в двух операторных журналах цеховой лаборатории. В них описывается работа группы масс-спектрометров в реальных условиях эксплуатации на двух отстоящих один от другого интервалах времени. В первом журнале у трех приборов при суммарной наработке $t_{p_1} = 2157$ число зафиксированных отказов $k_1 = 15$. По данным второго журнала, у четырех приборов, при суммарной наработке $t_{p_2} = 2373$, число $k_2 = 17$.

Для объединения полученных данных необходимо прежде всего определить их принадлежность к установившемуся периоду эксплуатации [1], когда параметр потока отказов $\Lambda = \text{const}$. Если два опыта отвечают одной и той же величине наработки на отказ T_0, то справедливо приближенное равенство:

$$T_0 \cong \frac{t_{p_1} + t_{p_2}}{k_1 + k_2}.$$

Рассмотрим разность опытных потоков отказов

$$\Delta = \Lambda_1 - \Lambda_2 = \frac{k_1}{t_{p_1}} - \frac{k_2}{t_{p_2}}.$$

Приближенно распределение величины Δ можно считать нормальным с математическим ожиданием $M(\Delta) = 0$ и дисперсией

$$\sigma^2(\Delta) = \frac{1}{t_{p_1}^2}\sigma^2(k_1) + \frac{1}{t_{p_2}^2}\sigma^2(k_2).$$

При $\Lambda = \text{const}$ случайная величина k имеет распределение Пуассона, у которого дисперсия равна математическому ожиданию $\sigma^2(k) = \frac{t_p}{T_0}$, поэтому окончательно имеем

$$\sigma^2(\Delta) = \frac{k_1 + k_2}{t_{p_1} t_{p_2}}.$$

При нормальном распределении Δ для любой заданной величины ε

$$p_\varepsilon = B_{ep}(|\Delta| > \varepsilon) = 1 - \Phi\left[\frac{\varepsilon}{\sigma(\Delta)}\right],$$

где $\Phi\left[\frac{\varepsilon}{\sigma(\Delta)}\right]$ — табулированная функция Лапласа. Это выражение определяет вероятность расхождения опытных значений Λ_1 и Λ_2 при отсутствии неслучайных факторов в рассматриваемых нами двух опытах.

В нашем случае $\Delta = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma^2(\Delta) = 6{,}3 \cdot 10^{-6}$. Полагая $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-4}$, имеем $p_\varepsilon = 0{,}936$. Полученное большое значение вероятности позволяет объединить данные об отказах приборов МХ-1201, содержащиеся в двух журналах.

Таблица 1

Характеристика приборов	МХ-1201	МХ-1211	МХ-1212
Количество приборов, шт.	7	1	1
Суммарная наработка, ч	4530	5882	4824
Суммарное время восстановления, ч	454	34	32,5
Количество зафиксированных отказов, шт.	32	26	11
Количество учитываемых отказов, шт.	32	13	8

Новые автоматические масс-спектрометры МХ-1211, МХ-1212 по своему назначению аналогичны прибору МХ-1201. Опытные образцы этих приборов в течение года испытывались на надежность в реальных условиях эксплуатации. В процессе испытаний получен ценный статистический материал, позволивший улучшить их надежность.

В табл. 1 даны лишь сведения об отказах, которые были использованы при определении основных количественных характеристик надежности автоматических масс-спектрометров МХ-1201, МХ-1211, МХ-1212. Опытные значения наработок на отказ и среднего времени восстановления приборов определялись по формулам

$$T_0 = \frac{t_p}{k};$$

$$T_в = \frac{t_в}{k};$$

где t_p — суммарная наработка прибора;

$t_в$ — суммарное время восстановления прибора;

k — количество зафиксированных отказов.

Доверительные границы, в которых находятся истинные величины наработок на отказ $T_{0,ф}$ и среднего времени восстановления $T_{в.ф}$, определялись по формулам

$$\frac{2t_p}{\chi^2_{\frac{\alpha}{2}}(2k)} < T_{0.ф} < \frac{2t_p}{\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}}(2k)};$$

$$\frac{2t_в}{x^2_{\frac{\alpha}{2}}(2k)} < T_{в.ср} < \frac{2t_в}{x^2_{1-\frac{\alpha}{2}}(2k)},$$

где $x^2_{\frac{\alpha}{2}}(2k)$, $x^2_{1-\frac{\alpha}{2}}(2k)$ — величины, устанавливаемые по таблицам;

x^2 — распределения для доверительной вероятности $1-\alpha$ при числе степеней свободы $f=2k$. Величина доверительной вероятности принята равной 0,9.

Техническую наработку на отказ мы определяли делением суммарной наработки на число учитываемых отказов. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристика приборов	МХ-1201	МХ-1211	МХ-1212
1. Эксплуатационная наработка на отказ, ч			
а) опытное значение	142	226	438
б) верхняя доверительная граница	197	325	780
в) нижняя доверительная граница	113	168	283
2. Техническая наработка на отказ, ч:			
а) опытное значение	—	452	603
б) верхняя доверительная граница	—	763	1210
в) нижняя доверительная граница	—	304	367
3. Среднее время восстановления, ч., *мин*:			
а) опытное значение	14 ч 30 *мин*	2 ч 36 *мин*	4 ч
б) верхняя доверительная граница	18 ч 42 *мин*	4 ч 22 *мин*	8 ч
в) нижняя доверительная граница, ч	11 ч 18 *мин*	1 ч 44 *мин*	2 ч 23 *мин*

Характер сведений об отказах не позволяет точно установить основные причины низкой надежности приборов МХ-1201, однако полученные значения наработки на отказ и среднего времени восстановления дают возможность показать, почему эти приборы не нашли применения в промышленности.

Рассмотрим масс-спектрометрическую систему управления, состоящую из четырех рабочих приборов и двух резервных. Так как время пуска автоматического масс-спектрометра равно трем часам, резервные приборы должны находиться во включенном состоянии. Отказавшие приборы восстанавливаются обслуживающим персоналом. В этом случае работа системы из n рабочих и m резервных приборов описывается марковским случайным процессом с конечным числом состояний s_0, s_1, ... s_{m+1}, ..., характеризующихся отказом 0,1, ..., $m+1$ приборов соответственно. При отказе любых $m+1$ приборов происходит отказ системы. Наработка системы до первого отказа в этом случае определяется выражением [2].

$$T_{о.с} = -\int_0^\infty t\frac{d}{dt}[1-p_{m+1}(t)]\,dt,$$

где p_{m+1} — вероятность нахождения системы в состоянии s_{m+1}.

Если $a=\frac{T_в}{T_0}$ является малой величиной, для определения наработки до первого отказа можно пользоваться приближенной формулой

$$T_{о.с} \approx T_0\frac{(n-1)!r!r^{m-r}}{(n+m)!a^m},$$

где r — число пунктов восстановления. В нашем случае $r = 1$. Относительная погрешность данной формулы имеет порядок величины

$$a\left(n + m + \frac{n}{r}\right).$$

Учитывая большую величину относительной погрешности, для определения наработки до первого отказа системы с приборами типа МХ-1201 воспользуемся точным выражением [3]

$$T_{о.с} = T_0 \frac{1 + 2(n+1)a + (2 + 6n + 3n^2)a^2}{n(n+1)(n+2)a^2} =$$

$$= 142 \frac{1 + 2 + 5 \cdot 0{,}1 + (2 + 6 \cdot 4 + 3 \cdot 16) \cdot 0{,}01}{4 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 0{,}01} = 324 \text{ ч}.$$

Естественно, что для управления непрерывным технологическим процессом такая система непригодна.

Для подобной по структуре системы, но на базе приборов МХ-1211, при определении ее наработки до первого отказа можно воспользоваться приближенной формулой. При качественном техническом обслуживании она составляет

$$T_{о.с} \approx 405 \frac{3!}{6!0{,}0061^2} \approx 90\,000 \text{ ч}.$$

При достигнутом для автоматических масс-спектрометров МХ-1211, МХ-1212 уровне надежности открываются большие перспективы внедрения их в химической промышленности.

В процессе разработки приборов МХ-1211, МХ-1212 увеличение наработки на отказ было достигнуто благодаря применению более надежных элементов и облегчению их режимов. Резервирование, за исключением катода источника ионов, не применялось. Уменьшение среднего времени восстановления было достигнуто в основном за счет улучшения доступа к элементам.

Специфической особенностью автоматических масс-спектрометров является наличие у них сложных по структуре вакуумных систем, надежность которых в достаточной степени не исследована. Отсутствие инженерных методов расчета надежности данных систем делает невозможным расчет ожидаемой надежности прибора в целом, поэтому для вновь разрабатываемых автоматических масс-спектрометров она может быть определена лишь после изготовления опытного образца и проведения специальных испытаний. Если в процессе разработки требуемый уровень надежности не обеспечен, значительные материальные потери неизбежны.

Наряду с этим совсем не исследованы вопросы технического обслуживания приборов и создаваемых на их базе систем управления и контроля, не установлены научно обоснованные критерии и уровни надежности, учитывающие специфику применения автоматических масс-спектрометров.

Успешное решение указанных проблем повысит качество разработок и обеспечит требуемый уровень надежности приборов на стадии проектирования. Актуальность этих работ обусловлена значительным экономическим эффектом, который может быть получен благодаря широкому применению автоматических масс-спектрометров в химической промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Шор. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. Изд-во «Советское радио», 1962.

2. Л. Г. Глузман и И. П. Падерно. Надежность установок и систем управления. Изд-во «Машиностроение», 1966.

3. Б. Козлов, И. Ушаков. Справочник по расчету надежности. Изд-во «Советское радио», 1966.