

О ТЕХНИЧЕСКОМ ОБСЛУЖИВАНИИ АВТОМАТИЧЕСКИХ МАСС-СПЕКТРОМЕТРОВ СТАТИЧЕСКОГО ТИПА

Ю. С. Никулин

С у м ы

Техническое обслуживание автоматических масс-спектрометров включает в себя заливку жидкого азота в ловушки, смену эталонного газа, контроль исправного состояния, профилактическое восстановление, ремонт отказавших приборов. Однако техническому обслуживанию этих приборов не уделяется должного внимания, чем в значительной степени объясняется их относительно низкая эксплуатационная надежность. Анализ эксплуатационных данных приборов МХ-1201, МХ-1211, МХ-1212 показал, что около 40% их отказов вызвано неправильными действиями обслуживающего персонала. Среднее время восстановления приборов неоправданно велико и в большой степени зависит от квалификации операторов, причем основная доля его затрачивается на поиск отказавшего элемента. Недопустимо велико время простоя приборов на восстановлении из-за недостаточности ЗИП. Большинство химических производств, где масс-спектрометры используются в качестве автоматических газоанализаторов, непрерывны, величина же экономического эффекта от их применения прямо пропорциональна времени исправной работы прибора.

Одним из основных требований, предъявляемых к автоматическим масс-спектрометрам, является высокое значение коэффициента технического использования, который представляет собой отношение суммарного времени исправной работы прибора к общему времени работы и вынужденных простоев за один и тот же календарный срок:

$$K_{\text{и}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^n t_{\text{п}}}, \quad (1)$$

где t_i — время исправной работы между $(i-1)$ -ой и i -ой остановками;
 $t_{\text{п}}$ — время вынужденного простоя после i -ой остановки;
 n — общее число отключений прибора.

При непрерывном режиме эксплуатации прибора в течение времени $T_{\text{э}}$ коэффициент технического использования

$$K_{\text{и}} = \frac{T_{\text{э}} - \sum_{i=1}^n t_{\text{п}}}{T_{\text{э}}} = \frac{T_{\text{э}} - T_{\text{п}}}{T_{\text{э}}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{п}}$ — суммарное время вынужденных простоев за рассматриваемый период.

Автоматические масс-спектрометры обычно обслуживают операторы, не имеющие специального технического образования, вследствие чего очень велико влияние дестабилизирующих субъективных и организационных факторов на величину коэффициента технического использования прибора. Это влияние может быть значительно ослаблено достаточно полной регламентацией основных видов технического обслуживания, что вполне осуществимо при наличии статистических данных об отказах автоматического масс-спектрометра в процессе эксплуатации. Применение встроенных систем контроля исправного состояния, оптимизация программы поиска отказов, достаточность ЗИП позволят резко сократить простои приборов на восстановлении. Эти вопросы хорошо освещены в многочисленной литературе по надежности [1, 2, 3, 4].

Благодаря автоматической калибровке, масс-спектрометр измеряет концентрации технологической смеси периодически. Паузы между измерениями определяются продолжительностью калибровки. Например, в приборе МХ-1211 продолжительность калибровки длится от 2 до 14 мин.

В силу такой специфической особенности автоматические масс-спектрометры статического типа обычно применяются для определения концентрации инерционных производственных процессов, для которых опасно не само выключение прибора, а его продолжительность. Для каждого конкретного процесса имеется некоторое допустимое время простоя τ_d , обусловленное его инерционностью, которое по величине в несколько раз больше продолжительности калибровки.

Если за время эксплуатации произойдет k отказов прибора, то количество длительных отказов с учетом допустимого времени простоя τ_d

$$k(v) = k - kv(\tau_d) = k[1 - v(\tau_d)], \quad (3)$$

где $v(\tau_d)$ — вероятность восстановления прибора за время τ_d .

Результаты статистической оценки закона времени восстановления автоматического масс-спектрометра МХ-1211 позволяют утверждать, что оно подчиняется экспоненциальному закону

$$\varphi(\tau) = \frac{1}{T_B} e^{-\frac{\tau}{T_B}}, \quad (4)$$

где T_B — среднее время восстановления прибора.

Для экспоненциального закона восстановления

$$v(\tau_d) = 1 - e^{-\frac{\tau_d}{T_B}}, \quad (5)$$

с учетом чего выражение (3) может быть представлено в виде

$$k(v) = ke^{-\frac{\tau_d}{T_B}} = ke^{-\alpha}, \quad (6)$$

где $\alpha = \frac{\tau_d}{T_B}$.

Наработка прибора на длительный (аварийный) отказ с учетом допустимого времени простоя определяется зависимостью

$$T_0(v) = \frac{T_0}{k(v)} = \frac{T_0}{ke^{-\alpha}} = T_0 e^{\alpha}, \quad (7)$$

где T_0 — среднее время между отказами.

Выигрыш в безотказности за счет допустимого времени простоя можно оценить отношением:

$$W = \frac{T_0(v)}{T_0} = e^a. \quad (8)$$

В автоматическом масс-спектрометре МХ-1201 при $\tau_d = 10$ мин и $T_B = 14$ ч выигрыш в безотказности W , определенный по формуле (8), равен 1,01.

В приборе МХ-1211 благодаря улучшению доступа к элементам удалось сократить среднее время восстановления до 2,5 ч. Для данного прибора при том же допустимом времени простоя выигрыш в безотказности $W = 1,07$.

Таким образом, в современных автоматических масс-спектрометрах выигрышем в безотказности за счет допустимого времени простоя можно пренебречь. Анализ сведений об отказах прибора МХ-1211 показал, что его среднее время восстановления может быть уменьшено до 45—60 мин. По мере накопления опыта разработки автоматических масс-спектрометров их характеристики надежности будут улучшаться и вполне возможно, что среднее время восстановления данного класса приборов будет находиться в пределах 30—60 мин. За счет уменьшения допустимого времени простоя при этом возможен существенный выигрыш в безотказности ($W = 1,4$ — 1,2 при $\tau_d = 10$ мин).

Необходимо отметить, что мероприятия по уменьшению среднего времени восстановления могут существенно изменить вид закона восстановления. В литературе по надежности отмечается, что для некоторых типов аппаратуры время восстановления может хорошо описываться законом Эрланга [1], логарифмически нормальным законом [5].

Практика эксплуатации приборов МХ-1211, МХ-1212 показала, что при замене эталонного газа прибор может не отключаться, однако погрешность измерения при этом со временем возрастает. Конструктивно обеспечив выполнение данной операции за время, в течение которого погрешность измерения не достигает предельно допустимого значения, можно добиться существенного уменьшения времени вынужденных простоев.

С учетом допустимого времени простоя выражение (2) для коэффициента технического использования принимает вид

$$K_n(v) = \frac{T_0 - T_n^1(v)}{T_0}, \quad (9)$$

где $T_n(v)$ — суммарное время вынужденных простоев, длительность которых превышает τ_d .

Нецелесообразность учета кратковременных отключений можно подтвердить следующим примером. В ходе испытаний прибора МХ-1211 в реальных условиях эксплуатации было установлено, что отдельные операторы-прибористы затрачивают на устранение отказа, вызванного загрязнением реохордов, свыше часа. Анализ этих отказов показал, что их можно избежать, если операторы в начале каждой смены будут производить профилактическую чистку реохордов; прибор при этом должен отключаться в среднем на 5 мин, что значительно меньше допустимого времени простоя. В связи с тем, что скорость ленты дублирующего самописца, по которому дежурный оператор-химик контролирует ход производственного процесса, мала и во время калибровки на него сигнал не подается, такого отключения оператор обычно не замечает. За время испытаний прибор наработал около 6000 ч, при этом на устранение аварийных отказов было затрачено 32 ч, на профилактическую чистку реохордов — около 100 ч.

Естественно, что коэффициент технического использования, определенный без учета времени, которое понадобилось на чистку реохордов, дает более объективную информацию об эксплуатационной надежности прибора. Время простоев на восстановлении может быть также уменьшено за счет своевременной профилактической замены элементов, отказ которых происходит в результате износа и старения [1, 6, 7]. В настоящее время в инструкциях по эксплуатации профилактическое восстановление обычно не регламентируется, что объясняется недостаточностью статистики об отказах приборов, а также отсутствием инженерных методов оптимального планирования профилактических работ, учитывающих специфику автоматических масс-спектрометров.

Профилактическое восстановление заключается в принудительной замене элемента (блока), если его наработка превзошла некоторое значение θ . Выбор оптимального режима восстановления заключается в подборе такого значения θ , при котором математическое ожидание потерь на единицу времени работы было бы минимальным [6, 7].

Обычно время профилактического восстановления элемента t_n в несколько раз меньше времени восстановления при аварийном ремонте t_a , т. е.

$$t_n = c t_a, \quad (10)$$

где $c = \frac{t_n}{t_a} \leq 1$.

Считая потерями время восстановления элемента (блока), покажем способ оптимального планирования профилактического восстановления. Условимся, что функция времени безотказной работы $F(t)$ рассматриваемого элемента известна. Если за срок службы прибора наработка элемента T во много раз больше времени его безотказной работы, то оптимальным становится регулярный режим принудительной замены ($\theta = \text{const}$), т. е. продолжительность профилактического восстановления элемента постоянна, а время θ отсчитывается с начала эксплуатации или же с момента предыдущего восстановления независимо от его причины [7]. При таком режиме восстановлений математическое ожидание времени восстановления элемента

$$P = t_a F(\theta) + t_n [1 - F(\theta)] = t_a \{F(\theta) + c [1 - F(\theta)]\}, \quad (11)$$

а математическое ожидание времени между восстановлениями

$$m = \int_0^{\theta} [1 - F(t)] dt. \quad (12)$$

При достаточно большом значении времени эксплуатации число таких восстановлений равно T/m . Взяв отношение математического ожидания времени восстановления к математическому ожиданию времени между соседними восстановлениями, определяем коэффициент удельных потерь

$$\beta_1 = \frac{P}{m} = t_a \frac{F(\theta) + c [1 - F(\theta)]}{\int_0^{\theta} [1 - F(t)] dt}. \quad (13)$$

Можно утверждать, что при $T \rightarrow \infty$ суммарные потери $A(T) \sim \beta_1 T$. Таким образом, условие оптимизации величины сводится к тому, чтобы найти

$$\min_{0 < \theta} \beta_1 = \min_{0 < \theta} t_a \frac{F(\theta) + c [1 - F(\theta)]}{\int_0^{\theta} [1 - F(t)] dt}. \quad (14)$$

Для профилактического восстановления группы статистически однотипных элементов с учетом низкой квалификации обслуживающего персонала предпочтительным является режим, когда в интервале времени $(0, \theta)$ производится восстановление отдельных отказавших элементов, а в момент θ профилактическому восстановлению подвергается вся группа элементов.

Коэффициент удельных потерь при этом

$$\beta_2 = \frac{b M(\theta) t_a + b t_n}{\theta} = b t_a \frac{M(\theta) + c}{\theta}, \quad (15)$$

где $M(\theta)$ — математическое ожидание числа замен одного элемента в интервале $(0, \theta)$;

b — количество элементов в группе.

Задача оптимизации величины θ сводится к тому, чтобы найти

$$\min_{0 < \theta} \beta_2 = \min_{0 < \theta} b t_a \frac{M(\theta) + c}{\theta}. \quad (16)$$

Согласно теории восстановлений, $M(\theta)$ может быть представлено в виде бесконечной суммы сверток функции $F(\theta)$

$$M(\theta) = F^{(1)}(\theta) + F^{(2)}(\theta) + \dots + F^{(l)}(\theta) + \dots, \quad (17)$$

где $F^{(1)}(\theta) = F(\theta)$;

$$F^{(2)}(\theta) = \int_0^\theta F(\theta - s) ds;$$

$$F^{(3)}(\theta) = \int_0^\theta F^{(2)}(\theta - s) ds \text{ и т. д.}$$

Для инженерных расчетов можно пользоваться неравенством [7]

$$F^{(1)}(\theta) + F^{(2)}(\theta) < M(\theta) < F^{(1)}(\theta) + \frac{F^{(2)}(\theta)}{1 + F^{(1)}(\theta)}, \quad (18)$$

при помощи которого получим оценку сверху и снизу для β_2 . При $\theta \rightarrow \infty$ $M(\theta) \sim \theta/T_{\text{ср}}$, где $T_{\text{ср}}$ — средний срок службы элемента. Так как в окрестности $\theta = 0$ $M(\theta)$ растет медленнее θ , минимум удельных потерь, если он существует, обычно получается при $\theta < T_{\text{ср}}$.

Выражения (13) и (15) могут использоваться для инженерных расчетов, если убытки от простоев определяются только временем восстановления элементов, например, для установления оптимальной периодичности чистки реохордов, регулировки вибропреобразователей и т. д.

Если при планировании восстановлений нельзя пренебречь стоимостью элементов, то для определения оптимальной периодичности восстановлений необходимо пользоваться величиной суммарных экономических потерь. В этом случае величина потерь при аварийном восстановлении

$$z_{a3} = a t_a + z_0, \quad (19)$$

где a — коэффициент пропорциональности;

z_0 — стоимость элемента.

По аналогии величина потерь при профилактическом восстановлении

$$z_{n3} = a t_n + z_0. \quad (20)$$

Величину удельных экономических потерь определяем по формулам

$$\beta_{1a} = \frac{z_a F(0) + z_n [1 - F(0)]}{\int_0^{\theta} [1 - F(t)] dt} = \frac{(at_a + z_0) F(0) + (at_n + z_0) [1 - F(0)]}{\int_0^{\theta} [1 - F(t)] dt}; \quad (21)$$

$$\beta_{2a} = b \frac{z_a M(0) + z_n}{\theta} = b \frac{(at_a + z_0) M(0) + at_n + z_0}{\theta}. \quad (22)$$

Выбирая оптимальный режим восстановлений, надо подбирать такое значение θ , при котором удельные экономические потери минимальны. Принципиально возможна также оптимизация профилактических восстановлений и с учетом допустимого времени отключения прибора τ_d . Однако подобная оптимизация нецелесообразна, так как всегда можно применить прибор, если $\tau_d = 0$.

Следует отметить, что вид функции времени безотказной работы $F(t)$ конкретных элементов автоматических масс-спектрометров должен определяться по данным об их отказах в процессе эксплуатации, а также путем выполнения специальных испытаний. Полученные зависимости учитывают специфические особенности автоматических масс-спектрометров и могут использоваться в практической работе.

Максимально регламентировав основные виды технического обслуживания, а также укомплектовав приборы встроенными счетчиками часов наработки и необходимым количеством запасных элементов, завод-изготовитель обеспечит стабильный уровень надежности автоматических масс-спектрометров в процессе эксплуатации.

В свою очередь эксплуатационники, непрерывно накапливая и анализируя данные об отказах приборов, приурочивая регламентные работы ко времени плановых и аварийных остановок производственного процесса, могут не только поддерживать надежность приборов на определенном уровне, но и значительно увеличить ее.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Шишонов, В. Ф. Репкин, Л. Л. Барвинский. Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники. Изд-во «Советское радио», 1962.
2. Г. В. Дружинин. Надежность устройств автоматики. Изд-во «Энергия», 1964.
3. Н. Ф. Семенов. Расчет необходимого количества запасных элементов. Ж. «Обмен опытом в радиоэлектронной промышленности», вып. 4, 1965.
4. Ю. Ф. Якушев, И. И. Катеринич. Четыре случая расчета запасных элементов для радиоэлектронной аппаратуры. Ж. «Вопросы радиоэлектроники», серия XII, вып. 9, 1965.
5. Я. Б. Шор. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. Изд-во «Советское радио», 1962.
6. R. Barlow, L. Hunter. Optimum Preventive Maintenance Policies. Operat. Res. № 1, 1960.
7. И. Б. Герцбах. О выборе оптимального режима обслуживания группы однотипных элементов в автоматической системе. Ж. «Автоматика и телемеханика», № 9, 1964.