

О КРИТЕРИЯХ НАДЕЖНОСТИ МАШИН ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО КОНТРОЛЯ

М. Г. Грудин

Киев

Машины централизованного контроля (МЦК) применяются в различных отраслях техники и выполняют ответственные задачи по сбору и первичной обработке разнообразной технологической информации.

Для выполнения сравнительных оценок различных МЦК по надежности, а также для оценки влияния надежности на эффективность выполнения заданных функций по сбору и обработке информации необходимо установить для них критерии и количественные характеристики надежности.

Машины централизованного контроля являются многофункциональными и многоканальными (многоточечными) измерительными системами, работающими в различных условиях эксплуатации. В связи с этим возникают значительные трудности применения универсальных количественных характеристик надежности, учитывающих все многообразие функций и условий использования МЦК. На наш взгляд, надежность МЦК целесообразно оценивать не для всех возможных для данного класса технических устройств, функций, свойств и условий эксплуатации, а лишь по отношению к вполне определенным (заданным) функциям с учетом конкретных (заданных) условий эксплуатации. Это значит, что общие для всех МЦК с точки зрения аппаратной надежности количественные характеристики следует конкретизировать и уточнять в каждом отдельном случае их применения.

Анализ основных технических данных и конструктивного исполнения современных отечественных и зарубежных МЦК, описанных в работе [1], позволяет сформулировать основные функции подавляющего большинства машин: выборочное или циклическое измерение во многих точках отклонений параметров от заданных значений в цифровой или аналоговой форме, цифровая регистрация и визуальная индикация результатов измерений, в том числе сигнализация аварийных отклонений от нормального хода технологических процессов, а также выдача в цифровой форме обработанных данных во внешние устройства.

В связи с этим отказом в работе МЦК будем считать событие, после появления которого основные выходные характеристики машины (главным образом точность измерений, быстродействие и т. д.) выходят за заранее установленные пределы (допуски) либо не выполняется хотя бы одна из основных функций, связанных с регистрацией, индикацией или сигнализацией результатов измерений. Другими словами, отказом в работе МЦК называется событие, заключающееся в полной или частичной утрате ею работоспособности и требующее вмешательства обслуживающего персонала.

Классифицировать отказы МЦК можно по следующим признакам (критериям).

1. Степень влияния на выполнение основных функций.

Следует различать полные и частичные отказы в работе, связанные соответственно с полной или частичной утратой работоспособности по всем или некоторым заданным функциям. Кроме того, указанные выше заданные основные функции могут не выполняться: а) по всем точкам контроля; б) по группе точек; в) для отдельно взятой точки контроля. В таблице приведены некоторые примеры возникновения полных или частичных отказов в МЦК.

Точки контроля	Не выполняются все основные функции	Не выполняются некоторые основные функции
Все точки	Выход из строя центрального преобразователя (измерительного устройства) либо центрального коммутатора	Отказ в работе печатающего устройства. Выход из строя системы световой индикации или аварийной сигнализации
Группа точек	Выход из строя центрального преобразователя (измерительного устройства) либо центрального коммутатора	Нарушение работы системы световой индикации по группе точек (разряду числа)
Одна точка	Выход из строя датчика, индивидуального формирующего преобразователя; повреждение линии связи датчика с машиной	Отказ в устройстве цифровой печати по отдельному каналу (точке), нарушение световой индикации в отдельной точке

2. Характер процесса возникновения (внезапные, постепенные и перемежающиеся отказы).

3. Взаимосвязь (первичные и вторичные или независимые и зависимые).

Машины централизованного контроля можно отнести к системам многократного действия (восстанавливаемые системы), которые после возникновения отказов ремонтируются (восстанавливаются) и продолжают полноценно выполнять свои функции в пределах полного технического ресурса. В этом случае одной из основных количественных характеристик надежности МЦК можно считать наработку на отказ, так как такие широко применяемые в теории надежности характеристики, как вероятность и среднее время безотказной работы по внезапным отказам, а также интенсивность последних характеризуют надежность либо аппаратуры однократного действия, либо систем многократного действия до первого их отказа, в связи с чем применение этих характеристик для восстанавливаемых систем в общем случае должно быть ограничено.

Разумеется, это предположение имеет смысл лишь в том наиболее распространенном в практике применения МЦК случае, если контроль технологического процесса при выходе МЦК из строя вследствие отказа дублируется по особо ответственным точкам контроля цеховыми и другими децентрализованными средствами контроля или предусмотрено 100%-ное резервирование в объеме всей МЦК с автоматическим включением резервирующей МЦК.

Нарботкой на отказ (средним временем между соседними отказами) машины централизованного контроля называется математическое ожидание интервала времени между соседними отказами (внезапными и постепенными) при условии восстановления каждого отказавшего элемента. В соответствии с этим определением степень надежности МЦК оценивается средним числом часов работы между двумя соседними отказами за определенное время эксплуатации.

Если $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n$ — интервалы времени исправной работы машины за определенное время эксплуатации, а число внезапных и постепенных отказов за этот же календарный срок равно n_z , то наработка на отказ приближенно определится из соотношения

$$\tilde{T}_{cp} \cong \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_n}{n_z} \cong \frac{\sum_{i=1}^{n_z} \Delta t_i}{n_z}. \quad (1)$$

Величина $\tilde{T}_{cp}$ является усредненной статистической и определяется по данным опыта эксплуатации. Значение интервала времени Δt_i между любыми двумя соседними $(i-1)$ -м и i -м отказами является случайной величиной и поэтому не может быть заранее точно предсказано.

В том случае, если эксплуатируется одновременно M однотипных МЦК либо имеются сведения об отказах M машин на различных объектах с одинаковыми условиями эксплуатации, то на основании эргодической гипотезы

$$\tilde{T}_{cp} \cong \frac{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{n_j} \Delta t_{ji}}{\sum_{j=1}^M n_j}, \quad (2)$$

где M — число однотипных МЦК;

Δt_{ji} — время исправной работы между двумя соседними отказами j -й машины;

n_j — число отказов j -й машины.

При $n_z \rightarrow \infty$, т. е. при увеличении накопленного числа отказов, величина $\tilde{T}_{cp}$ приближается к математическому ожиданию времени работы МЦК между соседними отказами, т. е. $\tilde{T}_{cp} \rightarrow T_0$.

С учетом приведенной выше классификации отказов в зависимости от перечня заданных основных функций понятие «наработка на отказ» следует дифференцировать, определив, например, наработку в режиме цифровой регистрации или среднее время между соседними отказами в режиме световой индикации.

Практически величина $\tilde{T}_{cp}$ всегда оценивается приближенно с определенной степенью точности и достоверности. Поэтому, кроме точечной оценки наработки на отказ, произведенной по соотношениям (1), (2), целесообразно определить доверительные интервалы этого показателя надежности.

Известно, что в случае простейшего (пуассоновского) потока доверительный интервал величины наработки на отказ имеет вид

$$\frac{\tilde{T}_{cp} \cdot 2n_z}{\chi^2_{\frac{\beta}{2}}(2n_z + 2)} < T_{cp} < \frac{\tilde{T}_{cp} \cdot 2n_z}{\chi^2_{1-\frac{\beta}{2}}(2n_z)}, \quad (3)$$

где $\chi^2_{\frac{\beta}{2}}(2n_z + 2) - \frac{\beta}{2} \cdot 100\%$ -ная точка χ^2 распределения с $2n_z + 2$ степенями свободы;

$\tilde{T}_{cp}$ — оценка наработки на отказ МЦК, определяемая по соотношениям (1) или (2);

уровень значимости доверительной области $1-\beta$ принимается равным не менее 0,9.

При $n_2 \gg 100$ можно пользоваться приближенной формулой

$$\frac{\bar{T}_{\text{ср}}}{Z_{1-\frac{\beta}{2}} \sqrt{\frac{\bar{T}_{\text{ср}}}{n_2}}} < T_{\text{ср}} < \frac{\bar{T}_{\text{ср}}}{Z_{1-\frac{\beta}{2}} \sqrt{\frac{\bar{T}_{\text{ср}}}{n_2}}}, \quad (4)$$

где $Z_{1-\frac{\beta}{2}} = \left(1 - \frac{\beta}{2}\right)$ 100%-ная квантиль нормального распределения.

Наработка на отказ (среднее время между соседними отказами) является вполне удовлетворительной основной количественной характеристикой надежности машин централизованного контроля, так как эта характеристика, определенная из опыта эксплуатации, автоматически и наиболее полно учитывает весь комплекс внешних и внутренних факторов, влияющих на надежность аппаратуры. К недостаткам следует отнести невозможность определения при помощи $T_{\text{ср}}$ характера изменения надежности аппаратуры во времени.

Принимая во внимание стабильность условий эксплуатации МЦК (размещение аппаратуры в закрытых отапливаемых помещениях с незначительными климатическими и механическими нагрузками, постоянное количество работающих блоков), а также полученные в процессе промышленной эксплуатации МЦК данные об отказах в работе, можно сделать вывод о том, что поток отказов МЦК является простейшим (пуассоновским).

В таких сложных системах, как машины централизованного контроля, которые состоят из большого количества разнородных элементов с различными характеристиками, закон распределения интервалов между соседними событиями теоретически сводится к показательному, потому что каждый из слагаемых потоков в период нормальной эксплуатации оказывает слабое влияние на суммарный поток редких случайных событий (отказов). Понятно, что для периода эксплуатации, когда на возникновение отказов начинает влиять какой-либо один или несколько доминирующих факторов (износ, старение и т. д.), предположение о «пуассоновости» потока отказов является неприемлемым. В этом случае для приближения теоретического распределения к экспериментальному, прибегают к суперпозиции распределений, например показательного и усеченного нормального.

Так как предположение о «пуассоновости» потока отказов МЦК является вполне допустимым, то среднее время между соседними отказами $\bar{T}_{\text{ср}}$ равно среднему времени безотказной работы T_0 , а суммарная интенсивность отказов машины

$$\lambda_2 = \frac{1}{T_0} = \text{const.} \quad (5)$$

На основании соотношения (5) оказывается возможным сравнить полученное экспериментальным путем значение $\bar{T}_{\text{ср}}$ с расчетной величиной T_0 , определенной по известным интенсивностям отказов элементов с учетом режимов их работы и условий применения.

Выше было отмечено, что вероятность безотказной работы по внезапным отказам, характеризующая работу аппаратуры лишь до первого

отказа, является для МЦК вспомогательным критерием, позволяющим сравнить при одинаковом t лишь безотказность однотипных машин или их блоков.

Однако, учитывая специфику функционирования МЦК, а именно, недопустимость ухода за время эксплуатации машины выходных характеристик (определяющих параметров) за установленные ТУ пределы по точности, быстродействию и т. д., во избежание получения недостоверных данных о контролируемом процессе необходимо установить для МЦК еще одну количественную характеристику надежности — вероятность безотказной работы по постепенным отказам $P_n(t)$ или

$$P_{ni}(A_{\min} < \varphi_i < A_{\max}; t),$$

где φ_i — определяющий параметр; (6)
 $A_{\min}; A_{\max}$ — нижний и верхний допустимый пределы изменения определяющего параметра φ_i .

$$P_{ni}(A_{\min} < \varphi_i < A_{\max}; t) =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma(\varphi_i; t)}} \int_{A_{\min}}^{A_{\max}} \exp \left\{ -\frac{[\varphi_i(t) - m(\varphi_i; t)]^2}{2\sigma^2(\varphi_i; t)} \right\} d\varphi, \quad (7)$$

где $m(\varphi_i; t)$ — математическое ожидание параметра φ_i в момент времени t ;

$\sigma(\varphi_i; t)$ — среднее квадратическое отклонение параметра φ_i в момент времени t .

Особый интерес представляют количественные характеристики надежности, позволяющие оценить процесс восстановления МЦК. К ним следует отнести среднее время восстановления и коэффициент готовности.

Среднее время восстановления, т. е. время, затрачиваемое в среднем на устранение одного отказа за определенный календарный срок эксплуатации

$$\bar{\tau}_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{n_z} \Delta\tau_i}{n_z}, \quad (8)$$

где $\sum_{i=1}^{n_z} \Delta\tau_i$ — суммарное время восстановления машины;

n_z — количество отказов (восстановлений) за тот же период.

Доверительный интервал среднего времени восстановления определяется соотношением

$$\bar{\tau}_{cp} - \frac{S}{\sqrt{2n_z}} Z_{1-\frac{\beta}{2}} < \tau_{cp} < \bar{\tau}_{cp} + \frac{S}{\sqrt{2n_z}} Z_{1-\frac{\beta}{2}}, \quad (9)$$

где $Z_{1-\frac{\beta}{2}} = \left(1 - \frac{\beta}{2}\right)$ 100%-ная квантиль нормального распределения;

S — оценка среднего квадратического отклонения среднего времени восстановления

$$S = \sqrt{\frac{n_z}{n_z - 1} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{n_z} \Delta\tau_i^2}{n_z} - \bar{\tau}_{cp}^2 \right\}}; \quad (10)$$

$\tau_{\text{ср}}$ — оценка среднего времени восстановления, определяемая по соотношению (8).

Коэффициент готовности характеризует эффективность применения МЦК с точки зрения их надежности и равен отношению времени исправной работы к суммарному времени исправной работы и восстановления машины, взятых за один и тот же календарный срок, т. е.

$$K_r = \frac{\sum_{i=1}^{n_y} \Delta t_i}{\sum_{i=1}^{n_y} \Delta t_i + \sum_{i=1}^{n_y} \Delta \tau_i} \quad (11)$$

В вероятностном смысле коэффициент готовности есть вероятность заставить машину централизованного контроля в исправном состоянии в любой момент времени эксплуатации. Важно только, чтобы условия эксплуатации были установившимися, т. е. период приработки машины закончился.

Таким образом, основными количественными характеристиками надежности машин централизованного контроля могут быть, по нашему мнению, наработка на отказ (среднее время между соседними отказами) $T_{\text{ср}}$, вероятность безотказной работы по постепенным отказам $P_n(t)$, среднее время восстановления $\tau_{\text{ср}}$, а также коэффициент готовности K_r , связанный с $T_{\text{ср}}$ и $\tau_{\text{ср}}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. Е. Темников, И. М. Шенброт. Машины и системы централизованного контроля, ГОСИНТИ, 1964.
2. А. М. Половко. Основы теории надежности. Изд-во «Наука», 1964.
3. Н. А. Шишонов, В. Ф. Репкин, Л. Л. Барвинский. Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники. Изд-во «Советское радио», 1964.