

РЕЗЕРВИРОВАНИЕ С КВОРУМ-ЭЛЕМЕНТОМ В СХЕМАХ ШАХТНОЙ АВТОМАТИКИ

Е. Я. Иванченко, А. М. Кащич

Харьков

Постоянное резервирование в виде параллельного или последовательного соединения нескольких устройств является эффективным при отказах одного из них. По мере возрастания вероятности отказов другого вида и выравнивания их значений эффективность такого резервирования резко снижается. В том случае, когда вероятности отказов I и II вида соизмеримы по величине, для повышения надежности устройства уже следует применять последовательно-параллельное, параллельно-последовательное их соединение или резервирование с кворум-элементом. Несрабатывание устройства считается отказом I вида, ложное срабатывание — отказом II вида.

Для обоснованного применения этих способов резервирования в конкретных схемах шахтной автоматики необходимо знать их и определить рациональную область применения.

Рассмотрим наиболее распространенные в практике случаи, когда последовательно-параллельная и параллельно-последовательная схемы состоят из четырех устройств, а схема резервирования с кворум-элементом — из трех (рис. 1). Сигнал на выходе кворум-элемента соответствует большинству сигналов на его входе.

Считая вероятности появления отказов I и II вида равными q_n и q_n соответственно и обозначив удельный вес отказов I вида через

$$\varepsilon = \frac{q_n}{q},$$

запишем

$$q_n = \varepsilon q, \quad q_n = (1 - \varepsilon) q, \quad (1)$$

где $q = q_n + q_n$ — вероятность отказа вообще.

При параллельном соединении устройств вероятность отказа резервированного устройства определяется формулой

$$Q_1^{(m)} = q_n^m + 1 - (1 - q_n)^m. \quad (2)$$

Для $m = 2$ и $m = 3$ эти вероятности равны

$$Q_1^2 = q^2 (2\varepsilon - 1) + 2q (1 - \varepsilon); \quad (3)$$

$$Q_1^3 = q^3 [\varepsilon^3 + (1 - \varepsilon)^3] - 3q^2 (1 - \varepsilon)^2 + 3q (1 - \varepsilon). \quad (4)$$

Для последовательно-параллельной и параллельно-последовательных схем резервирования вероятности отказов равны соответственно [1]

$$Q_2 = 2(1 - 2\epsilon + 3\epsilon^2)q^2 - 4\epsilon^3q^3 + [\epsilon^4 - (1 - \epsilon)^4]q^4; \quad (5)$$

$$Q_3 = 2(2 - 4\epsilon + 3\epsilon^2)q^2 - 4(1 - 3\epsilon + 3\epsilon^2 - \epsilon^3)q^3 + (1 - 4\epsilon + 6\epsilon^2 - 4\epsilon^3)q^4.$$

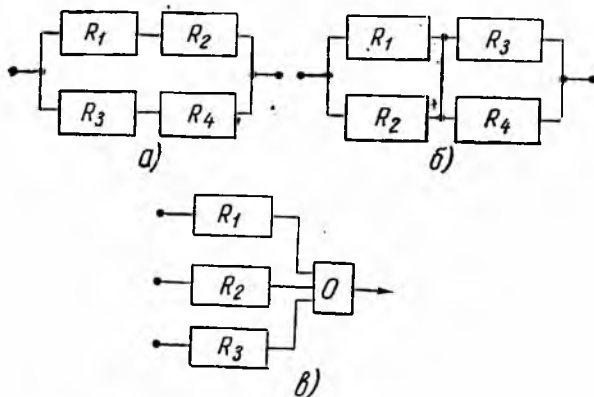


Рис. 1. Схемы резервирования:

а — последовательно-параллельная схема; б — параллельно-последовательная схема; в — схема резервирования с кворум-элементом.

Минимального значения функции Q_2 и Q_3 достигают при $\epsilon_2 = \frac{1}{3}$ и $\epsilon_3 = \frac{2}{3}$, а минимально возможные вероятности отказов этих схем равны при $q < 0,3$

$$Q_2 \min \cong 1,33q^2 - 0,15q^3; \quad (7)$$

$$Q_3 \min \cong 1,33q^2 - 0,15q^3.$$

Для трех устройств при резервировании с кворум-элементом справедливо соотношение

$$\sum \frac{3!}{a_1!a_2!a_3!} P^{a_1} q_n^{a_2} q_n^{a_3} = 1. \quad (8)$$

Суммирование здесь производится по всем системам целых положительных a_1, a_2, a_3 , удовлетворяющих условию $a_1 + a_2 + a_3 = 3$.

Расшифровав (8), получим

$$Q_4 = q_n^3 + 3(1 - q_n)q_n^2 + q_n^3 + 3(1 - q_n)q_n^2, \quad (9)$$

где Q_4 — вероятность отказа.

При этом сам кворум-элемент считается абсолютно надежным. Отказом схемы будет такое ее состояние, когда не менее двух устройств не сработали или же сработали ложно. Подставив (1) в (9), получаем

$$Q_4 = 3q^2(1 + 2\epsilon^2 - 2\epsilon) - 2q^3(1 + 3\epsilon^2 - 3\epsilon). \quad (10)$$

Для определения минимума функции Q_4 приравняется нулю $\frac{dQ_4}{d\epsilon}$

$$\frac{dQ_4}{d\epsilon} = 3q^2(4\epsilon - 2) - 3q^3(6\epsilon - 3) = 0. \quad (11)$$

Решая это уравнение относительно ϵ , находим $\epsilon_4 = 0,5$.

Следовательно, резервирование с кворум-элементом обеспечивает максимальную надежность в том случае, когда оба вида отказов равновероятны. Максимально возможная вероятность отказа при этом

$$Q_4 \min = 1,5q^2 - 0,5q^3 \quad (12)$$

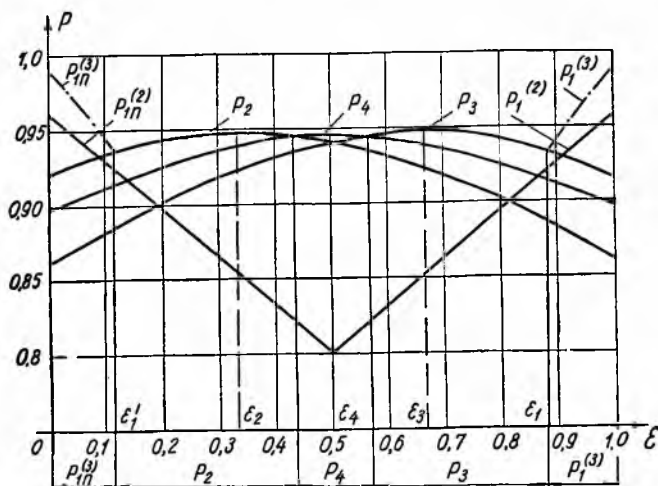


Рис. 2. Зависимость вероятности безотказной работы различных схем резервирования от соотношения отказов:

$P_{1n}^{(2)}$, $P_{1n}^{(3)}$, $P_1^{(2)}$, $P_1^{(3)}$ — вероятности безотказной работы соответственно при последовательном и параллельном соединении двух и трех устройств, P_2 , P_3 , P_4 — вероятности безотказной работы при последовательно-параллельном, параллельно-последовательном резервировании и резервировании с кворум-элементом.

На рис. 2 приведены зависимости вероятности безотказной работы различных схем резервирования от соотношения отказов в устройстве для случая, когда начальная надежность его $P_0 = 0,8$. Из графика следует, что по возможностям последовательно-параллельное, параллельно-последовательное резервирование с надежным кворум-элементом примерно равноценны. Каждый из этих способов является эффективным при определенных соотношениях между отказами. Стрелками на графике обозначены области рационального применения различных способов резервирования, определенные из условия максимальной вероятности безотказной работы.

Так, резервирование с кворум-элементом целесообразно при $0,43 \leq \varepsilon \leq 0,56$. Однако, экономически обосновывая широту области применения этого вида резервирования, ее границы можно расширить, так как последовательно-параллельная и параллельно-последовательная схемы требуют четырех устройств, а схема резервирования с кворум-элементом — трех. При этом принимается, что сам кворум-элемент значительно проще резервируемого устройства и поэтому не учитывается. Это условие в большинстве случаев практики выполняется.

При $0 \leq \varepsilon \leq 0,12$ и $0,88 \leq \varepsilon \leq 1$ необходимо применять последовательное и параллельное соединение двух или трех устройств. В этом случае при меньшей избыточности обеспечивается больший выигрыш

надежности, чем при последовательно-параллельном, параллельно-последовательном резервировании, а также при резервировании с кворум-элементом. По этим соображениям область рационального применения этого вида резервирования также может быть расширена.

Практическая ценность резервирования с кворум-элементом определяется тем, что имеется реальная возможность построения весьма простых и высоко надежных кворум-элементов. Так, в [2] и [3] доказано, что соответствующим выбором параметров обычной логической схемы ИЛИ — НЕ (рис. 3) она может быть превращена в пороговый элемент

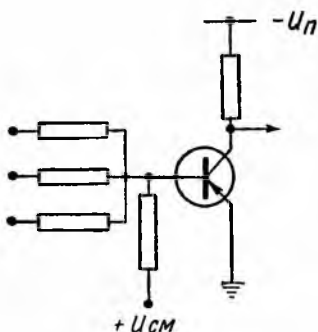


Рис. 3. Схема логического элемента ИЛИ-НЕ.

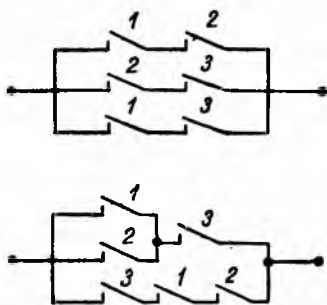


Рис. 4. Схемы кворум-элементов.

с порогом 2, т.е. в достаточно простой и высоко надежный кворум-элемент. Кроме того, если устройство имеет релейно-контактный выход, то кворум-элемент может быть построен из контактов выходных реле. При этом для построения кворум-элемента в каждом реле требуется дополнительно по одной паре контактов (рис. 4).

Следует отметить, что ширина области применения различных видов резервирования зависит от начальной надежности устройства P_0 , но с приемлемой для практики точностью ее можно считать постоянной при $0,7 \leq P_0 \leq 1$.

Отказы двух видов могут иметь многие датчики системы шахтной автоматики. В первую очередь это относится к датчикам с уравновешенной мостовой схемой. Такой датчик может иметь отказы I вида в результате потери чувствительности реагирующего органа в одном из плеч мостовой схемы, а также в результате отказа регулирующего или исполнительного органа в измерительной диагонали ее. Отказы II вида могут быть вызваны расстройкой мостовой схемы или же обрывом одного из ее плеч.

В качестве примера рассмотрим резервирование с кворум-элементом датчика метана аппаратуры АМТ-2, предназначенной для контроля содержания метана в шахтной атмосфере. Как к прибору техники безопасности к АМТ-2 предъявляются высокие требования: вероятность безотказной работы аппаратуры за 720 часов должна быть не ниже 0,99.

Надежность датчика, следовательно, должна быть выше 0,99. Датчик метана представляет собой уравновешенную мостовую схему с чувствительным органом (термогруппой) в одном из плеч и реле в измерительной диагонали.

Пусть исходная надежность датчика равна 0,92. Взяв три датчика и соединив контакты из реле по схеме (рис. 4), получим схему резервирования с кворум-элементом. Кворум-элемент будем считать абсолютно надежным, так как надежность реле учтена в исходной надежности датчика. По данным лабораторных испытаний можно считать оба вида отказов примерно равновероятными. При этом условии вероятность безотказной работы резервируемого датчика составит

$$P = 1 - Q_{\min} = 1 - (1,5q^2 - 0,5q^3) = 1 - (1,5 \cdot 0,08^2 - 0,5 \cdot 0,08^3) = 1 - 0,009 = 0,991.$$

Коэффициент увеличения надежности по вероятности отказов

$$k = \frac{q}{Q_{\min}} = \frac{0,08}{0,009} = 8,9.$$

Это справедливо для резервированных схем без восстановления. При резервировании с восстановлением повышение надежности еще более значительно.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Туллер. О постоянном резервировании в системах управления с учетом вида отказа. «Приборостроение», 1965, № 2.
2. В. П. Чистов. Условия осуществимости пороговых схем на транзисторах. «Автоматика и телемеханика», 1965, № 10.
3. С. М. Доманицкий, И. В. Прангисвили. Методика расчета параметров транзисторных логических элементов. «Автоматика и телемеханика», 1965, № 11.