

В. Г. СТАРОСЕЛЕЦ

(Ленинград)

### О СТРУКТУРНОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ БЛОКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Рассматриваются некоторые принципы построения схем с избыточным количеством измерительных преобразователей (ИП) для повышения инструментальной достоверности автоматического контроля. Приводятся аналитические выражения, позволяющие оценивать ошибки контроля из-за ненадежности ИП и определять рациональную структурную избыточность.

Инструментальная достоверность систем автоматического контроля (САК) в значительной степени зависит от их надежности. Действительно, так как отказы САК часто являются скрытыми, то последнее легко приводит к неверным результатам контроля (например при допусковом контроле объекта «годен» вместо «негоден» и наоборот).

Существенно исключить влияние скрытых отказов на инструментальную достоверность можно с помощью самоконтроля. Однако звенья САК — измерительные преобразователи (ИП)\* — во многих случаях охватывать самоконтролем либо не удастся [2], либо нецелесообразно из-за чрезвычайного усложнения системы автоконтроля. Поэтому для повышения инструментальной достоверности САК особенно важно применение надежных ИП. Поскольку их надежность может быть недостаточной, то одним из способов повышения инструментальной достоверности автоматического контроля является применение избыточного количества ИП. При этом возникает задача определения принципов использования информации, получаемой от ИП, а также целесообразной структурной избыточности блока ИП.

Для выяснения влияния способов логической обработки данных, получаемых от блока с избыточным количеством ИП, воспользуемся такой характеристикой САК, как вероятность  $E$  получения неверных результатов контроля параметра из-за ненадежности ИП:

$$E = L + M, \quad (1)$$

где  $L$  — вероятность ложного забракования объекта по контролируемому параметру;

$M$  — вероятность пропуска отказа объекта по контролируемому параметру.

\* Здесь в соответствии с [1] под этим термином будем понимать элементарные ИП, через которые в измерительную цепь вводится измеряемая величина.

Введем обозначения:  $\alpha$  — условная вероятность неправильной оценки параметра при условии, что его значение соответствует границам допуска;  $\beta_n$  и  $\beta_v$  — условные вероятности неправильных оценок параметра при условии, что его значение меньше нижней и больше верхней границы допуска.

Тогда

$$L = \alpha r;$$

$$M = \beta_n (1 - r) \nu + \beta_v (1 - r) \varphi = (1 - r) (\nu \beta_n + \varphi \beta_v); \quad (3)$$

$$E = \alpha r + (1 - r) (\nu \beta_n + \varphi \beta_v), \quad (4)$$

где  $r$  — вероятность того, что величина контролируемого параметра находится в поле допуска;

$\nu$  — условная вероятность того, что величина контролируемого параметра меньше значения нижнего допуска при отказе объекта по данному параметру;

$\varphi$  — условная вероятность того, что величина контролируемого параметра превосходит значение верхнего допуска при отказе объекта по данному параметру.

В принятых обозначениях  $\nu + \varphi = 1$ .

Если для контроля параметра применять одиночный ИП, то в этом случае  $\alpha = q$ ,  $\beta_n = q_v$  и  $\beta_v = q_n$ . Здесь  $q$  — вероятность отказа ИП;  $q = q_n + q_v + q_p$ ;  $q_n$  — вероятность полного отказа (полной потери работоспособности) ИП;  $q_v$  — вероятность частичного отказа, приводящего к недопустимо заниженным показаниям ИП;  $q_p$  — вероятность частичного отказа, приводящего к недопустимо завышенным показаниям ИП.

Тогда на основании выражений (2) — (4) имеем:

$$L = qr; \quad (5)$$

$$M = (1 - r) (\nu q_v + \varphi q_n); \quad (6)$$

$$E = qr + (1 - r) (\nu q_v + \varphi q_n). \quad (7)$$

Рассмотрим теперь возможности уменьшения данных показателей достоверности контроля с помощью введения в блок ИП структурной избыточности.

#### СТРУКТУРНАЯ ИЗБЫТОЧНОСТЬ ИП ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОСТЕЙШИХ ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ

Пусть в системе, осуществляющей автоматический допусковый контроль объекта по  $N$  параметрам, применено избыточное количество некоторых ИП. Так, например, для контроля годности параметра  $X$  используется  $m$  одинаковых ИП (рис. 1). Выходные сигналы от каждого ИП подаются на коммутационно-измерительное устройство (КИУ), которое последовательно осуществляет измерительные операции и формирует сигналы соответствия параметра допустимым пределам. После отбора и обработки информации поочередно от всех  $m$  ИП эти сигналы поступают на логическую схему (ЛС), которая выдает окончательное решение о годности данного параметра. Остальные функциональные узлы САК на рис. 1 не даны.

Покажем, что инструментальная достоверность контроля при избыточном количестве ИП во многом зависит от принципов построения логической схемы. Для этого рассмотрим вначале структурную избыточность ИП с использованием простейших логических схем.

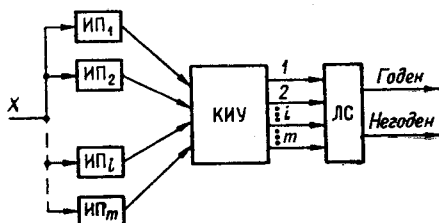


Рис. 1.

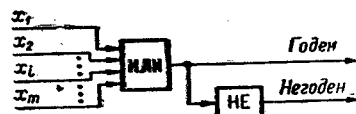


Рис. 2.

Схема с выходом ИЛИ. Один из вариантов схемы формирования сигналов о результатах контроля параметра может осуществляться на основании выражений:

$$F_1 = x_1 \vee x_2 \vee \dots \vee x_i \vee \dots \vee x_m; \quad (8)$$

$$F_2 = \overline{x_1 \vee x_2 \vee \dots \vee x_i \vee \dots \vee x_m}, \quad (9)$$

где  $F_1, F_2$  — формы записи состояний логической схемы, означающие окончательный результат контроля параметра: «годность» и «негодность» соответственно;

$x_i$  — обозначение сигнала годности, поступающего на вход логической схемы и соответствующего обработке информации от  $i$ -го ИП ( $\bar{x}_i$  — сигнал негодности).

Реализация выражений (8) и (9) приводит к логической схеме рис. 2.

Определим для данного случая условные вероятности  $\alpha$  и  $\beta$  неправильных оценок из-за ненадежности ИП при контроле параметра, имеющего двухсторонний допуск.

Учитывая логику работы схемы, а также считая отказы каждого из  $m$  ИП независимыми событиями, получим:

$$\alpha = q^m; \quad (10)$$

$$\beta_n = 1 - p_v^m; \quad (11)$$

$$\beta_v = 1 - p_n^m, \quad (12)$$

где  $p_v = 1 - q_v$ ;  $p_n = 1 - q_n$ .

На основании соотношений (10) — (12) и (4) вероятность получения неверных результатов контроля составит

$$E = r q^m + (1 - r) [\nu (1 - p_v^m) + \varphi (1 - p_n^m)]. \quad (13)$$

Заметим, что показателю  $L$  соответствует первое слагаемое, а показателю  $M$  — второе слагаемое полученного выражения.

Выясним теперь, какими преимуществами обладает САК с избыточным количеством ИП и логической схемой ИЛИ по сравнению с САК с одиночным ИП.

Пусть  $r=0,8$ ,  $q=0,1$ ,  $q_n = q_v = 0,02$ ,  $m=2$ . Тогда для рассматриваемого случая на основании (13) имеем  $L=0,0080$ ,  $M=0,0079$  и  $E=0,0159$ , а в соответствии с (5)—(7) для случая одиночного ИП получим  $L=0,080$ ,  $M=0,004$  и  $E=0,084$ . Отсюда следует, что структурная избыточность блока ИП с применением логической схемы ИЛИ приводит к уменьшению вероятности  $L$  ложного забракования объекта и вероятности  $E$  получения неверных результатов контроля вообще. Однако при этом увеличивается вероятность  $M$  пропуска отказа.

Можно показать, что при реальных значениях  $r$ ,  $q$ ,  $p_v$  и  $p_n$  существует показатель  $m$ , которому соответствует минимум функции  $E(m)$ . На практике отыскание оптимальной величины  $m$  целесообразно производить последовательным перебором, руководствуясь формулой (13) и критерием оптимальности  $E(m \pm 1) > E(m)$ .

В рассмотренном выше примере  $E=0,0159$  при  $m=2$ ; дальнейшие вычисления по формуле (13) приводят к следующим результатам: при  $m=3$   $E=0,0128$ , при  $m=4$   $E=0,01576$ .

Отсюда следует, что минимальное значение  $E$  в данном случае составляет  $0,0128$  и, значит, показатель структурной избыточности не должен превышать  $m=3$ .

Если важно уменьшить не просто величину  $E$ , а главным образом вероятность ложного забракования, то число  $m$  целесообразно определять, исходя из допустимого значения вероятности пропуска отказа  $M_{\text{доп}}$ . Тогда, пользуясь вторым слагаемым уравнения (13) и значением  $M_{\text{доп}}$ , легко прийти к выражению, на основании которого находится  $m$ :

$$\nu p_v^m + \varphi p_n^m = 1 - \frac{M_{\text{доп}}}{1-r}. \quad (14)$$

В частном случае, при  $p_v = p_n = p_0$ , согласно (14), имеем

$$m = \frac{\ln \left( 1 - \frac{M_{\text{доп}}}{1-r} \right)}{\ln p_0}. \quad (15)$$

*Схема с выходом И.* Выясним, к каким результатам приведет использование логической схемы, аналогичной предыдущей, но с элементом И вместо ИЛИ.

Пользуясь изложенным выше способом, получим:

$$\alpha = 1 - p^m; \quad (16)$$

$$\beta_n = q_v^m; \quad (17)$$

$$\beta_v = q_n^m; \quad (18)$$

$$E = r(1 - p^m) + (1 - r)(\nu q_v^m + \varphi q_n^m), \quad (19)$$

где  $p=1-q$ .

Анализ выражения (19) приводит к выводу, что структурная избыточность блока ИП при использовании логической схемы с выходом И позволяет уменьшить вероятность  $M$  пропуска отказа в объекте, но приводит к увеличению вероятностей  $L$  и  $E$  по сравнению с САК с одиночным ИП. Поэтому практическое использование данной схемы может быть весьма ограниченным. Не останавливаясь на подробном ее ана-



что при этом уменьшаются вероятности ошибок контроля обоих типов и значение  $E$  меньше, чем в случае применения логической схемы ИЛИ.

Анализ формулы (26) показывает, что в случае использования логической схемы по принципу «единогласия» любое увеличение показателя структурной избыточности  $m$  приводит к уменьшению вероятности  $E$ . Однако следует учесть, что при увеличении  $m$  возрастает вероятность  $Q$  прекращения проверок (получения сигнала о неисправности блока ИП). Действительно, так как в соответствии с логикой работы схемы результаты контроля выдаются только при одинаковых показаниях всех ИП, то вероятность отсутствия сигнала о неисправности блока ИП определяется суммой  $p^m + q^m$  и, следовательно,

$$Q = 1 - (p^m + q^m). \quad (27)$$

Заметим, что в соответствии с (27) для рассмотренного выше примера ( $q=0,1$ ;  $p=0,9$ ) уже при  $m=2$  величина  $Q$  получается достаточно большой ( $Q=0,18$ ). Поэтому, несмотря на большие преимущества использования схемы «единогласия», применение ее затрудняется тем обстоятельством, что при получении сигнала о неисправности блока, состоящего из  $m$  ИП, необходимо заменять данный блок резервным. Естественно, что при этом обслуживание САК усложняется, процесс контроля прерывается и сам контроль при значительных величинах  $Q$  может стать малоэффективным или даже нецелесообразным. В связи с этим показатель структурной избыточности  $m$  при использовании данной схемы следует определять, исходя из допустимого значения  $Q$ .

Используя (27) и задаваясь допустимым значением  $Q$ , можно определить  $m$  из выражения

$$p^m + q^m = 1 - Q_{\text{доп}}. \quad (28)$$

Или приближенно при  $p \gg q$  получим

$$m \approx \frac{\ln(1 - Q_{\text{доп}})}{\ln p}. \quad (29)$$

*Схема с выходом по принципу «большинства».* Как следует из предыдущего, в случае применения схемы «единогласия» при  $m > 2$   $Q$  может достигать существенных значений, что особенно нежелательно при ответственном контроле в сжатые интервалы времени.

Заметим, что чаще всего отказывает один ИП, а не несколько одновременно. Поэтому целесообразно, не теряя времени на устранение неисправности в системе контроля, осуществлять контроль параметра всеми ИП, дающими одинаковые показания. При этом необходимо перейти на программу контроля параметра с использованием  $(m-1)$  ИП. Отказавший ИП может быть заменен в период, когда контроль за объектом не производится.

Реализация логической схемы для рассматриваемого случая основана на использовании выражений:

$$F_1 = \bigvee_{i=1}^m \prod_{k=1}^m x_k \quad (x_i = 1; m > 2); \quad (30)$$

$$F_2 = \bigvee_{i=1}^m \prod_{k=1}^m \bar{x}_k \quad (\bar{x}_i = 1; m > 2); \quad (31)$$

$$f_i = F_1 \bar{x}_i \vee F_2 x_i; \quad (32)$$

$$F_3 = \overline{F_1 \vee F_2} \quad (m > 3), \quad (33)$$

где  $f_i$  — форма записи состояния логической схемы, означающего неисправность  $i$ -го ИП.

Для случая, когда  $m=3$ , используя (30)—(32) и производя соответствующие преобразования, получим:

$$F_1 = x_1 (x_2 \vee x_3) \vee x_2 x_3; \quad (34)$$

$$F_2 = \bar{x}_1 (\bar{x}_2 \vee \bar{x}_3) \vee \bar{x}_2 \bar{x}_3; \quad (35)$$

$$f_1 = F_1 \bar{x}_1 \vee F_2 x_1; \quad (36)$$

$$f_2 = F_1 \bar{x}_2 \vee F_2 x_2; \quad (37)$$

$$f_3 = F_1 \bar{x}_3 \vee F_2 x_3. \quad (38)$$

Реализация полученных выражений приводит к схеме, показанной на рис. 4. Данная схема сложнее предыдущих, так как содержит элементы не только для формирования сигналов о результатах контроля, но и для определения неисправного ИП.

Поскольку логическая схема по принципу «большинства» выдает сигналы годности и негодности параметра при наличии не менее  $(m - 1)$

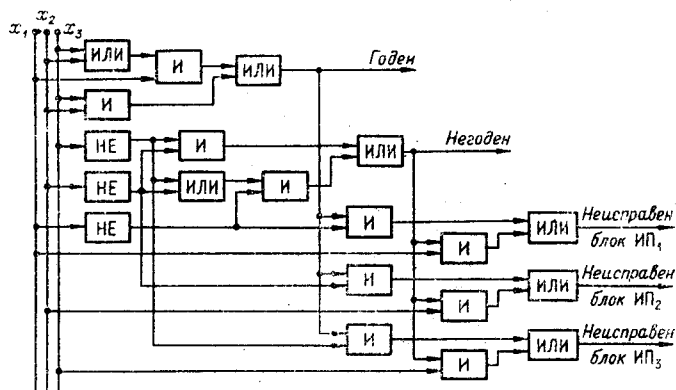


Рис. 4.

одинаковых показаний ИП, то условные вероятности неверных оценок параметра из-за ненадежности ИП для данной схемы составят:

$$\alpha = q^m + C_m^{m-1} q^{m-1} p = q^m + m p q^{m-1},$$

или

$$\alpha = q^{m-1} [1 + (m - 1) p]; \quad (39)$$

аналогично

$$\beta_n = q^{m-1} [1 + (m - 1) p_n]; \quad (40)$$

$$\beta_v = q^{m-1} [1 + (m - 1) p_n]. \quad (41)$$

Вероятность неверных результатов контроля равна

$$E = r q^{m-1} [1 + (m-1)p] + (1-r) [\psi q_b^{m-1} [1 + (m-1)p_b] + \varphi q_n^{m-1} [1 + (m-1)p_n]] \quad (m = 3, 4, \dots). \quad (42)$$

Используя выражение (42) и данные из рассматривавшегося ранее примера, получаем для  $m=3$ :  $L=0,0224$ ,  $M=0,00024$ ,  $E=0,02264$ . Результаты показывают, что по всем трем показателям ( $L$ ,  $M$  и  $E$ ) САК с блоком ИП, имеющим структурную избыточность, и с логической схемой по принципу «большинства» лучше, чем САК с одиночным ИП, но хуже, чем САК с избыточным количеством ИП и логической схемой «единогласия». Однако применение логической схемы по принципу «большинства» позволяет существенно уменьшить вероятность  $Q$  прекращения контроля из-за неисправности ИП по сравнению со случаем использования схемы «единогласия».

Действительно, в соответствии с логикой работы схемы при  $m=3$   $Q=0$ , а при  $m>3$  сигнал о неисправности блока ИП выдается лишь в тех случаях, когда показания не менее двух ИП отличаются от показаний всех остальных ( $m-2$ ) ИП, и поэтому при  $m=4, 5, \dots$

$$Q = \sum_{i=2}^{m-2} C_m^i p^{m-1} q^i. \quad (43)$$

Тогда для рассматриваемого примера при  $m=4$  в соответствии с (43) имеем  $Q = C_4^2 p^2 q^2 = 6 \cdot 0,9^2 \cdot 0,1^2 = 0,049$ ; заметим, что при тех же значениях  $p$  и  $q$  для схемы «единогласия» уже при  $m=2$   $Q=0,18$ .

Отметим также, что использование схемы «большинства» при  $m=3$  дает худшие результаты по показателям  $L$  и  $E$ , чем применение схемы ИЛИ при  $m=2$  и  $m=3$ . Однако, как было показано ранее, возможности применения логической схемы ИЛИ ограничены из-за роста показателя  $M$  при увеличении  $m$  (в данном случае наименьшее значение  $E=0,0128$  возможно при  $m=3$ ), а использование схемы «единогласия» для получения очень малых значений  $E$  затрудняется из-за быстрого роста  $Q$  при возрастании  $m$ . Применение же логической схемы «большинства» позволяет избежать недостатков, присущих этим схемам, и получить весьма малые значения  $E$ . Так, при  $m=4$  схема «большинства» обеспечивает  $L=0,00296$ ,  $M=0,6272 \cdot 10^{-5}$  и  $E=0,00297$  ( $Q=0,049$ ), что значительно лучше, чем при использовании всех рассмотренных выше схем.

Кроме того, важно, что логическая схема по принципу «большинства» позволяет определять неисправный ИП. Учитывая логику работы данной схемы, найдем вероятность  $S$  ошибочного определения неисправного ИП:

$$S = C_m^{m-1} p q^{m-1},$$

или

$$S = m p q^{m-1} \quad (m = 3, 4, \dots). \quad (44)$$

На основании (44) нетрудно сделать вывод о том, что при реальных значениях  $q$  логическая схема будет с достаточно большой вероятностью правильно определять неисправный ИП.



## ВЫВОДЫ

Полученные соотношения показывают, что применение избыточного количества ИП при использовании простейших логических схем позволяет уменьшить вероятность инструментальных ошибок контроля одного типа, а при использовании более сложных логических схем — вероятность ошибок обоих типов. В зависимости от требований к показателям достоверности контроля параметра  $E$ ,  $L$  и  $M$  и при наличии жестких ограничений к показателю структурной избыточности  $m$  можно использовать логические схемы ИЛИ и схемы по принципу «единогласия». При необходимости получить чрезвычайно малые значения  $E$ ,  $L$  и  $M$  и возможности использования  $m=3$  и более одинаковых ИП целесообразно применять схему по принципу «большинства».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Р. Харченко. Аналоговые измерительные преобразователи.— Автометрия, 1965, № 1.
2. Н. А. Шишенок, В. Ф. Репкин, Л. Л. Барвинский. Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники. М., изд-во «Советское радио», 1964.

*Поступила в редакцию  
7 октября 1965 г.,  
окончательный вариант —  
17 ноября 1965 г.*