АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
АВТОМЕТРИЯ

№ 5 1965

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 681.20

Г. С. БРИТОВ, М. Б. ИГНАТЬЕВ
(Ленинград)

ИЗБЫТОЧНОСТЬ В СЛОЖНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Предлагается способ введения в измерительную систему с избыточностью линейных контрольных тестов, непосредственно входящих в алгоритм системы. Рассматривается случай коррекции избыточного комплекса датчика и пример использования линейных контрольных тестов при создании двухкоординатного построителя.

Под измерительной информационной системой [1] обычно понимается сложный комплекс, объединяющий объект, систему датчиков, воспринимающих информацию от него, и устройство обработки информации (вычислительную машину). В каждом из этих узлов возможны различные неисправности; кроме того, сигналы в них подвергаются воздействию помех.

В связи с этим возникает задача повышения надежности и точности как отдельных частей, так и всего комплекса в целом. Ниже рассматриваются вопросы введения избыточности в измерительный информационный вычислительный комплекс для решения этой задачи.

В работах [2, 3] предложен метод избыточных переменных, позволяющий повышать точность и функциональную надежность вычислительных устройств, решающих конечные и дифференциальные уравнения. Метод позволяет построить вычислительный процесс так, чтобы одновременно с основной задачей устройство решало бы и простую задачу (контрольный тест), результат которой заранее известен. В простейшем случае контрольный тест может быть линейным. Чем теснее «перемешаны» в вычислительном устройстве основная и контрольная задачи, тем полнее контроль. В вычислительном устройстве, построенном на основе указанного метода, можно осуществлять не только контроль, но и коррекцию решения по ошибкам, выявляемым контрольным тестом. Способ, позволяющий совмещать основную задачу с контрольной, заключается во введении избыточных переменных, которые связаны с исходными переменными, например, линейными соотношениями. Появившаяся неопределенность в решении позволяет наложить контрольные условия.

Допустим, что вычислительное устройство должно решать систему линейных дифференциальных уравнений вида

$$\frac{d}{dt} X = BX, \tag{1}$$

где

$$X = \left\| \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{matrix} \right\| \qquad B = \left\| \begin{matrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} \end{matrix} \right\|$$

С помощью линейного преобразования

$$X = AY, \tag{2}$$

где

$$Y = \left\| \begin{matrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_l \end{matrix} \right\| \qquad A = \left\| \begin{matrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1l} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2l} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nl} \end{matrix} \right\|, \; l > n$$

переходим к системе переменных $y_1, y_2, \dots, y_l$. Поскольку число новых переменных больше числа уравнений, то появившуюся неопределенность можно снизить или исключить полностью, если наложить систему контрольных условий, например, линейных:

$$MY = 0, \tag{3}$$

где

$$M = \left\| \begin{matrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1l} \\ m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2l} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ m_{K1} & m_{K2} & \dots & m_{Kl} \end{matrix} \right\| \qquad K = l -$$

Условием непротиворечивости основной задачи и контрольных условий является

$$\delta = \left| \begin{matrix} A \\ M \end{matrix} \right| \neq 0. \tag{4}$$

Можно показать, что система дифференциальных уравнений, решаемых вычислительным устройством, в этом случае будет следующей:

$$\frac{d}{dt} Y = CY, \tag{5}$$

где

$$C = \left\| \begin{matrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1l} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2l} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ c_{l1} & c_{l2} & \dots & c_{ll} \end{matrix} \right\|$$

Матрица C строится как

$$C = \frac{1}{\delta} \Lambda BA, \tag{6}$$

где

$$\Lambda = \begin{Vmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \ldots & \delta_{n1} \\ \delta_{12} & \delta_{22} & \ldots & \delta_{n2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \delta_{1l} & \delta_{2l} & \ldots & \delta_{nl} \end{Vmatrix}$$

Матрица Λ есть матрица алгебраических дополнений δ_{11}, δ_{21} и т. д. определителя δ по элементам a_{11}, a_{21} и т. д.

Появление помех при вычислительном процессе

$$\frac{d}{dt} Y = CY + P, \tag{7}$$

где

$$P = \begin{Vmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_l \end{Vmatrix}$$

может привести к появлению ошибок в контрольных условиях

$$MY = \Delta, \tag{8}$$

где

$$\Delta = \begin{Vmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \vdots \\ \Delta_K \end{Vmatrix}$$

Отклонения от нуля контрольных условий свидетельствуют о появлении помех в вычислительном процессе.

Если замкнуть обратную связь по ошибкам $\Delta_1, \Delta_2, \ldots, \Delta_k$, то это позволит не только контролировать, но и корректировать ход вычислительного процесса. Система дифференциальных уравнений, решаемых с контролем и коррекцией, будет иметь вид

$$\frac{d}{dt} Y = CY - K\Delta + P, \tag{9}$$

где

$$K = \begin{Vmatrix} k_{11} & k_{12} & \ldots & k_{1K} \\ k_{21} & k_{22} & \ldots & k_{2K} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ k_{l1} & k_{l2} & \ldots & k_{lK} \end{Vmatrix} \quad k_{11} = m_{11}\beta;\ k_{12} = m_{12}\beta;\ k_{13} = m_{13}\beta \text{ и т. д.};$$

β — коэффициент усиления в цепи обратной связи.

Для оценки эффективности рассматриваемого метода представим пространство $(y_1, y_2, \ldots; y_l)$, в котором система уравнений (7) задает траекторию движения изображающей точки. Помехи $P_1, P \ \ldots, P_l$ являются проекциями вектора $\overline{P} = \sum_{i=1}^{l} \overline{P}$ на оси координат. Если вектор

$\overline{P}$ разложить на составляющие: $\overline{R}$, параллельную пересечению контрольных плоскостей (3) и $\overline{N}$ $(j = \overline{1, K})$, перпендикулярные к соответствующей контрольной плоскости, то можно показать, что на решение будет влиять лишь параллельная составляющая вектора $\overline{P}$:

$$\frac{d}{dt} \boldsymbol{Y} = \boldsymbol{C}\boldsymbol{Y} + R. \tag{10}$$

Переход $Y \rightarrow X$ осуществляется с помощью преобразования (2), причем результат решения $x_\alpha(t)$ $(\alpha = 1, n)$ будет искажен лишь помехами $R_1, R_2, \ldots, R_l$.

Коэффициенты $a_{11}, a_{12}, \ldots, a_{nl}$, а также коэффициенты контрольных условий $m_{11}, m_{12}, \ldots, m_{Kl}$ можно задавать так, чтобы минимизировать влияние помех $R_1, R_2, \ldots, R_l$ на результат решения вычислительного устройства.

Однако если входная информация, поступающая от датчиков, неверна, то она не может быть исправлена только устройством обработки информации, каким бы точным и помехоустойчивым оно ни было. Поэтому важно обеспечить необходимую точность датчиков входной информации. Эти датчики часто являются сложными устройствами, представляющими последовательно-параллельное соединение звеньев, преобразующих измеряемый физический параметр объекта, как правило, в электрический сигнал.

Предположим, что, каким бы сложным ни был датчик, алгоритм функционирования его может быть представлен в виде

$$y = k_{д} x. \tag{11}$$

Рассмотрим организацию избыточности таких датчиков входной информации с позиций метода избыточных переменных. Пусть результат измерения, который должен соответствовать (11), получается как сумма результатов измерения n датчиков

$$y_i = k_i x \tag{12}$$

с определенными весовыми коэффициентами a_i, т. е.

$$y = \sum_{i=1}^{n} a_i y_i = k_{д} x. \tag{13}$$

На n параллельно работающих датчиков можно наложить $k=n-1$ контрольных условий, например, линейных:

$$\sum_{i=1}^{n} m_{ji} y_i = 0, \quad j = \overline{1, K}. \tag{14}$$

Вид передаточных коэффициентов датчиков k_i определяется после решения системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} a_1 y_1 + a_2 y_2 + \ldots + a_n y_n = k_{д} x; \\ m_{11} y_1 + m_{12} y_2 + \ldots + m_{1n} y_n = 0; \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ m_{K1} y_1 + m_{K2} y_2 + \ldots + m_{Kn} y_n = 0. \end{cases} \tag{15}$$

Если главный определитель системы соответствует

$$\delta = \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & \ldots & a_n \\ m_{11} & m_{12} & \ldots & m_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ m_{K1} & m_{K2} & \ldots & m_{Kn} \end{vmatrix} \neq 0 \qquad (16)$$

то система совместна и можно получить

$$y_i = \frac{\delta_i}{\delta} k_д x, \qquad (17)$$

где δ_i — алгебраическое дополнение определителя δ по элементу a_i.

Следовательно,

$$k_i = \frac{\delta_i}{\delta} k_д. \qquad (18)$$

Итак, если в измерительный комплекс, осуществляющий преобразование (11), объединить датчики, построенные согласно (17) и (18), то их сигналы y_i будут не только обеспечивать (11), но и удовлетворять контрольным условиям (14).

Всякое отклонение от заданного линейного закона датчика (18) ведет к ошибке

$$y_i = k_i x + P_i. \qquad (19)$$

При этом контрольные условия могут нарушаться:

$$\sum_{i=1}^{n} m_{ji} y_i = \Delta_j, \quad j = \overline{1, K}.$$

Если замкнуть обратную связь по ошибкам контрольных условий

$$y_i = k_i x - \sum_{j=1}^{k} k_{ji} \Delta_j + P_i, \qquad (20)$$

где $k_{ji} = m_{il} \beta$, а β — коэффициент усиления в цепи обратной связи, то, как упоминалось выше, на измерение будет влиять только составляющая $\overline{R}$ вектора ошибки $\overline{P} = \sum_{=1}^{n} \overline{P}_i$, параллельная линии пересечения контрольных плоскостей. Составляющие $\overline{N}_j$ $(j = \overline{1, K})$, перпендикулярные к соответствующим контрольным плоскостям, будут скорректированы.

Блок-схема измерительного устройства, построенного на основе рассмотренного выше метода, показана на рис. 1 (цепь коррекции изображена пунктиром). Следует отметить, что способ введения коррекции зависит от конструктивных особенностей датчиков. В случае, если в датчике коррекцию осуществить невозможно, составляющие $\overline{N}_j$ $(1 = \overline{1, K})$ вектора ошибок $\overline{P}$ можно исключить из результата измерения, выбрав коэффициенты a_i $(i = \overline{1, n})$ и m_{ji} $(j = \overline{1, K};\ i = \overline{1, n})$ так, чтобы выполнялись условия

$$\sum_{i=1}^{n} a_i m_{ji} = 0, \quad j = \overline{1, K}. \qquad (21)$$

В отличие от коррекции подобная фильтрация не компенсирует составляющие N_j $(j=\overline{1,K})$, а просто исключает их при осуществлении операции «сжатия» в сумматоре Σ_0 (см. рис. 1).

Эффективность измерительных комплексов рассматриваемого вида зависит от взаимного расположения векторов $\overline{N}_j$ $(j=\overline{1,K})$ и $\overline{R}$. Измерительный комплекс тем эффективнее, чем ближе вектор P к направлению, перпендикулярному к пересечению контрольных плоскостей. В этом случае удельный вес вектора $\overline{R}$ оказывается малым. Если вектор $\overline{P}$ располагается ближе к направлению, которое параллельно пересечению контрольных плоскостей, то удельный вес вектора R увеличивается и комплекс становится неэффективным.

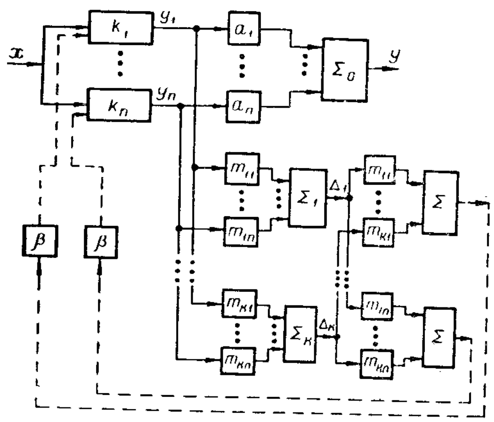

Рис. 1. Структурная схема измерительного комплекса:

Σ_0 — сумматор результата измерения; $\Sigma_1, \ldots, \Sigma_K$ — контрольные сумматоры.

Для приближенной оценки эффективности измерительных комплексов рассмотрим частный случай:

$$N_1 = N_2 = \ldots = N_K = R. \tag{22}$$

Тогда

$$P = R\sqrt{K+1} = R\sqrt{n}. \tag{23}$$

В этом случае эффективность комплекса определяется

$$\Psi = \frac{R}{P} = \frac{1}{\sqrt{n}}. \tag{24}$$

Графически эта зависимость показана на рис. 2. Измерительный комплекс тем эффективнее, чем больше датчиков входит в него. Но обычно увеличение числа датчиков ограничивается их конструктивными особенностями, и повышать эффективность комплекса только за счет увеличения числа датчиков нецелесообразно. Следует уменьшать влияние невыявляемых ошибок $R_1, R_2, \ldots, R_n$ на результат измерения специальным подбором коэффициентов a_i $(i=\overline{1,n})$ и m_{ij} $(j=\overline{1,K};\ i=\overline{1,n})$. Однако вопрос об оптимальном построении измерительных комплексов является весьма сложным и должен служить темой специального обсуждения.

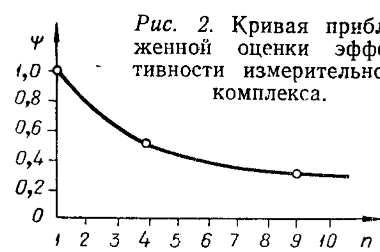

Рис. 2. Кривая приближенной оценки эффективности измерительного комплекса.

Контроль за работой системы датчиков, организованный вышеуказанным способом, позволяет осуществлять диагностику отказавшего датчика при $n \geqslant 3$. Под отказом датчика будем понимать превышение его погрешностью заданной величины. Если в каждый момент времени может наступить один и только один отказ, то матрицу коэффициентов контрольных условий можно задать так, что по ошибкам контрольных условий оказывается возможным судить о том, какой из n датчиков отказал [3]. Например, для $n=3$ матрицу коэффициентов контрольных условий можно принять в виде

$$M=\begin{Vmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \end{Vmatrix}$$

В этом случае возможна следующая логика отказавшего датчика:

если $\Delta_1 \neq 0$, $\Delta_2=0$, то действует P_1;

если $\mathrm{sign}\Delta_1=\mathrm{sign}\Delta_2$, то действует P_2;

если $\mathrm{sign}\Delta_1 \neq \mathrm{sign}\Delta_2$, то действует P_3.

$$\begin{aligned} y_1 &= \frac{2}{\delta} k_д x - \alpha_1 \Delta_1; \\ y_2 &= -\frac{1}{\delta} k_д x - \alpha_2 \Delta_1; \\ y_3 &= \frac{1}{\delta} k_д x + \alpha_3 \Delta_1. \end{aligned} \tag{25}$$

Здесь α_i $(i=1, 2, 3)$ — функции, принимающие значения либо 0, либо 1 в зависимости от вида матрицы M и соотношения между Δ_1 и Δ_2.

Логическое устройство, управляющее функциями α_i $(i=1, 2, 3)$, может иметь следующий алгоритм функционирования:

```
Begin   real array alfa [1 : 3]
                   delta [1 : 2]
        integer 1, 2, 3;
read    real array alfa [1 : 3]
                   delta [1 : 2]
        integer 1, 2, 3.
if      delta [1]=delta [2]=0 then
        alfa [1 : 3] : =0 stop else go to M;
M: if   delta [1]≠0 ∧ delta [2]=0 then
        alfa [1] : =1, alfa [1] : =0;
if      sign (delta [1]) =sign (delta [2])
        then alfa [2] : =1, alfa [3] : =0
        else alfa [2] : =0, alfa [3] : =1;
end
```

Таким образом, измерительный комплекс, поведение которого описывается (15), а датчики, составляющие комплекс, описываются уравнениями (17) — (19), способен контролировать и корректировать свою работу, исключая или компенсируя в результате измерения все ошибки, выявляемые системой контрольных условий (14).

Поскольку речь идет о сложных измерительных информационных системах, то вопросы контроля и коррекции измерительных комплексов должны решаться устройством обработки информации, в котором могут формироваться контрольные условия, цепи коррекции, логические устройства кодовой коррекции и др. Более того, избыточность выходной информации может быть использована для синтеза помехоустойчивых алгоритмов функционирования самого устройства обработки информации.

Рассмотренный метод организации избыточности в сложных измерительных информационных системах позволяет бороться с ошибками, возникающими в процессе выполнения ими заданного алгоритма функционирования. Процесс контроля и коррекции, как было показано выше, может охватить систему датчиков и устройство обработки информации. Однако тщательное исследование поведения объекта иногда позволяет увеличить его подвижность. Избыточность, выявленная в поведении объекта, приведет к тому, что контролем и коррекцией может быть охвачено все поведение измерительной информационной системы в целом, что значительно улучшает качество контроля и коррекции [2, 3].

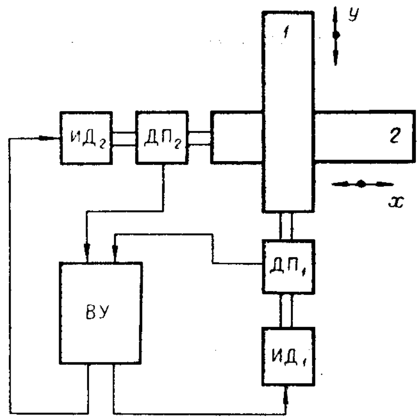

Рис. 3. Структурная схема двухкоординатного построителя:

ВУ — вычислительное устройство; ДП — датчики положения; ИД — исполнительные двигатели; 1, 2 — подвижные планки.

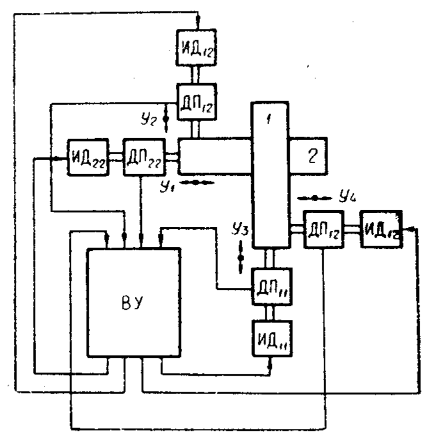

Рис. 4. Структурная схема двухкоординатного построителя с избыточностью.

В качестве примера такого объекта рассмотрим автоматический двухкоординатный построитель (рис. 3). Вычислительное устройство работает по такой программе, что суммарное перемещение точки пересечения планок *1* и *2* соответствует кривым.

$$F(x,\ y)=0. \tag{26}$$

Планки *1* и *2* могут перемещаться во взаимно перпендикулярных направлениях (указано стрелками). Точность воспроизведения кривых $F(x,\ y)=0$ зависит от точности датчиков положения, вычислительного устройства и исполнительных двигателей.

На рис. 4 показана аналогичная система, но каждая из планок *1* и *2* уже имеет возможность перемещаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Число датчиков положения и исполнительных двигателей увеличилось вдвое. Однако процесс построения кривых $F(y_1,\ y_2,\ y_3,\ y_4)$ может быть охвачен двумя контрольными условиями:

$$\begin{aligned} m_{11}y_1+m_{12}y_2+m_{13}y_3+m_{14}y_4&=0; \\ m_{21}y_1+m_{22}y_2+m_{23}y_3+m_{24}y_4&=0, \end{aligned} \tag{27}$$

по которым можно судить о работе всей системы в целом.

Таким образом, целесообразное введение избыточности в измерительные информационные системы и правильное ее использование позволяют осуществить непрерывный контроль и коррекцию их в процессе работы. Это уменьшает, а в некоторых случаях вообще исключает время, необходимое для контроля исправности системы, повышает точность и надежность функционирования систем при использовании менее точных и надежных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. Б. Карандеев. Измерительные информационные системы и автоматика.— Вестник АН СССР, 1961, № 10.
2. М. Б. Игнатьев. Голономные автоматические системы. М.—Л., Изд-во АН СССР. 1963.
3. М. Б. Игнатьев, В. В. Михайлов. Метод повышения функциональной надежности и точности вычислительных устройств. Л., Изд-во ЛДНТП, 1964.

Поступила в редакцию
9 марта 1965 г.,
после переработки —
16 июня 1965 г.