

А. М. ЯКУБОВИЧ

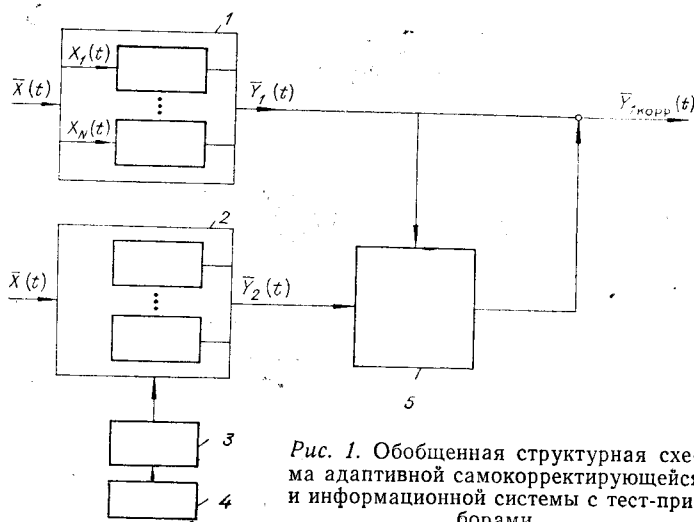
(Москва)

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ В АДАПТИВНЫХ САМОКОРРЕКТИРУЮЩИХСЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С ТЕСТ-ПРИБОРОМ

Постановка задачи. В целом ряде задач необходимо получить точные данные о сигналах в широком диапазоне условий измерения. Эта проблема может быть решена путем создания информационных систем, адаптивных к внешним воздействиям, в которых приспособление достигается за счет выявления и автоматической компенсации погрешностей в процессе измерения. Информация о погрешностях может быть получена путем обработки реакций приборов на эталонные воздействия. В известных методах идентификации погрешностей [1—3] эталонным воздействиям подвергаются непосредственно приборы, сигналы с которых представляют выходную информацию. При этом в выходных цепях приборов появляются нежелательные сигналы в виде реакций на эталонные воздействия. Для исключения их и повышения точности определения погрешностей приборы приходится периодически отключать, что не всегда возможно и приводит к ухудшению динамики.

В работе рассматривается новое направление, основанное на использовании избыточной информации, позволяющее исключить подачу эталонных воздействий на основные измерительные приборы. Это дает возможность построить информационные системы, в которых сочетаются быстродействие и высокая точность в широком интервале внешних воздействий.

В информационной системе такого типа (рис. 1) имеется основной комплекс приборов 1, число которых равно числу компонентов вектора измеряемых сигналов $\bar{X}(t)$. Комплекс приборов 1 производит непрерывные измерения $\bar{X}(t)$, не подвергается эталонным воздействиям и не коммутируется. Кроме того, имеется дополнительный комплекс приборов 2, состоящий из тест-приборов, измеряющих в заданной последовательности компоненты вектора $\bar{X}(t)$. В частности, может использоваться один тест-прибор.



На комплекс 2 периодически подаются различные эталонные воздействия от блока 3 по командам программного устройства 4. Сигналы всех приборов поступают в вычислитель 5, где на основании данных об уравнениях погрешностей и текущей информации определяются погрешности основного комплекса в i периоде ($i = \overline{1, 2}$) и прогнозируемые погрешности в $i+1$ периоде.

Выходной информацией системы служат откорректированные сигналы приборов основного комплекса. Самокорректирующиеся системы рассматриваемого типа не исследованы.

Необходимо осветить вопросы идентификации погрешностей, оптимизации способов задачи эталонных воздействий, формирования компенсирующих сигналов и другие.

В данной работе исследуются вопросы идентификации погрешностей в однокомпонентной системе.

Идентификация линейных погрешностей. Рассмотрим систему, предназначенную для измерения сигнала $X(t)$. В системе используется один основной прибор и один дополнительный тест-прибор. Для выяснения существа дела вначале проследим процесс идентификации погрешностей на простом примере, когда приборы безынерционны, а их некорректированные сигналы, которые мы назовем первичными, выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned} Y_1(t) &= X(t) + \varphi_1(t), \\ Y_2(t) &= X(t) + \varphi_2(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$ — погрешности, равные $\varphi_s(t) = a_s + b_s X(t)$ (a_s , b_s — искомые случайные величины, которые необходимо определить при помощи задания эталонных воздействий на тест-прибор 2, $s = \overline{1, 2}$). Предполагается, что подача эталонных воздействий не сопровождается изменением погрешностей. На прибор 2 подаются эталонные воздействия в виде сигнала X_s и изменения его коэффициента усиления от 1 до $\alpha \neq 1$,

Произведем отсчет показаний приборов в четыре момента времени t_1, t_2, t_3, t_4 в четырех интервалах, образующих в сумме период. На первом и втором интервале эталонные воздействия не задаются, на третьем коэффициент усиления тест-прибора изменяется от 1 до $\alpha \neq 1$, в четвертом на его вход попадает сигнал X_s . В результате фиксации сигналов получается совместная система уравнений вида:

$$\begin{aligned} Y_1(t_1) &= X(t_1) + b_1 X(t_1) + a_1; & Y_1(t_2) &= X(t_2) + b_1 X(t_2) + a_1; \\ Y_2(t_1) &= X(t_1) + b_2 X(t_1) + a_2; & Y_2(t_2) &= X(t_2) + b_2 X(t_2) + a_2; \\ Y_1(t_3) &= X(t_3) + b_1 X(t_3) + a_1; & Y_1(t_4) &= X(t_4) + b_1 X(t_4) + a_1; \\ Y_2(t_3) &= \alpha X(t_3) + \alpha b_2 X(t_3) + a_2; & Y_2(t_4) &= X(t_4) + X_s b_2 [X(t_4) + X_s] + a_2. \end{aligned}$$

Исключая $X(t_1)$, $X(t_2)$, $X(t_3)$, $X(t_4)$ и решая относительно a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , получим:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{1}{1-\alpha} \{ Y_1(t_1) - \alpha Y_1(t_3) - r(t_1, t_2) [Y_2(t_1) - Y_2(t_3)] \}; \\ a_2 &= \frac{1}{1-\alpha} \left\{ Y_2(t_1) - \alpha Y_2(t_3) + \frac{\alpha}{r(t_1, t_2)} [Y_1(t_1) - Y_1(t_3)] \right\}; \\ b_1 &= \frac{1}{X_s} \{ [Y_2(t_4) - Y_2(t_1)] r(t_1, t_2) - Y_1(t_4) + Y_1(t_1) \}, \\ b_2 &= \frac{1}{X_s} \left\{ - [Y_1(t_4) - Y_1(t_1)] \frac{1}{r(t_1, t_2)} + Y_2(t_4) - Y_2(t_1) \right\}, \end{aligned}$$

где

$$r(t_1, t_2) = \frac{Y_1(t_1) - Y_1(t_2)}{Y_2(t_1) - Y_2(t_2)}.$$

Совместность уравнений в отношении аддитивных погрешностей a_s достигается путем изменения коэффициента усиления тест-прибора, а в части мультипликативных погрешностей b_s — за счет задания сигнала X_s .

Если предположить, что за два последующих периода погрешности не меняются, то полученные значения величин a_s, b_s могут быть использованы в следующем периоде для коррекции сигналов.

Таким образом, подача эталонных воздействий на тест-прибор позволяет выявить и скомпенсировать погрешности основного прибора. Перейдем к более общему случаю, когда приборы предназначены для измерения $X(t)$ с заданной передаточной функцией $K(p)$. Изображение идеального выходного сигнала равно

$$Y^0(p) = K(p)X(p).$$

Изображение первичных сигналов в i периоде равняется

$$Y_{si}(p) = Y_i^0(p) + \varphi_{si}(p), \quad s = 1, 2, \quad (2)$$

где индекс i указывает номер периода. Изображение погрешности

$$\varphi_{si}(p) = \Delta K_{si}(p)X_i(p) + a_{is}(p). \quad (3)$$

Здесь $\Delta K_{si}(p)$ — погрешность оператора прибора с номером s ; $a_{is}(p)$ — изображение аддитивной погрешности; $X_i(p)$ — изображение сигнала $X(t)$ в i периоде.

Погрешность оператора вызвана нестабильностью $\Delta \bar{q}'_{si}$ n -мерного вектора \bar{q} параметров, от которых зависит передаточная функция $K(\bar{p})$. В линейном приближении

$$\Delta K_{si}(p) = \left| \frac{\partial K(p)}{\partial \bar{q}} \right|_{\bar{q}=\bar{q}^0} \Delta \bar{q}'_{si}, \quad (4)$$

где \bar{q}^0 — номинальный вектор параметров.

С учетом (4) изображение погрешности приводится к виду

$$\varphi_{si}(p) = \bar{Q}(p) \Delta \bar{q}'_{si} Y_i^0(p) + a_{si}(p). \quad (5)$$

Здесь $\bar{Q}(p) = \left| \frac{\partial K(p)}{\partial \bar{q}} \right|_{\bar{q}=\bar{q}^0} \frac{\bar{q}^0}{K(p)}$ — вектор операторов влияния параметров; $\Delta \bar{q}'_{si} = \frac{\Delta \bar{q}_{si}}{\bar{q}^0}$ — вектор нестабильностей в безразмерной форме.

Подставив (5) в (2) и перейдя к обратному преобразованию, получим

$$Y_{si}(\tau) = Y_i^0(\tau) + \bar{W}_i(\tau) \Delta \bar{q}'_{si} + a_{si}(\tau), \quad (6)$$

где $\tau = t - T(i-1)$ — текущее время в i периоде длительностью T ;

$$\bar{W}_i(\tau) = L^{-1} [\bar{Q}(p) Y_i^0(p)], \quad (7)$$

L^{-1} — оператор обратного преобразования.

Аддитивную погрешность приборов, как правило, можно представить в виде суммы двух величин: низкочастотной погрешности с полосой частот, не превышающей десятых и даже сотых долей герца, и высокочастотного шума. В большинстве применений существенна низкочастотная погрешность. Особенно важно снижение этой погрешности в схемах с последующим интегрированием сигналов. Высокочастотные шумы, фильтруемые методами, известными в теории автоматического управления, мы не будем принимать во внимание. Низкочастотные по-

грешности в течение i периода можно представить в виде степенных рядов времени

$$\bar{a}_{si}(\tau) = \sum_{j=0}^m a_{si}^{(j)} \tau^j, \quad (8)$$

где $a_{si}^{(j)}$ — постоянные величины в течение i периода. В матричной форме

$$\bar{a}_{si}(\tau) = \bar{R}(\tau) \bar{a}_{si}, \quad (9)$$

где $\bar{R}(\tau) = [1, \tau, \dots, \tau^m]$ — матрица-строка, $\bar{a}_{si} = [a_{si}^{(0)}, a_{si}^{(1)}, \dots, a_{si}^{(m)}]$ — матрица-столбец.

Компенсация погрешностей в $i+1$ периоде производится на основании данных о прогнозируемых погрешностях $\hat{\varphi}_{s,i+1}(\tau)$, вычисляемых в соответствии с заданными уравнениями.

В уравнениях для $\hat{\varphi}_{s,i+1}(\tau)$ могут использоваться значения погрешностей, полученные в $k \geq 1$ предшествующих периодах. В простейшем случае учитываются лишь погрешности, найденные в i периоде. Если считать, что отличим векторов $\Delta \bar{q}_{si}$, \bar{a}_{si} в двух последующих периодах можно пренебречь, то

$$\hat{\varphi}_{s,i+1}(\tau) = \bar{W}_{i+1}(\tau) \Delta \bar{q}_{si} + \bar{R}(T+\tau) \bar{a}_{si}. \quad (10)$$

Задача заключается в идентификации векторов $\Delta \bar{q}_{si}$, \bar{a}_{si} .

Прежде чем перейти к определению этих векторов, отметим, что матрица $\bar{W}_i(\tau)$ неизвестна, поскольку неизвестны значения идеального выходного сигнала $Y_i^{(0)}(\tau)$, необходимые для ее определения. Однако если погрешности приборов считать малыми, то вместо $Y_i^{(0)}(\tau)$ можно подставить значения $Y_{si}(\tau)$. Если такое приближение недостаточно, то возможен итеративный подход, приводящий к быстрой сходимости. Общее число неизвестных коэффициентов двух приборов равно $2n+2m+2$. Для получения совместной системы уравнений для их определения на тест-прибор подаются эталонные воздействия.

Разобьем i период на два интервала. В первом интервале на вход тест-прибора подается эталонная функция времени $Y_s(\tau)$ и производится $2n+m+1$ отсчетов показаний приборов. Во втором интервале изменяется коэффициент тест-прибора до значения $\alpha \neq 1$ и производится $m+1$ отсчетов показаний приборов. В результате получится следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{1i}(1) &= \bar{Y}_i^0(1) + \bar{W}_i(1) \Delta \bar{q}_{1i} + \bar{R}(1) \bar{a}_{1i}; \\ \bar{Y}_{2i}(1) &= \bar{Y}_i^0(1) + \bar{Y}_s + [\bar{W}_i(1) + \bar{W}_s] \Delta \bar{q}_{2i} + \bar{R}(1) \bar{a}_{2i}; \\ \bar{Y}_{1i}(2) &= \bar{Y}_i^0(2) + \bar{W}_i(2) \Delta \bar{q}_{1i} + \bar{R}(2) \bar{a}_{1i}; \\ \bar{Y}_{2i}(2) &= \alpha \bar{Y}_i^0(2) + \alpha \bar{W}_i(2) \Delta \bar{q}_{2i} + \bar{R}(2) \bar{a}_{2i}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $\bar{Y}_i^0(1)$, $\bar{Y}_{1i}(1)$, $\bar{Y}_{2i}(1)$, $\bar{Y}_i^0(2)$, $\bar{Y}_{1i}(2)$, $\bar{Y}_{2i}(2)$ — векторы показаний при отсчетах на 1 и 2 интервалах; \bar{Y}_s — вектор значений эталонной функции времени; $\bar{W}_i(1)$, $\bar{R}(1)$, $\bar{W}_i(2)$, $\bar{R}(2)$ — матрицы, составленные из матриц-строк $\bar{W}(\tau_i)$, $\bar{R}(\tau_i)$; \bar{W}_s — матрица, составленная из матриц-строк $\bar{W}_s(\tau_i)$, $\bar{W}_s(\tau_i) = L^{-1}[\bar{Q}(p)Y_s(p)]$.

В ряде случаев в качестве показаний при отсчетах вместо мгновенных значений целесообразно брать усредненные значения сигналов на фиксированных отрезках времени.

Исключая из уравнений (11) $\bar{Y}_i^0(1)$ и $\bar{Y}_i^0(2)$, находим уравнения для идентификации $\Delta \bar{q}_{si}$, \bar{a}_{si} в виде

$$\bar{Y}_{1i}(1) - \bar{Y}_{2i}(1) + \bar{Y}_s = \bar{W}_i(1) \delta \bar{q}_i - \bar{W}_s \Delta \bar{q}_{2i} + \bar{R}(1) \Delta \bar{a}_i; \quad (12)$$

$$\alpha \bar{Y}_{1i}(2) - \bar{Y}_{2i}(2) = \alpha \bar{W}_i(2) \delta \bar{q}_i + \bar{R}(2) \bar{e}_i, \quad (13)$$

где

$$\delta \bar{q}_i = \Delta \bar{q}_{1i} - \Delta \bar{q}_{2i}, \quad \Delta \bar{a}_i = \bar{a}_{1i} - \bar{a}_{2i}, \quad \bar{e}_i = \alpha \bar{a}_{1i} - \bar{a}_{2i}.$$

Матричное уравнение (12) представимо таким образом:

$$\bar{Y}_{1i}(1) - \bar{Y}_{2i}(1) + \bar{Y}_0 = \bar{c}(1) \bar{b},$$

где $\bar{b} = [\delta \bar{q}_i, \Delta \bar{q}_{2i}, \Delta \bar{a}_i]$ — вектор неизвестных величин; $\bar{c}(1) = [\bar{W}_i(1) - \bar{W}_0 \bar{R}(1)]$ — матрица системы уравнений, составленная из подматриц $\bar{W}_i(1) - \bar{W}_0 \bar{R}(1)$.

Покажем, что в общем случае матрица $\bar{c}(1)$ может быть сделана невырожденной. Столбцы в матрицах $\bar{W}_i(1)$, \bar{W}_0 могут быть зависимы, так как операторы влияния, соответствующие различным составляющим вектора \bar{q} , могут быть связаны. В этом случае существуют такие весовые коэффициенты β_r , не все равные нулю, что справедливо равенство

$$\sum_{r=1}^n \beta_r Q_r(p) = 0.$$

Пусть n_1 операторов выражаются через $n_2 = n - n_1$. Исключим из исходных уравнений (4) слагаемые, соответствующие зависимым операторам. Оставшиеся операторы будут независимы. При этом неустойчивости, соответствующие исключенным операторам, будут определены как части вычисленных неустойчивостей при оставшихся операторах. После исключения зависимых операторов столбцы в подматрицах $\bar{W}_i(1)$, $-\bar{W}_0$, соответствующие разным операторам, будут независимы. Поскольку сигналы $Y_{1i}(\tau) - Y_{2i}(\tau)$ и $Y_0(\tau)$ не связаны, столбцы в подматрицах $\bar{W}_i(1)$ и $-\bar{W}_0$, соответствующие одинаковым операторам влияния, независимы. Столбцы подматрицы $\bar{R}(1)$ независимы, так как представляют значения разных координатных функций базиса разложения в ряд Тейлора в пространстве функции аргумента τ . Независимость строк матрицы $\bar{c}(1)$ достигается выбором разных значений эталонной функции времени $Y_0(\tau)$ при отсчетах. Кроме того, независимы строки подматрицы $\bar{R}(1)$, соответствующие разным моментам времени.

Отметим, что в частных случаях возможна зависимость столбцов в подматрице $\bar{W}_i(1)$. Например, это произойдет, если $X_i(\tau) = \text{const}$ в течение всего интервала. Таким образом, в общем случае матрица $\bar{c}(1)$ невырожденная. Следовательно, имеет место решение для \bar{b} в виде

$$\bar{b} = \bar{c}^{-1}(1) [\bar{Y}_{1i} - \bar{Y}_{2i} - \bar{Y}_0]. \quad (14)$$

Уравнения (13) перепишем таким образом:

$$\alpha \bar{Y}_{1i}(2) - \bar{Y}_{2i}(2) - \alpha \bar{W}_i(2) \delta \bar{q}_i = \bar{R}(2) \bar{e}. \quad (15)$$

Слагаемые в левой части уравнения (15) известны, матрица $\bar{R}(2)$, аналогичная подматрице $\bar{R}(1)$, квадратная и невырожденная, следовательно,

$$\bar{e} = \bar{R}^{-1}(2) [\alpha \bar{Y}_{1i}(2) - \bar{Y}_{2i}(2) - \alpha \bar{W}_i(2) \delta \bar{q}_i]. \quad (16)$$

Из уравнений

$$\Delta \bar{a}_i = \bar{a}_{1i} - \bar{a}_{2i}, \quad \bar{e} = \alpha \bar{a}_{1i} - \bar{a}_{2i}$$

имеем

$$\bar{a}_{1i} = \frac{\Delta \bar{a}_i - \bar{e}_i}{1 - \alpha}; \quad \bar{a}_{2i} = \frac{\alpha \Delta \bar{a}_i - \bar{e}}{1 - \alpha}. \quad (17)$$

Выражения (14), (16), (17) дают значения искомых величин. Таким образом, подача эталонных воздействий на тест-прибор позволяет идентифицировать погрешности основного прибора. По формуле (10)

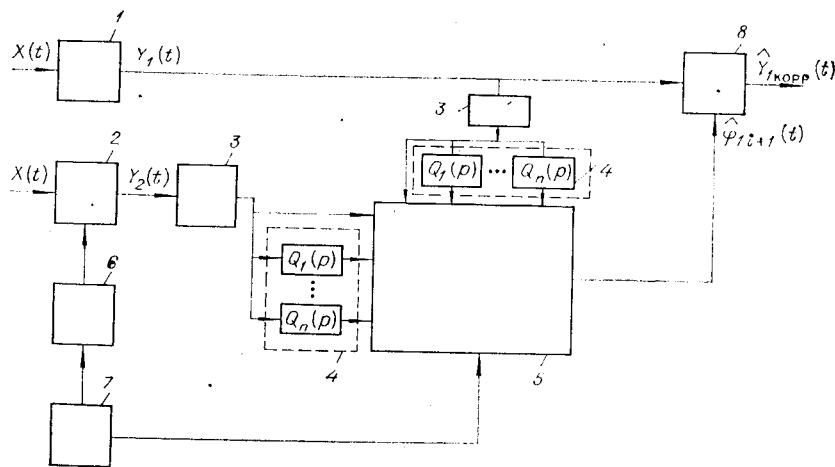


Рис. 2. Структурная схема однокомпонентной информационной системы с автокомпенсацией линейных погрешностей.

определяется прогнозируемое значение погрешности в $i+1$ периоде и производится ее компенсация.

Структурная схема однокомпонентной системы с автокомпенсацией линейных погрешностей приведена на рис. 2. Сигналы приборов 1, 2 предварительно фильтруются фильтром 3 для снятия высокочастотных шумов. Далее сигналы пропускаются через фильтры 4, соответствующие вектору операторов влияния $\bar{Q}(p)$, и подаются на вычислитель 5. Туда же подаются сигналы приборов после фильтра 3.

На тест-прибор периодически подаются эталонные воздействия блока 6 по командам программного устройства 7. В вычислителе определяются прогнозируемые значения погрешности основного прибора в $i+1$ периоде $\hat{\varphi}_{1,i+1}(\tau)$.

Корректор 8 по данным о $\hat{\varphi}_{1,i+1}(\tau)$ производит компенсацию погрешностей. На выход системы поступает откорректированный сигнал прибора 1.

Идентификация нелинейных погрешностей. Пусть производится безынерционное измерение сигнала $X(t)$, а первичные сигналы имеют вид (1), где $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$ — нелинейные погрешности, которые в i периоде можно представить в виде степенных рядов от $X_i(\tau)$:

$$\begin{aligned} \varphi_{1i}(\tau) &= \sum_{j=0}^m a_i^{(j)} [X_i(\tau)]^j; \\ \varphi_{2i}(\tau) &= \sum_{j=0}^m b_i^{(j)} [X_i(\tau)]^j. \end{aligned} \quad (18)$$

Ставится задача: при помощи задания эталонных воздействий на тест-прибор определить векторы $\bar{a}_i = [a_i^{(0)}, a_i^{(1)}, \dots, a_i^{(m)}]$, $\bar{b}_i = [b_i^{(0)}, b_i^{(1)}, \dots, b_i^{(m)}]$. Совместность уравнений для определения $a_i^{(j)}$, $b_i^{(j)}$ при $j \geq 1$ достигается путем подачи эталонных сигналов, а для определения $a_i^{(0)}$, $b_i^{(0)}$ за счет изменения коэффициента усиления тест-прибора до значения $\alpha \neq 1$. Разобьем период на два интервала.

В первом интервале подается $2m+1$ эталонных сигналов и производится $2m+1$ отсчетов показаний по одному при каждом эталонном сигнале. Во втором интервале производится один отсчет. В результате

получится следующая система уравнений:

$$\begin{aligned}\bar{Y}_{1i}(1) &= \bar{X}_i(1) + \bar{P}_{1i}(1)\bar{a}_i; \\ \bar{Y}_{2i}(1) &= \bar{X}_i(1) + \bar{P}_{2i}^3(1)\bar{b}_i + \bar{X}_3; \\ Y_{1i}(\tau_{2m+2}) &= X_i(\tau_{2m+2}) + \bar{P}_{1i}(\tau_{2m+2})\bar{a}_i; \\ Y_{2i}(\tau_{2m+2}) &= \alpha X_i(\tau_{2m+2}) + \bar{P}_{2i}^\alpha(\tau_{2m+2})\bar{b}_i,\end{aligned}\quad (19)$$

где $\bar{Y}_{1i}(1)$, $\bar{Y}_{2i}(1)$, $\bar{X}_i(1)$ — $2m+1$ -мерные векторы значений сигналов $Y_{1i}(\tau)$, $Y_{2i}(\tau)$, $X_i(\tau)$ в моменты времени $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{2m+1}$; $\bar{P}_{1i}(1)$ — матрица, составленная из матриц-строк вида

$$\bar{P}_{1i}(\tau_l) = [1, X(\tau_l), X^2(\tau_l), \dots, (X(\tau_l))^m], \quad l=1, 2, \dots, 2m+1;$$

$\bar{P}_{2i}^3(1)$ — матрица, составленная из матриц-строк вида

$$\begin{aligned}\bar{P}_{2i}(\tau_l) &= [1, X(\tau_l) + X_{3i}, \dots, (X(\tau_l) + X_{3i})^m], \\ \bar{X}_3 &= (X_{31}, X_{32}, \dots, X_{32m+1});\end{aligned}$$

$\bar{P}_{2i}^\alpha(\tau_{2m+2}) = [1, \alpha\bar{X}_i(\tau_{2m+2}), \dots, (\alpha X_i(\tau_{2m+2}))^m]$ — матрица-строка. Исключая из уравнений (19) $\bar{X}_i(1)$, $X(\tau_{2m+2})$, получим

$$\begin{aligned}\bar{Y}_{1i}(1) - \bar{Y}_{2i}(1) + \bar{X}_3 &= \bar{P}_{1i}(1)\bar{a}_i - \bar{P}_{2i}^3(1)\bar{b}_i; \\ \alpha Y_{1i}(\tau_{2m+2}) - Y_{2i}(\tau_{2m+2}) &= \alpha\bar{P}_{1i}(\tau_{2m+2})\bar{a}_i - \bar{P}_{2i}^\alpha(\tau_{2m+2})\bar{b}_i.\end{aligned}\quad (20)$$

В уравнениях (20) значения $X_i(\tau_l)$ неизвестны.

Если погрешности приборов считать малыми, то можно заменить $X_i(\tau_l)$ на $Y_{1i}(\tau_l)$.

Обозначим вектор правых частей в уравнениях (20) $\Delta\bar{Y}_i$; вектор $\bar{r}_i = [\bar{a}_i, \bar{b}_i]$; \bar{P}'_{1i} , \bar{P}'_{2i} — соответственно матрицы $\bar{P}_{1i}(1)$, $\bar{P}_{2i}^3(1)$, но с добавлениями показаний при $2m+2$ отсчете. С учетом обозначений получим

$$\Delta\bar{Y}_i = \bar{B}_i\bar{r}_i,$$

где $\bar{B}_i = [\bar{P}'_{1i}, \bar{P}'_{2i}]$ — матрица системы, состоящая из матриц \bar{P}'_{1i} , \bar{P}'_{2i} . Матрица \bar{B}_i в общем случае невырожденная. Столбцы в матрицах \bar{P}'_{1i} и \bar{P}'_{2i} , соответствующие разным степеням j , независимы, поскольку являются значениями базиса независимых функций в пространстве функций аргумента $X_i(\tau)$.

Два столбца в матрицах \bar{P}'_{1i} , \bar{P}'_{2i} , представляющие коэффициенты при аддитивных погрешностях ($j=0$), независимы, так как последний $2m+2$ член столбца матрицы \bar{P}'_{2i} равен $\alpha \neq 1$. Остальные столбцы при одинаковых степенях $j \geq 1$ в матрицах \bar{P}'_{1i} , \bar{P}'_{2i} независимы, поскольку $\bar{X}_3 \neq 0$.

Независимость строк матрицы \bar{B}_i обеспечивается выбором значений вектора \bar{X}_3 . При различных значениях компонентов вектора \bar{X}_3 строки независимы даже при $X_i(\tau) = \text{const}$. Таким образом, матрица \bar{B}_i невырожденная, следовательно, существует обратная матрица и решение представляется в виде

$$\bar{r}_i = \bar{B}_i^{-1}\Delta\bar{Y}_i.$$

Отметим, что кроме рассмотренного варианта эталонных воздействий возможны другие, в которых при $2m+1 \geq \gamma \geq 1$ отсчетах тест-прибор имеет различные коэффициенты усиления, а при остальных $2m+2 - \gamma$ отсчетах на тест-прибор подается набор различных сигналов. После вычисления \bar{a}_i , \bar{b}_i определяются прогнозируемые значения погрешности ос-

нового прибора в $i+1$ периоде $-\hat{\varphi}_{1,i+1}(\tau)$. Если можно пренебречь отличием \bar{a}_i, \bar{b}_i в двух последующих периодах, то

$$\hat{\varphi}_{1,i+1}(\tau) = \bar{a}_i \bar{P}_{1,i+1}(\tau),$$

где

$$\bar{P}_{1,i+1}(\tau) = [1, Y_{1,i+1}(\tau), (Y_{1,i+1}(\tau))^2, \dots, (Y_{1,i+1}(\tau))^m].$$

Полученные в статье результаты обобщаются на случай многокомпонентной информационной системы с одним тест-прибором, измеряющим весовую сумму сигналов компонентов вектора $\bar{X}(t)$. Можно показать, что путем изменения весовых коэффициентов и подачи эталонных сигналов могут быть идентифицированы как линейные, так и нелинейные погрешности основного комплекса приборов, измеряющих вектор $\bar{X}(t)$.

В простейшем случае тест-прибор поочередно ставится в состояния измерения компонентов параллельно приборам основного комплекса. При этом имеет место ситуация, аналогичная идентификации в однокомпонентной системе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Г. Е в л а н о в. Контроль динамических систем. М., «Наука», 1972.
2. О с н о в ы построения автоматизированных систем контроля сложных объектов. Под ред. П. И. Кузнецова. М., «Энергия», 1969.
3. А. М. Я к у б о в и ч. Методы и средства обработки информации в функционально-избыточных устройствах.— «Приборы и системы управления», 1972, № 6.

Поступила в редакцию 8 августа 1974 г.

УДК 621.317.74

Л. П. ПЛЕХАНОВ

(Москва)

ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ В ЗАДАЧАХ ДИСКРЕТНОГО КОНТРОЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

При анализе физических полей * часто встречается ситуация, когда известен вид дифференциального уравнения, но некоторые его параметры известны неточно. Иногда это происходит из-за сознательного упрощения математической модели явления (например, теплопереноса, диффузии), в результате чего значения некоторых коэффициентов заведомо неизвестны точно в рамках принятой модели. Иногда изменение параметров носит случайный характер. Во всех случаях обычно можно указать ограничения на изменение этих параметров.

Постановка задачи. Пусть поле $\Phi(r)$ описывается краевой задачей:

$$L(\Phi, \alpha) = u(r, \alpha), \quad r \in V; \quad (1)$$

$$B_i(\Phi, \alpha) = b_i(r, \alpha), \quad r \in S, \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

где $L(\Phi, \alpha)$ и $B_i(\Phi, \alpha)$ — дифференциальные операторы, линейные по Φ ;

* Под физическим полем будем понимать стационарно распределенную физическую величину, описываемую дифференциальным уравнением в частных производных и краевыми условиями.