ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА им. С. М. КИРОВА

Том 293 1977

УДК 62-53.001

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДЕКОМПОЗИЦИИ ДЛЯ СИНТЕЗА АВТОНОМНЫХ ОДНОТИПНЫХ СИСТЕМ МНОГОСВЯЗНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

В. И. КАРНАЧУК, В. А. ВОЙЛОШНИКОВ, Г. П. НАГОРНЫЙ, А. В. ЛОГУТОВ

(Представлена научным семинаром физико-технического факультета)

Среди систем многосвязного регулирования (СМР) сложных производственных процессов большое место занимает класс однотипных СМР, состоящих из нескольких идентичных каналов регулирования, работающих от общего источника сырья или на общую нагрузку.

В качестве примеров однотипных СМР укажем на электроэнергетические системы, состоящие из большого числа параллельно работающих однотипных генераторов [1], системы синхронизации винтов турбовинтовых авиационных двигателей [2], системы автоматического регулирования ядерных реакторов [3], системы автоматического распределения дутья по фурмам доменной печи [4], и т. п.

Отличительной особенностью данных систем является то, что связь между отдельными каналами регулирования может быть представлена динамическими звеньями, передаточные функции которых отличаются лишь коэффициентами усиления.

Идентичность ряда элементов передаточной матрицы однотипных СМР позволяет широко использовать для целей их анализа декомпозиционные приемы. Метод декомпозиции заключается в том, что вместо исходных взаимосвязанных СМР рассматриваются некоторые эквивалентные системы, состоящие из более простых несвязанных подсистем. Переход к эквивалентным системам выполняют таким образом, чтобы результаты исследований можно было достаточно просто пересчитать для исходной СМР [5].

Пусть о общем случае матричное уравнение движения однотипной СМР, представленной на рис. 1, имеет вид

$$[E+(H+A)R]\,\overline{\varphi}=(H+A)\cdot(\overline{q}+R\,\overline{\lambda}), \qquad (1)$$

где $H(p)$ и $R(p)$ — диагональные матрицы объекта и регулятора соответственно, E — единичная матрица, $\overline{\varphi}$, $\overline{q}$, $\overline{\lambda}$ — векторы регулируемых координат, возмущающих и управляющих воздействий соответственно, A — матрица перекрестных связей.

Матрицу A можно представить как

$$A=m(p)\cdot N, \qquad (2)$$

где $m(p)$ — скалярная передаточная функция,
N — числовая матрица.

Перейдем к новому базису координат, связанному со старой невырожденной матрицей преобразования C,

$$\overline{\Phi} = C^{-1} \cdot \varphi; \quad Q = C^{-1} \cdot q; \quad \overline{\Lambda} = C^{-1} \cdot \Lambda), \tag{3}$$

Уравнение движения системы в новом базисе принимает вид

$$[E + (H' + A')\, R']\, \overline{\Phi} = (H' + A') \cdot (\overline{Q} + R\overline{\Lambda}), \tag{4}$$

где $H' = C^{-1} \cdot H \cdot C; \; A' = C^{-1} \cdot A \cdot C; \; R^1 = C^{-1} \cdot R \cdot C.$

Так как скалярные матрицы H и R перестановочны с C, то преобразование подобия не меняет их вида

$$H' = C^{-1} \cdot C \cdot H = H \text{ и т. д.}$$

Если теперь выбрать матрицу C так, чтобы матрица A стала диагональной, то уравнение (4) распадается на n независимых уравнений, и исходная СМР может быть представлена эквивалентами несвязанными системами. В качестве матрицы C обычно берется канонический базис матрицы N.

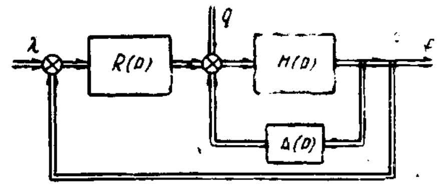

Рис. 1. Матричная структурная схема СМР

В частном случае, когда матрица перекрестных связей является симметрической, однотипная СМР может быть представлена эквивалентной системой, состоящей из простых несвязанных подсистем: усредненного движения, определяемого как среднее значение одноименных координат всех сепаратных каналов регулирования, и $(n-1)$ относительных движений, определяемых как разность одноименных координат сепаратных каналов

$$x_{i\,\text{уср}} = \frac{1}{n} \sum_{\kappa=1}^{n} x_{i\kappa}, \tag{5}$$

$$x_{ij\text{отн}} = x_i - x_j. \tag{6}$$

Будем рассматривать в дальнейшем только симметричные однотипные СМР, наиболее широко распространенные в технических приложениях. Характерной особенностью таких систем является наличие в них одного регулятора, осуществляющего коррекцию по среднему значению параметра всех сепаратных каналов. Так, в системе параллельно работающих синхронных генераторов имеется отдельный регулятор напряжения (или частоты) на общей шине. В СМР большого ядерного реактора имеется регулятор общего уровня мощности. В СМР дутья по фурмам доменной печи имеется самостоятельный регулятор общего расхода и т. д.

Регулятор среднего значения распределенного параметра является в этом случае регулятором усредненного движения. Поэтому для симметричных однотипных СМР может быть предложен метод синтеза автономных СМР, отличный от классических и основанный на использовании метода декомпозиции.

Наиболее распространенным методом построения автономных СМР является метод перекрестных компенсирующих связей, накладываемых между сепаратными каналами. Матрица регулятора в уравнении (1) в этом случае полагается недиагональной и подбором недиагональных элементов r_{ij} добиваются диагональности матрицы $(H + A)\; R$. При этом уравнение (1) распадается на n несвязанных уравнений [5].

Нетрудно видеть, что тот же результат получается при декомпозиции системы, но для достижения автономности здесь используется не изменение матрицы регулятора R, а изменение базиса регулируемых координат.

Другими словами, для достижения автономности в однотипной симметричной СМР необходимо перейти к такому базису регулируемых координат, в котором сепаратные каналы регулирования будут полностью или частично независимы друг от друга.

Пусть передаточная матрица объекта симметрична. Для простоты записи ограничимся тремя каналами

$$(H+A)=\begin{bmatrix} W(p) & m(p) & m(p) \\ m(p) & W(p) & m(p) \\ m(p) & m(p) & W(p) \end{bmatrix}. \tag{7}$$

Вектор регулируемых координат представим в виде

$$\bar{\varphi}=\begin{bmatrix} x^* \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \tag{8}$$

где x^* — среднее значение регулируемого параметра, определяемого по формуле (5).

Перейдем к новому базису координат (3). Пользуясь неоднозначностью выбора векторов канонического базиса для симметричной матрицы $(H+A)$, потребуем, чтобы в эквивалентной системе величина x^* осталась неизменной и испытывала одностороннее воздействие со стороны других координат.

Например, зададим вектор $\bar{\Phi}$ в виде

$$\bar{\Phi}=\begin{bmatrix} x^* \\ x_1-x^* \\ x_2-x^* \end{bmatrix}. \tag{9}$$

Тогда на основании (3) определяем матрицу преобразования

$$C^{-1}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad C=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{10}$$

Передаточная матрица объекта в новом базисе принимает вид

$$(H'+A')=\begin{bmatrix} (W+2m) & m & m \\ 0 & (W-m) & 0 \\ 0 & 0 & (W-m) \end{bmatrix}. \tag{11}$$

Выражение (11) показывает, что наряду с автономностью сепаратных каналов между собой здесь достигается и односторонняя автономность всей подсистемы сепаратных каналов от регулятора среднего значения параметра x^*.

В зависимости от условий технической реализации вектор регулируемых координат может быть задан в несколько ином виде, например,

$$\bar{\Phi}=\begin{bmatrix} x^* \\ x_1-[(x^*-\kappa x_0^*)+\kappa x_0^*] \\ x_2-[(x^*-\kappa x_0^*)+\kappa x_0^*] \end{bmatrix} \text{или} \quad \bar{\Phi}=\begin{bmatrix} x^* \\ x_1-\kappa x^* \\ x_2-\kappa x^* \end{bmatrix}, \tag{12}$$

где κ — const.

Тогда передаточная матрица объекта соответственно принимает вид

$$(H'+A')=\left[\begin{array}{cc|c} (W+2m) & \kappa m & \kappa m \\ 0 & (W-m) & 0 \\ 0 & 0 & (W-m) \end{array}\right], \qquad (13а)$$

$$(H'+A')=\begin{bmatrix} (W+2\kappa m) & m & m \\ m(1+\kappa-2\kappa^2) & (W-\kappa m) & (1-\kappa)m \\ m(1+\kappa-2\kappa^2) & (1-\kappa)m & (W-\kappa m) \end{bmatrix}. \qquad (13б)$$

На рис. 2 представлены структуры трех синтезированных автономных СМР, построенные на основании выражений (9) и (12). Очевидно,

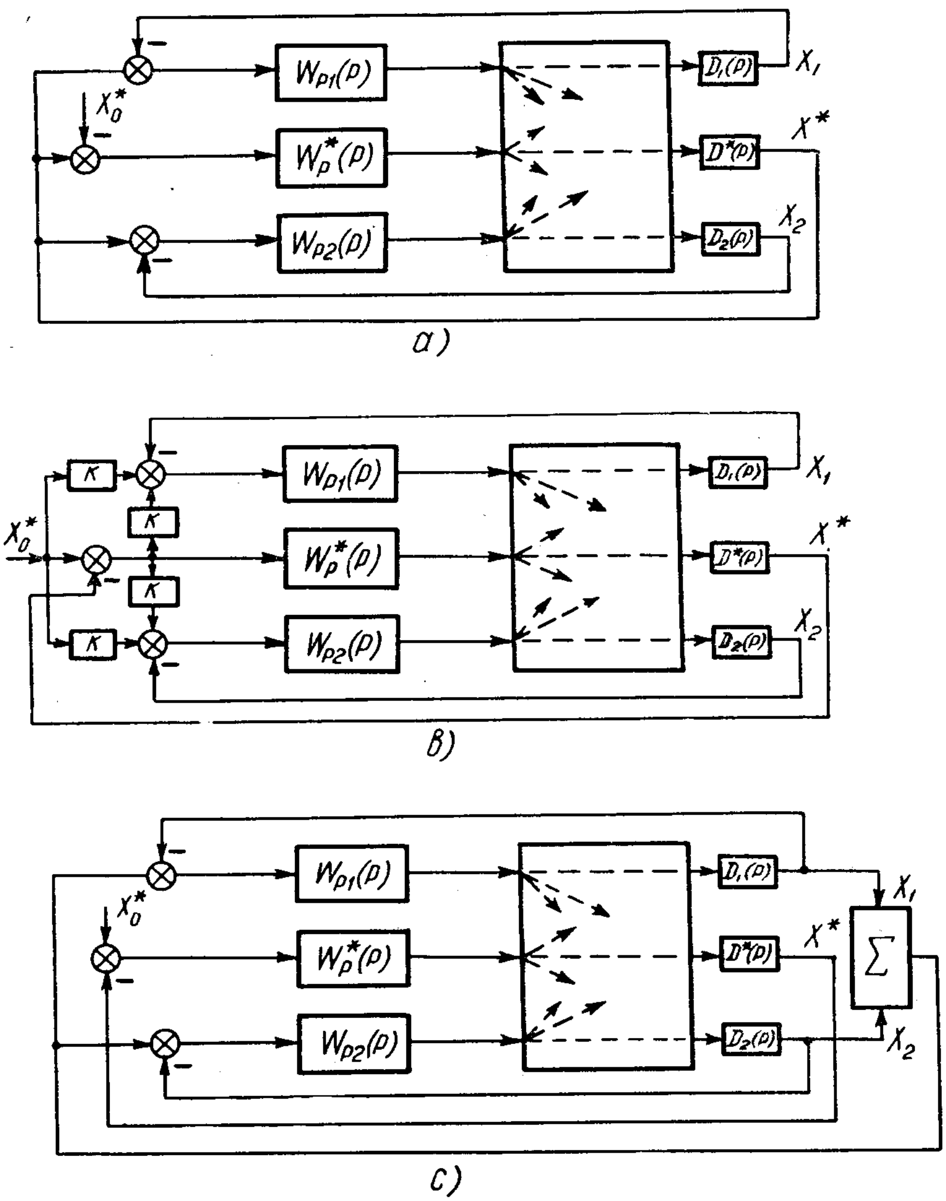

Рис. 2. Структурные схемы синтезированных автономных СМР

что задача синтеза автономных однотипных СМР по методу декомпозиции имеет множество решений. Так, указанными свойствами обладает система при переходе к новому базису вида

$$\overline{\Phi} = \begin{bmatrix} x^* \\ x_1 - x^* \\ x_2 - x^* \end{bmatrix}. \tag{14}$$

Передаточная матрица объекта для этого случая полностью совпадает с выражением (11).

С целью иллюстрации на рис. 3 приведены кривые переходных процессов в СМР, построенные по типу структур *б* и *с* (рис. 2).

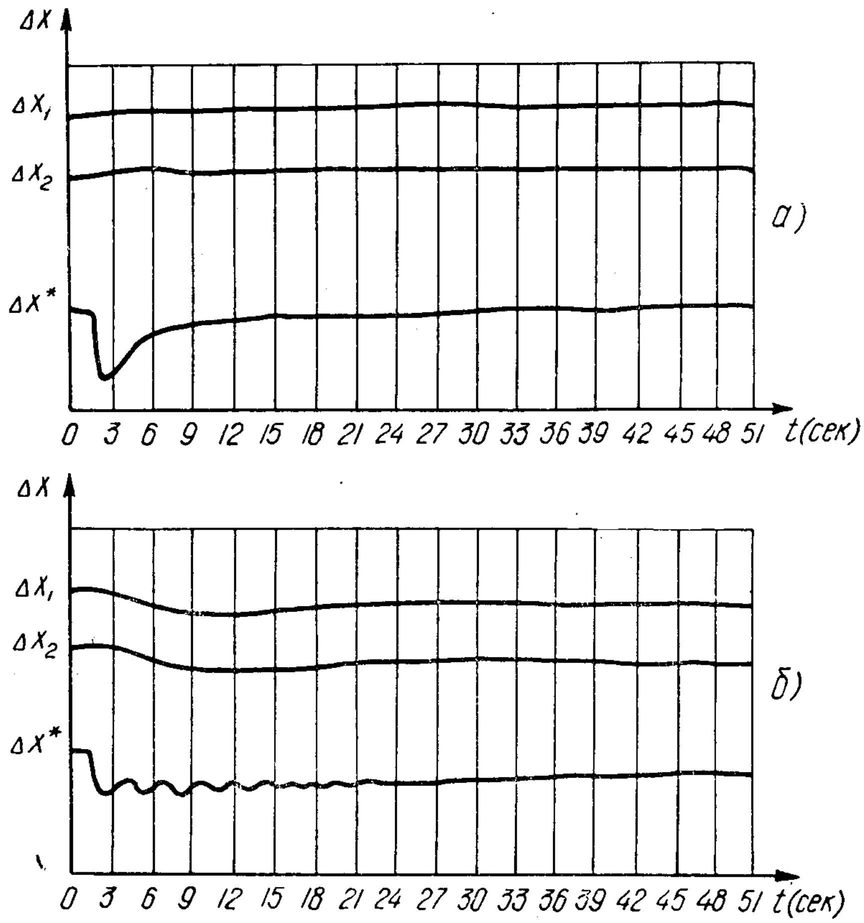

Рис. 3. Переходные процессы в каналах СМР, вызванные изменением уставки регулятора среднего значения параметра

Кривые получены по аналоговой вычислительной машине ЭМУ-8 для трехканальных однотипных СМР указанных типов при следующих матрицах объекта, регулятора и датчиков соответственно:

$$(H + A) = \begin{bmatrix} \frac{\kappa_{11}(T_1 p + 1)}{p(T_2 p + 1)} & \frac{\kappa_{12}(\tau p + 1)}{p(T_2 p + 1)} & \frac{\kappa_{13}(\tau p + 1)}{p(T_2 p + 1)} \\ \frac{\kappa_{21}(\tau p + 1)}{p(T_2 p + 1)} & \frac{\kappa_{22}(T_1 p + 1)}{p(T_2 p + 1)} & \frac{\kappa_{23}(\tau p + 1)}{p(T_2 p + 1)} \\ \frac{\kappa_{31}(\tau p + 1)}{p(T_2 p + 1)} & \frac{\kappa_{32}(\tau p + 1)}{p(T_2 p + 1)} & \frac{\kappa_{33}(\tau p + 1)}{p(T_2 p + 1)} \end{bmatrix}, \tag{15}$$

$$R = \begin{bmatrix} \frac{\kappa_1}{p(T_3 p + 1)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\kappa_1}{p(T_3 p + 1)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\kappa_1}{p(T_3 p + 1)} \end{bmatrix}, \tag{16}$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\kappa_2}{T_4 p + 1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\kappa_2}{T_4 p + 1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\kappa_2}{T_4 p + 1} \end{bmatrix}. \tag{17}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Кулебакин, В. Т. Морозовский, И. М. Синдеев. Электроснабжение самолетов. М., Оборонгиз, 1956.
2. В. А. Боднер. Автоматика авиационных двигателей. М., Оборонгиз, 1965.
3. А. Джеффи. Устойчивость взаимосвязанных систем регулирования. Труды I Международного конгресса по автоматическому управлению. М., ИФАК, т. 1, 1961.
4. О. С. Соболев. Анализ структуры многомерной автоматической системы с нелинейной связью. «Автоматика и телемеханика», 1964, № 3.
5. В. Т. Морозовский. Многосвязные системы автоматического регулирования. М., «Энергия», 1970.