ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

В. Б. МЕДЗЕНОВСКИЙ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО СТАТИСТИЧЕСКИМ ДАННЫМ

(Специальность 254 – автоматическое управление и регулирование)

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Одесса-1968

В аналитических методах решения интегрального уравнения (1.1) автокорреляционную функцию представляют в виде

$$R_{xx}(\tau) = \sum_{i=0}^{n} A_i e^{-a_i|\tau|} \qquad (1.2)$$

а взаимокорреляционную функцию в виде

$$R_{yx}(\tau) = \begin{cases} \sum_{i=0}^{n} B_i e^{-b_i\tau} & \tau > 0 \\ \sum_{i=0}^{n} c_i e^{c_i\tau} & \tau < 0 \end{cases} \qquad (1.3)$$

Импульсная переходная функция отыскивается в виде линейной комбинации экспонент

$$h(\tau) = \sum_{k=0}^{N} D_k e^{-d_k\tau} \qquad (1.4)$$

Выражения (1.2), (1.3), (1.4) подставляются в уравнение (1.1) и неизвестные параметры D_k, d_k находятся методом неопределенных коэффициентов

Решение интегрального уравнения осложняется тем, что в реальном объекте всегда присутствуют помехи, которые искажают корреляционные функции. Кроме того, мы имеем дело не с точными корреляционными функциями, а их оценками, полученными из реализаций конечной длины.

Все это делает найденную импульсную функцию $h(\tau)$ существенно нерегулярной, что, естественно, затрудняет задачу аппроксимации.

Так как в линейных системах соотношение между входными и выходными сигналами подчиняется некоторому дифференциальному уравнению, то логично аппроксимировать опытную взаимную корреляционную функцию R_{yx} решением того или иного вида дифференциального уравнения в смысле заданного критерия близости опытной функции R_{yx} и ее приближения R^*_{yx}, т.е.

$$J[R_{yx}, R^*_{yx}] = min \qquad (1.5)$$

Показано, что если $h(\tau)$ является импульсной функцией звена

$$\sum_{i=0}^{n} a_i y^{(i)}(t) = \sum_{j=0}^{m} b_j x^{(j)}(t-\tau_3) \qquad (1.6)$$

$$m < n$$

где

τ_3 – время запаздывания,

то функция

$$R^*_{yx}(t) = \int_{\tau_3}^{t+T} h(\tau) R_{xx}(t-\tau) d\tau \qquad (1.7)$$

является решением дифференциального уравнения

$$\sum_{i=0}^{n} a_i R^{*(i)}_{yx}(t) = \sum_{j=0}^{m} b_j R^{(j)}_{xx}(t-\tau_3) \qquad (1.8)$$

с нулевыми начальными условиями

$$R^{*(i)}_{yx}(\tau_3 - T) = 0, \quad i = 0,1,2,\dots,n-1$$

В выражении (1.7) несобственный интеграл заменен на обычный, поскольку корреляционные функции отличны от нуля на некотором конечном интервале (-T,T).

Таким образом, для решения задачи нужно определить коэффициенты a_i и b_j обеспечивающие минимум функционала (1.5). Минимизация функционала (1.5) проводится на аналоговой машине с помощью автоматического оптимизатора (рис. 1). При этом использовались градиентные методы поиска минимума функции J.

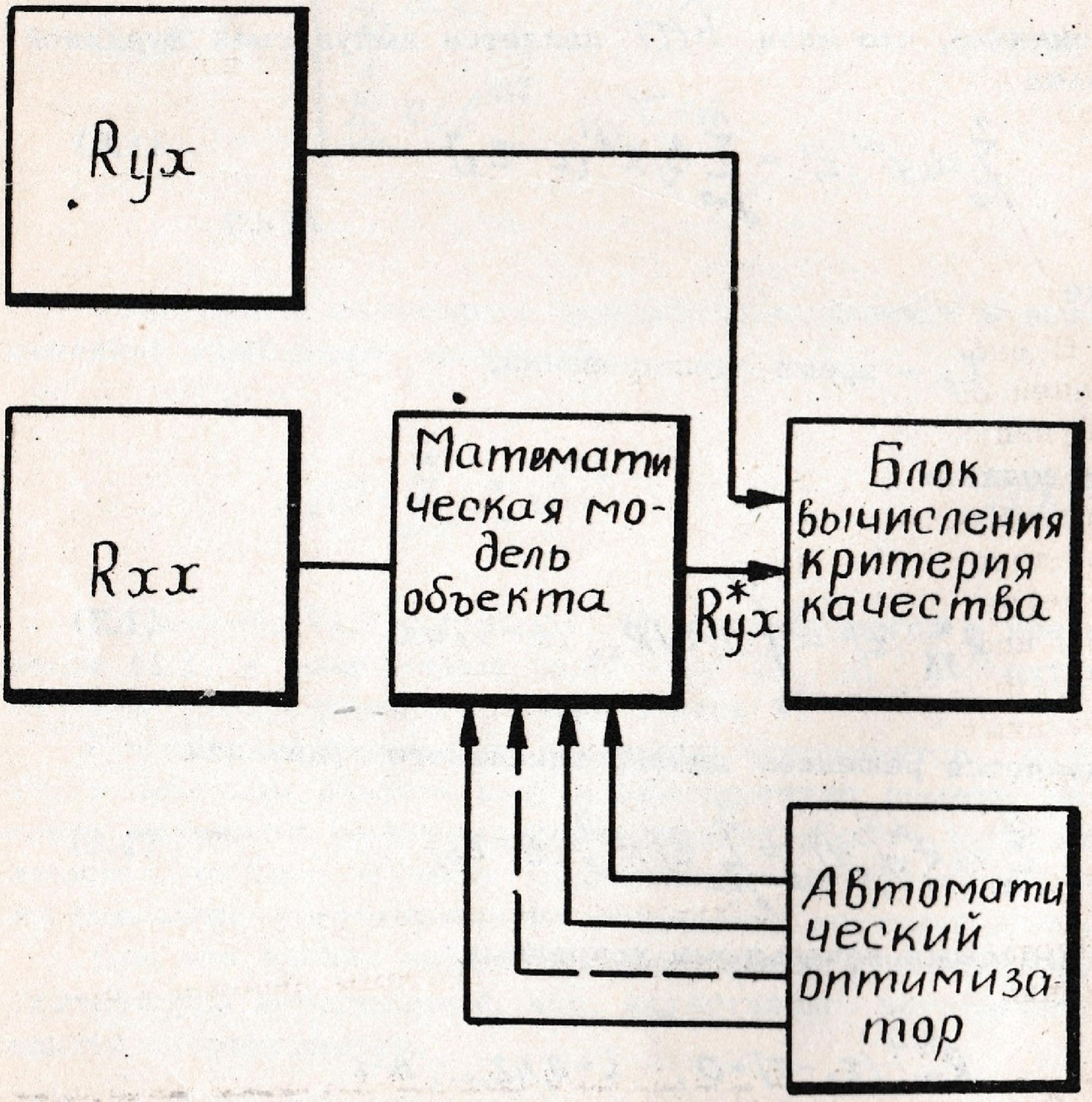

Рис. 1

Для определения качества совпадения функций R_{yx} и R^*_{yx} можно использовать различные критерии. Наиболее употребительным критерием является критерий минимума среднеквадратичной ошибки

$$J=\int_{-T}^{T}[R_{yx}(t)-R^*_{yx}(t)]^2dt \tag{1.9}$$

Этот критерий легко реализуется на АВМ с помощью стандартных множительных устройств. Другим возможным критерием является критерий минимума модуля средней ошибки

$$J=\int_{-T}^{T}|R_{yx}(t)-R^*_{yx}(t)|dt \tag{1.10}$$

В работе показано, что критерий минимума модуля средней ошибки больше подходит для отыскания минимума функции на АВМ, так как вблизи минимума частные производные по искомым параметрам от выражения (1.10) всегда больше частных производных от выражения (1.9) и, следовательно, более точно определяются искомые параметры. В работе рассмотрен случай, когда на параметры идентифицируемой системы наложены ограничения, задаваемые в виде равенств или неравенств. В этом случае минимизируется функционал

$$Q=J+H_0 \tag{1.11}$$

где H_0 – функция расстояния, зависящая от ограничений.

Пусть на некоторые параметры системы наложены ограничения вида

$$X_\gamma-A_\gamma\leqslant 0,\quad \gamma=1,2,3,\dots,N \tag{1.12}$$

Тогда функция расстояния, зависящая от ограничений, имеет вид

$$H_0 = \sum_{\gamma=1}^{N} \beta |X_\gamma - A_\gamma| \tag{1.13}$$

Пока параметры идентифицируемой системы находятся в допустимых пределах, процесс решения идет по траектории убывания функции J. Функция H_0 при этом равна нулю. Как только нарушится хотя бы одно из ограничений, уравнение движения к которому относится данное ограничение примет вид.

$$\frac{dx_\gamma}{dt} = -c\frac{\partial J}{\partial x_\gamma} - \beta S(x_\gamma - A_\gamma) \tag{1.14}$$

где c, β – коэффициенты пропорциональности,

$$S(X_\gamma - A_\gamma) = \begin{cases} 1 & X_\gamma - A_\gamma > 0 \\ 0 & X_\gamma - A_\gamma < 0 \end{cases} \tag{1.15}$$

Дополнительный член $\beta S(X_\gamma - A_\gamma)$ обеспечивает выход из запрещенной области изменения параметра X_γ. В работе показано, что методика, изложенная для объекта с одним входом и выходом, применима для объектов с несколькими входами и выходами.

Глава П посвящена идентификации нелинейных систем.

Глава состоит из двух частей.

В первой части рассматриваются вопросы идентификации нелинейных систем с помощью оператора Хаммерштейна. Оператор Хаммерштейна имеет следующий вид:

$$y(t)=\int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) f[x(t-\tau)]d\tau \qquad (2.1)$$

где $h(\tau)$ – импульсная переходная функция линейной части системы,

$f[x]$ – некоторая нелинейная функция, преобразующая входной сигнал.

Структурная схема системы, описываемой оператором Хаммерштейна, показана на рис. 2.

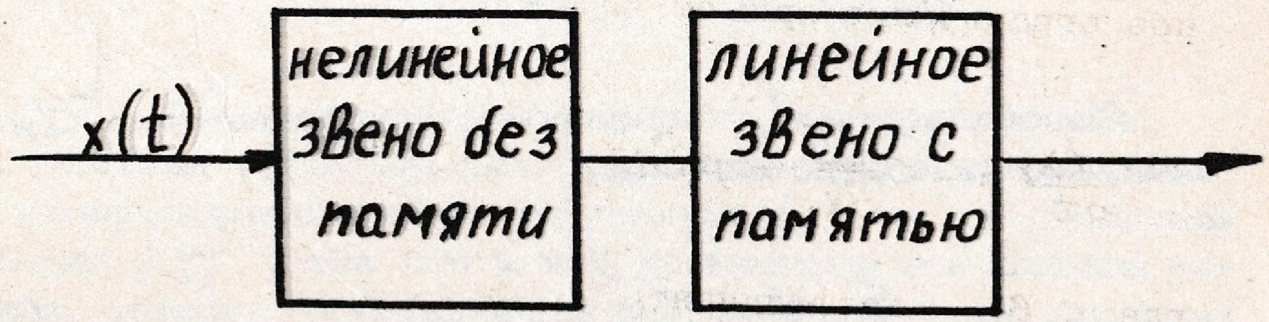

Рис. 2

Предполагается, что $f[x]$ непрерывна либо кусочно непрерывна, поэтому в силу теоремы Вейерштрасса $f[x]$ можно аппроксимировать с какой угодно точностью полиномом степени n так, что

$$f[x] \simeq \sum_{k=0}^{n} a_k x^k \qquad (2.2)$$

Используя (2.2), выражение (2.1) приближенно представляется в виде

$$y^*(t)=\sum_{k=0}^{n} a_k \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) x^k(t-\tau)\, d\tau \qquad (2.3)$$

Уравнение (2.3), записанное в отклонениях, принимает вид

$$\Delta y^*(t) = \sum_{k=1}^{n} \alpha_k \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)[\Delta x^k(t-\tau) - m_{x^k}]d\tau \qquad (2.4)$$

где

$$\Delta y(t) = y(t) - M[y(t)] \qquad (2.5)$$

$$m_{x^k} = M[\Delta x^k(t)] \qquad (2.6)$$

Коэффициенты α_k связаны с коэффициентами a_k следующими соотношениями:

$$\alpha_k = \sum_{j=k}^{n} C_j^k (\bar{x})^{j-k} a_j \qquad (2.7)$$

где $k = 1, 2, 3, \dots, n$

$$\bar{x} = M[x(t)] \qquad (2.8)$$

C_j^k – число сочетаний из j элементов по k.

Методами вариационного исчисления показано, что если в качестве критерия близости сигналов $\Delta y(t)$ и $\Delta y^*(t)$ принять критерий минимума среднеквадратичной ошибки, то для определения параметров нелинейной системы, описываемой оператором Хаммерштейна, требуется решить систему интегральных уравнений следующего вида:

$$R_{yx^i}(t) = \sum_{k=1}^{n} \alpha_k \int_{0}^{\infty} h(\tau) R_{x^k x^i}(t-\tau)d\tau \qquad (2.9)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

где R_{yx^i}, $R_{x^k x^i}$ – взаимные корреляционные функции.

$$R_{yx^i}(\tau) = M[\Delta y(t)(\Delta x^i(t+\tau) - m_{x^i})] \tag{2.10}$$

$$R_{x^k x^i}(\tau) = M[(\Delta x^k(t) - m_{x^k})(\Delta x^i(t+\tau) - m_{x^i})] \tag{2.11}$$

Среднеквадратичная ошибка аппроксимации определяется выражением

$$\bar{\varepsilon}^2 = R_{yy}(0) - \sum_{k=1}^{n} \alpha_k \int_0^\infty h(\tau) R_{yx^k}(\tau) d\tau \tag{2.12}$$

где $R_{yy}(0)$ – дисперсия выходного сигнала объекта.

Система интегральных уравнений (2.9) линейна относительно неизвестных коэффициентов α_k и импульсной функции $h(\tau)$, так что к ней применимы все методы решения, которые используются при идентификации линейных систем.

Показывается, что взаимные корреляционные функции могут быть аппроксимированы решением системы дифференциальных уравнений.

$$\sum_{j=0}^{N} b_j R^{*(j)}_{yx_i}(t) = \sum_{\ell=0}^{m} c_\ell \sum_{k=1}^{n} \alpha_k R^{(\ell)}_{x^k x^i}(t) \tag{2.13}$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

что позволяет провести решение задачи на аналоговой машине. При этом минимизируется функционал следующего вида:

$$J = \sum_{k=1}^{n} \int_{-T}^{T} | R_{yx^k} - R^*_{yx^k} | dt \tag{2.14}$$

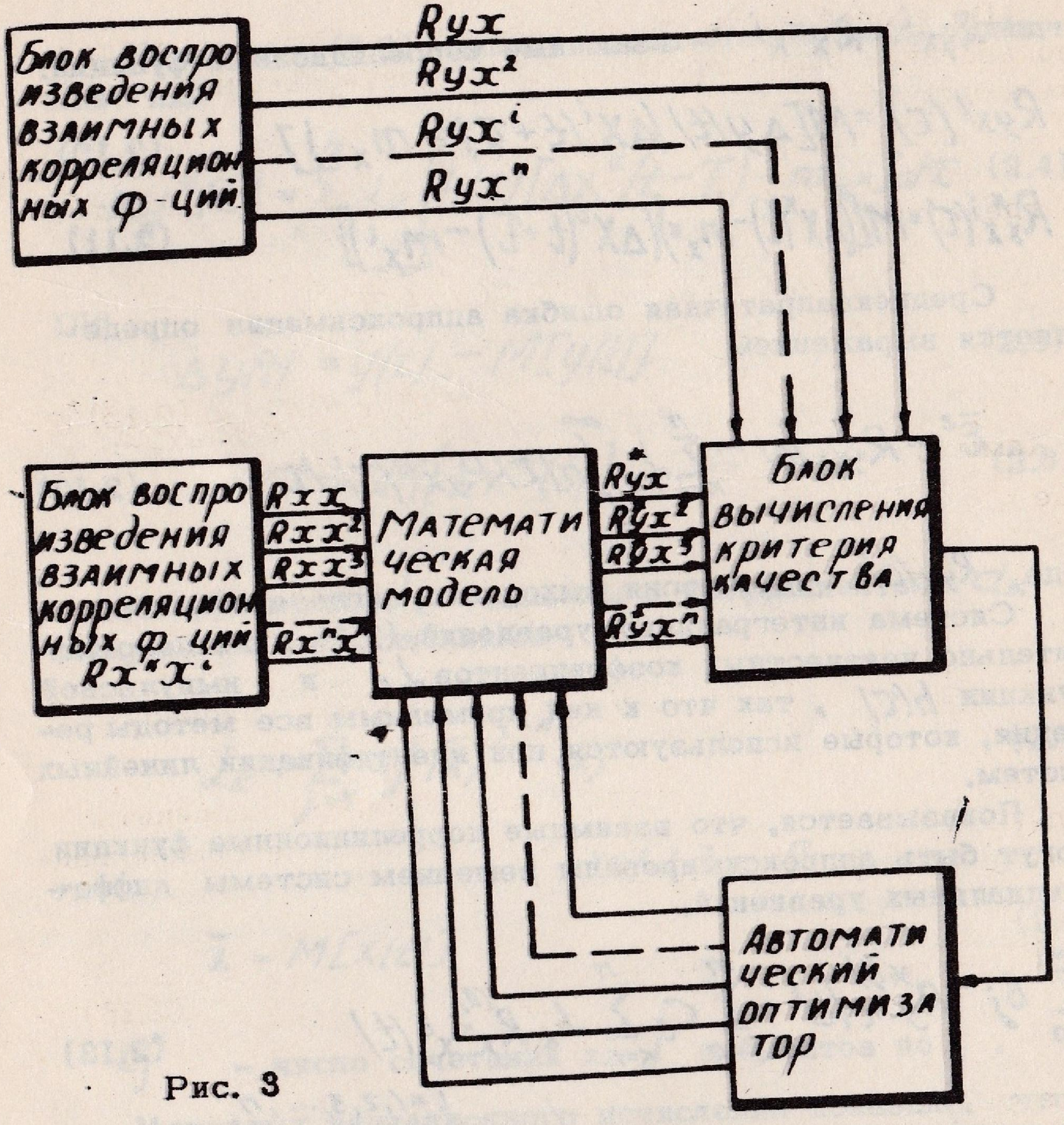

Рис. 3

На рис. 3 приведена блок-схема решения задачи на АВМ с использованием автоматического оптимизатора. В работе рассматривается случай, когда число варьируемых параметров в автоматическом оптимизаторе меньше числа искомых параметров в идентифицируемой системе. Показано, что в этом случае задачу можно решить итерационными методами. Даются рекомендации и приводятся схемы вычисления оставшейся ошибки аппроксимации на различных этапах итерационного процесса.

Во второй части главы рассматриваются вопросы использования рядов Вольтерра для идентификации нелинейных систем.

Ряд Вольтерра – это бесконечный ряд, составленный из членов, каждый из которых представляет собой интеграл свертки.

$$Z(t)=h_0+\int_{-\infty}^{\infty} h_1(\tau)x(t-\tau)d\tau+$$

$$+\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} h_2(\tau_1,\tau_2)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)d\tau_1 d\tau_2 \dots \qquad (2.15)$$

где h_0 – ядро фильтра нулевого порядка,

h_1 – ядро фильтра первого порядка,

h_2 – ядро фильтра второго порядка и т.д.

$Z(t)$ – выходной сигнал системы, $x(t)$ входной сигнал системы.

Если в качестве математической модели принять ряд (2.15) и использовать критерий минимума среднеквадратичной ошибки

$$\bar{\varepsilon}^2=M[Z(t)-Z^*(t)]^2 \qquad (2.16)$$

то в результате минимизации функционала (2.16) получим систему многомерных интегральных уравнений. Решение системы многомерных интегральных уравнений представляет собой очень трудную задачу. Кроме того, при использовании рядов Вольтерра для идентификации нелинейных систем возникает необходимость в расчете корреляционных функций высших порядков:

$$R_{zxx},\ R_{zxxx},\ R_{xxx},\ R_{xxxx}, \dots$$

Расчет таких функций в настоящее время выполнить невозможно даже при использовании современных быстродействующих вычислительных машин.

Однако задачу можно решить, накладывая некоторые ограничения на класс функционалов, а именно, потребуем, чтобы ядра высших порядков подчинялись следующим условиям:

$$\left.\begin{aligned} & h_1(\tau) = a_1 h(\tau) \\ & h_2(\tau_1, \tau_2) = a_2 h(\tau_1) h(\tau_2) \\ & \text{-- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --} \\ & \text{-- -- -- -- -- -- -- -- -- -- -- --} \\ & h_n(\tau_1, \ldots, \tau_n) = a_n h(\tau_1) \ldots h(\tau_n) \end{aligned}\right\} \quad (2.17)$$

При таких ограничениях структура нелинейной системы будет иметь вид, показанный на рис. 4.

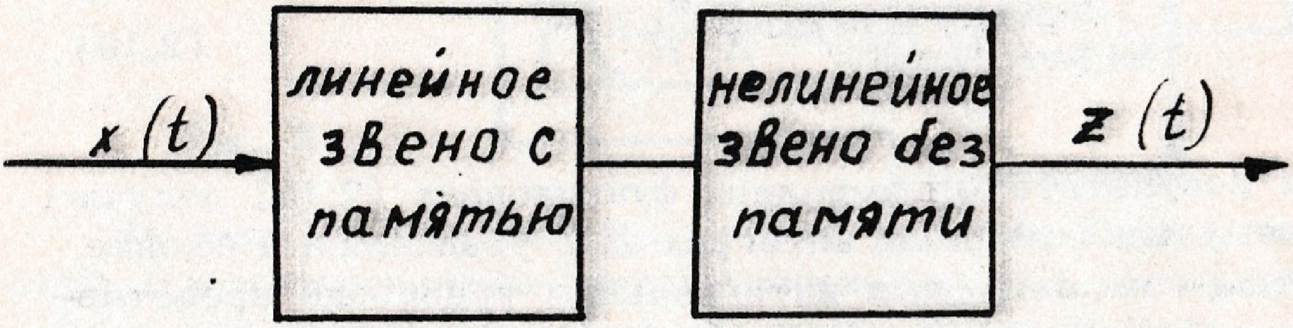

Рис. 4

Решение задачи идентификации будем проводить методом последовательных приближений. Вначале отыскивается оптимальный линейный фильтр $a_1^1 h^1$, где индексом 1 сверху обозначается первый этап итерационного процесса.

Очевидно, что.

$$y_1(t)=a_1^1\int\limits_{-\infty}^{\infty} h^1(\tau)x(t-\tau)d\tau - \tag{2.18}$$

– эргодический стационарный случайный процесс родственный процессу $z(t)$.

На следующем этапе итерации аппроксимация системы ищется из условия минимума среднеквадратичной ошибки следующего функционала:

$$\bar{\varepsilon}_2^2 = M[z(t)-\sum_{i=1}^{n} a_i^1 y_1^i(t)]^2 \tag{2.19}$$

Проводя минимизацию выражения (2.19), получим следующую систему уравнений для определения коэффициентов:

$$R_{y_1^j z} = \sum_{i=1}^{n} a_i^1 R_{y_1^j y_1^i}, \tag{2.20}$$

$$j=1,2,3,\dots,n$$

После решения системы уравнений (37) снова отыскивается лучшая линейная аппроксимация системы из условия минимума среднеквадратичной ошибки функционала

$$\bar{\varepsilon}_3^2 = M[z(t)-\sum_{i=2}^{n} a_i^1 y_1^i(t)-a_1^2\int\limits_{-\infty}^{\infty} h^2(\tau)x(t-\tau)d\tau]^2 \tag{2.21}$$

где неизвестной является функция $a_1^2 h^2(\tau)$. Индекс 2 вверху обозначает второе приближение. Продолжая итерационный процесс до бесконечности, получаем искомые коэффициенты a_i и импульсную функцию $h(\tau)$.

Практически для решения задачи идентификации нелинейной системы с одним входом и одним выходом требуется $6 \div 8$ итераций.

Оставшаяся среднеквадратичная ошибка аппроксимации определяется выражением

$$\bar{\varepsilon}_n^2 = R_{zz}(0) - \sum_{i=1}^{n} a_i R_{zy^i}(0) \tag{2.22}$$

где $R_{zz}(0)$ – дисперсия выходного сигнала системы,

R_{zy^j} – взаимные корреляционные функции между выходным сигналом и j -ми степенями выходного сигнала линейной части математической модели системы.

Глава Ш посвящена вопросам идентификации нелинейных систем с помощью дифференциальных уравнений определенного типа.

Во многих случаях, исходя из физических представлений известен вид нелинейного дифференциального уравнения объекта, но неизвестны коэффициенты уравнения.

В работе рассмотрен подробно случай, когда нелинейная система аппроксимируется следующим дифференциальным уравнением:

$$\sum_{i=0}^{n} a_i y^{(i)}(t) + F[y(t)] = f[x(t)] \tag{3.1}$$

где $y(t)$ – выходной сигнал системы,

$x(t)$ – входной сигнал системы,

$F[y], f[x]$ – некоторые нелинейные функции.

Нетрудно видеть, что при $F[y] = y$ мы приходим к системе, которая описывается оператором Хаммерштейна.

Будем предполагать, что нелинейные функции $F[y]$ и $f[x]$ непрерывны или кусочно непрерывны и их можно с требуемой степенью точности аппроксимировать полиномами. Поэтому уравнение (3.1) можно приближенно записать в виде

$$\sum_{i=1}^{n} a_i y^{(i)}(t) + \sum_{j=1}^{N_1} b_j y^j(t) = \sum_{k=1}^{N_2} c_k x^k(t) \tag{3.2}$$

Записывая уравнение (3.4) в интегральной форме **для центрированных сигналов** получим

$$\Delta y(t) = \sum_{k=1}^{N_2} \gamma_k \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)[\Delta x^k(t-\tau) - m_{x^k}]\,d\tau - \sum_{j=2}^{N_1} \beta_j \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)[\Delta y^j(t-\tau) - m_{y^j}]\,d\tau \tag{3.3}$$

где $h(\tau)$ – импульсная переходная функция линейной части системы.

Коэффициенты γ_k и β_j связаны с коэффициентами уравнения (3.2) следующими соотношениями:

$$\gamma_k = \frac{\sum\limits_{m=k}^{N_2} A_m^k (\bar{x})^{m-k} \cdot c_m}{\sum\limits_{l=1}^{N_1} A_l^1 (\bar{y})^{l-1} \; b_l}, \qquad k = 1,2,3,\ldots,N_2 \tag{3.4}$$

$$\beta_j = \frac{\sum_{\ell=j}^{N_1} A'_\ell (\bar{y})^{\ell-j} \cdot b_\ell}{\sum_{\ell=1}^{N_1} A'_\ell (\bar{y})^{\ell-1} \cdot b_\ell}, \qquad j = 2,3,\ldots,N_1 \tag{3.5}$$

Если в качестве желаемого оператора системы принять выражение (3.3), а в качестве критерия близости выходных сигналов системы и математической модели использовать критерий минимума среднеквадратичной ошибки, то для обеспечения минимума функционала

$$J = M[\Delta y(t) - \Delta y^*(t)]^2 \tag{3.6}$$

необходимо решить следующую систему интегральных уравнений:

$$\left.\begin{aligned} R_{yx^\ell}(t) &= \sum_{k=1}^{N_2} \gamma_k \int_0^\infty h(\tau) R_{x^k x^\ell}(t-\tau)\,d\tau - \\ &- \sum_{j=2}^{N_1} \beta_j \int_0^\infty h(\tau) R_{y^j x^\ell}(t-\tau)\,d\tau \\ &\qquad \ell = 1,2,3,\ldots,N_2 \\ R_{yy^m}(t) &= \sum_{k=1}^{N_2} \gamma_k \int_0^\infty h(\tau) R_{x^k y^m}(t-\tau)\,d\tau - \\ &- \sum_{j=2}^{N_1} \beta_j \int_0^\infty h(\tau) R_{y^j y^m}(t-\tau)\,d\tau \\ &\qquad m = 2,3,\ldots,N_1 \end{aligned}\right\} \tag{3.7}$$

где $R_{yx^\ell},\ R_{y^j x^\ell},\ R_{yy^m},\ R_{x^k y^m},\ R_{y^j y^m}$ – взаимные корреляционные функции.

Выражение для оставшейся среднеквадратичной ошибки имеет следующий вид:

$$\bar{\varepsilon}^2 = R_{yy}(0) - \sum_{\ell=1}^{N_2} \gamma_\ell \int_0^\infty h(t) R_{yx^\ell}(t)\,dt + \sum_{m=2}^{N_1} \beta_m \int_0^\infty h(t) R_{yy^m}(t)\,dt. \tag{3.8}$$

Как и в случае идентификации нелинейной системы с помощью оператора Хаммерштейна, корреляционные функции R_{yx^ℓ}, R_{yy^m} аппроксимируются решением линейной системы дифференциальных уравнений:

$$\left.\begin{aligned} \overset{*}{R}_{yx^\ell}(t) &= -\sum_{i=1}^{n} a_i \overset{*(i)}{R}_{yx^\ell} - \sum_{j=2}^{N_1} \beta_j R_{y^j x^\ell}(t) + \sum_{k=1}^{N_2} \gamma_k R_{x^k x^\ell}(t) \\ \overset{*}{R}_{yy^m}(t) &= -\sum_{i=1}^{n} a_i \overset{*(i)}{R}_{yy^m}(t) - \sum_{j=2}^{N_1} \beta_j R_{y^j y^m}(t) + \sum_{k=1}^{N_2} \gamma_k R_{x^k y^m}(t) \\ &\qquad m = 2,3,\ldots,N_1 \\ &\qquad \ell = 1,2,3,\ldots,N_2 \end{aligned}\right\} \tag{3.9}$$

Методика отыскания неизвестных коэффициентов в системе (3.9) точно такая же, как и при аппроксимации нелинейной системы оператором Хаммерштейна.

Глава 1У посвящена упрощенным методам идентификации нелинейных систем. Изложены упрощенные методы идентификации нелинейных систем, которые позволяют при весьма небольших затратах времени оценить параметры нелинейной системы.

При этом могут применяться численные методы оценки либо могут использоваться недорогие широко распространенные аналоговые машины типа МН-7, „Аналог-1" и т.п.

Показано, что в случае идентификации нелинейной системы с помощью оператора Хаммерштейна, параметры нелинейного звена памяти можно определить из системы алгебраических уравнений

$$S_{yx^i}(0)=\sum_{k=1}^{n}\alpha_k S_{x^k x^i}(0) \tag{4.1}$$

$$i=1,2,3,\dots,n$$

где

$$S_{yx^i}(0)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}R_{yx^i}(t)\,dt \tag{4.2}$$

$$S_{x^k x^i}(0)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}R_{yx^i}(t)\,dt \tag{4.3}$$

После определения коэффициентов имеется возможность восстановить автокорреляционную функцию сигнала $Z(t)$ на выходе нелинейного звена без памяти и взаимокорреляционную между сигналом $Z(t)$ и выходным сигналом системы $y(t)$ по формулам

$$R_{zz}(t)=\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}\alpha_i\alpha_k R_{x^k x^i}(t), \tag{4.4}$$

$$R_{zy}(t)=\sum_{i=1}^{n}\alpha_i R_{yx^i}(t) \tag{4.5}$$

Импульсная переходная функция $h(\tau)$ линейной части системы с памятью определяется из уравнения

$$R_{zy}(t) = \int_0^\infty h(\tau) R_{zz}(t-\tau) d\tau \qquad (4.6)$$

Коэффициенты дифференциального уравнения, описывающего линейную часть объекта, отыскиваются из условий минимума функционала

$$J = M\Big[\sum_{i=0}^{n} a_i R_{yz}^{(i)}(t) - R_{zz}(t)\Big]^2 \qquad (4.7)$$

Минимизация выражения (4.7) по неизвестным параметрам приводит к системе алгебраических уравнений

$$\sum_{i=0}^{n} a_i \int_{-T}^{T} R_{yz}^{(i)}(t) R_{yz}^{(k)}(t) dt = \int_{-T}^{T} R_{zz}(t) R_{yz}^{(k)}(t) dt \qquad (4.8)$$

$$k = 0, 1, 2, 3, \dots, n$$

Так как корреляционные функции равны нулю на концах интервала $(-T, T)$, то в левой части выражения (4.8) отличны от нуля следующие интегралы:

$$\int_{-T}^{T} R_{yz}^{(i)}(t) R_{yz}^{(k)}(t) dt = (-1)^r \int_{-T}^{T} \big[R_{yz}^{(k+r)}(t)\big]^2 dt$$

$i+k$ четно (4.9)

$$r = \frac{i-k}{2}, \quad i > k$$

В случае аппроксимации нелинейной системы уравнением (3.2) коэффициенты γ_k и β_j ; определяются из системы алгебраических уравнений:

$$S_{yz^{\ell}}(0)=\sum_{k=1}^{N_2}\gamma_k S_{x^k x^{\ell}}(0)-\sum_{j=2}^{N_1}\beta_j S_{y^j x^{\ell}}(0)$$

$$\ell=1,2,3,\ldots,N_2 \qquad (4.10)$$

$$S_{yy^m}(0)=\sum_{k=1}^{N_2}\gamma_k S_{x^k y^m}(0)-\sum_{j=2}^{N_1}\beta_j S_{y^j y^m}(0)$$

$$m=2,3,\ldots,N_1$$

После определения коэффициентов γ_k и β_j восстанавливаются функции

$$R_{yf},\ R_{ff},\ R_{\varphi f},\ R_{y\varphi},\ R_{\varphi\varphi}$$

где

$$f[x]=\sum_{k=1}^{N_2}\gamma_k\left(\Delta x^k(t)-m_{x^k}\right) \qquad (4.11)$$

$$\varphi[y]=\sum_{j=2}^{N_1}\beta_j\left(\Delta y^j(t)-m_{y^j}\right) \qquad (4.12)$$

Импульсная переходная функция $h(\tau)$ определяется путем решения одного из двух интегральных уравнений

$$\left.\begin{aligned} R_{yf}(t) &= \int_0^\infty h(\tau)[R_{ff}(t-\tau) - R_{yf}(t-\tau)]\,d\tau \\ R_{y\varphi}(t) &= \int_0^\infty h(\tau)[R_{f\varphi}(t-\tau) - R_{y\varphi}(t-\tau)]\,d\tau \end{aligned}\right\} \quad (4.13)$$

Полученные в работе результаты можно сформулировать следующим образом:

1. Разработана методика идентификации линейных систем с учетом ограничений, наложенных на параметры системы.

2. Предложена методика идентификации нелинейных систем, которые могут быть аппроксимированы различными комбинациями нелинейных звеньев без памяти и линейных звеньев с памятью.

3. Получено аналитическое выражение для оставшейся ошибки аппроксимации и нелинейной системы. Это дает возможность судить, насколько хороша аппроксимация на том или ином этапе и прекращать поиск параметров при удовлетворительной ошибке аппроксимации.

4. Разработана методика идентификации нелинейных объектов для случая, когда вид нелинейного дифференциального уравнения, описывающего поведение объекта, известен, но неизвестны коэффициенты дифференциального уравнения.

5. Предложена упрощенная методика идентификации нелинейных систем, позволяющая численными методами при небольших затратах времени дать оценку параметров нелинейной системы.

6. Разработаны схемы и даны рекомендации для решения задач идентификации с помощью средств вычислительной техники.

Основное содержание диссертационной работы опубликовано в следующих работах:

1. Л.Л. Роткоп, В.В. Владимиров, О.В. Кирток, И.Г. Либерман, В.Б. Медзеновский. Решение специальных задач на универсальных электронных вычислительных машинах непрерывного действия. ЦИНТИПищепром. М., 1965.

2. В.Б. Медзеновский. "Определение характеристик линейных и нелинейных систем по статистическим данным. Семинар „Алгоритмизация производственных процессов", выпуск 2, АН УССР, Киев, 1967.

3. В.Б. Медзеновский. Идентификация нелинейных систем. Труды и рефераты института "Пищепромавтоматика", приложение к выпуску 3, г. Одесса, 1968.

Доклады по результатам исследований сделаны на семинарах по алгоритмизации производственных процессов, г. Киев, 1966 г. и 1967 г., на заседании Одесского городского семинара по технической кибернетике, г. Одесса, 1967 г.

БР 05144. Подписано к печати 2.УШ.68 г.
Объем 1 печ. л. Зак. № 164. Тир. 200.

Ротапринт ин-та "Пищепромавтоматика"
г. Одесса, ул. Краснова, № 6.