

05.13.01
Plan



На правах рукописи

ГАВРИЛОВ Сергей Александрович

**АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МНОГОМЕРНЫХ
ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ
ОБОБЩЕННЫХ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Специальность 05.13.01 – “Системный анализ, управление
и обработка информации (промышленность)”

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор, заслуженный работник Высшей школы Российской Федерации Устюгов М.Н.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Юсупов Р.Х.,

кандидат технических наук, доцент Хаютин М.И.

Ведущая организация – Федеральное государственное унитарное предприятие СКБ “РОТОР”, г. Челябинск.

Защита состоится 25 декабря 2002 года, в 16 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.03 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г.Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, конференц-зал ЮУрГУ (ауд. 244).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан “ ____ ” ноября 2002 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета



А.М. Коровин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Бурное развитие техники автоматизированного управления и переход от автоматизации отдельных операций к автоматизации крупных технологических процессов послужили толчком для разработки сложных комплексов, включающих несколько сравнительно простых автоматизированных систем, взаимодействующих друг с другом.

Важнейшей задачей при проектировании таких комплексов является многостороннее исследование с целью обеспечения качественных характеристик управления. Большую роль при этом играет идентификация систем и объектов управления, которые могут быть представлены многосвязной моделью. Особенно остро проблема идентификации многомерных объектов встает в задачах исследования взаимодействия технических устройств и систем управления с источниками энергии ограниченной мощности, динамических стендов, систем управления вооружением горизонтального и вертикального наведения и т.д.

Актуальность темы. Вопросам идентификации систем и объектов управления уделяется серьезное внимание и посвящено множество книг и статей. Регулярно проводятся международные симпозиумы. Существенный вклад в развитие теории и практических методов идентификации объектов и систем внесли отечественные ученые: Морозовский В.Т., Райбман Н.С., Растринин Л.А., Устюгов М.Н., Цыпкин Я.З., Чинаев П.И. и др., а также зарубежные – Калман Р., Эйкхофф П., Сэйдж Э.П., Льюнг Л. и др.

Однако при наличии большого числа публикаций по разнообразным методам идентификации, которые отличаются типами идентифицируемых объектов, критериями близости модели и объекта, видом пробных воздействий, требованиями к экспериментальным данным, а особенно к используемым методам оценивания, в настоящее время не существует методологического единства, установившейся терминологии и единой классификации методов решения задач идентификации.

Имеются пакеты программ, пригодные для решения задач идентификации систем, которые интегрированы с имитационным моделированием и проектированием. Распространены пакеты IDPAC, MATRIX_x, CTRL-C и другие. Существует также операционная схема MathWork's SYSTEM IDENTIFICATION TOOLBOX ("набор инструментов для идентификации систем"), которая может использоваться вместе с PC-MATLAB и PRO-MATLAB.

Одним из недостатков большинства существующих систем является наличие “встроенного интерфейса программирования”, который не только усложняет работу с системой, но и приводит к появлению многочисленных ошибок. Другим немаловажным недостатком является однозадачная реализация программ, позволяющая проводить идентификацию только одного объекта и только одной моделью в данный момент времени. Наличие многозадачных операционных систем типа Windows 95/98/2000 дает возможность устранить большинство ограничений существующих пакетов прикладных программ и накладывает определенные требования к созданию приложений.

Несмотря на обширность современных программных средств идентификации, в настоящее время не существует универсального инструментального программного средства, реализованного для функционирования под управлением современных операционных систем, позволяющего охватить как можно более широкий ряд модельных структур и методов идентификации. Поэтому в работе исследуются и разрабатываются алгоритмы идентификации как можно более широкого спектра структур моделей.

Таким образом, проблема систематизации различных методов с целью реализации в виде специализированных инструментальных средств далека до практического завершения. Поэтому особенно актуальными становятся разработки алгоритмического обеспечения идентификации и его программной реализации в виде интегрированных систем, предоставляющих исследователю возможность работы с более широким спектром модельных структур.

Цель диссертационной работы и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка алгоритмов и создание программного комплекса для проведения параметрической идентификации одномерных и многомерных динамических объектов различной структуры и сложности, использование которых позволит повысить эффективность формирования моделей на основе результатов наблюдений и исследования их свойств.

С учетом особенностей многомерных динамических объектов, для достижения цели поставлены следующие задачи.

1. Проанализировать общие подходы к идентификации объектов, провести классификацию методов идентификации.

2. Выполнить реферативно-аналитический обзор современных программных средств идентификации, сформулировать требования к программному комплексу.

3. Исследовать и предложить модифицированные алгоритмы идентификации одномерных и двумерных динамических объектов во временной и частотной областях.

4. Обобщить методику идентификации одномерных и двумерных динамических объектов для трехмерных, синтезировать алгоритмы, необходимые для идентификации многомерных динамических систем.

5. Разработать структурно-функциональную схему программного комплекса.

6. Разработать алгоритм функционирования комплекса.

7. Реализовать структуры программных модулей, осуществить программирование разработанных алгоритмов в виде интегрированного программного комплекса.

8. Провести экспериментальное исследование разработанных алгоритмов на модельных структурах и реальном объекте.

Методы исследования. Теоретической и методологической основой диссертационного исследования являются методы теории идентификации, теории автоматического управления, теории многомерных систем автоматического регулирования, теории вероятности, теории векторно-матричного анализа, численные методы оптимизации, методы автоматизированного численного математического моделирования на ЭВМ.

Научная новизна диссертационной работы

1. Для класса линейных одномерных динамических систем предложен алгоритм идентификации во временной области, основанный на использовании функций чувствительности второго рода и позволяющий исключить интегрирование уравнений опорной системы.

2. Предложен модифицированный алгоритм идентификации одномерных динамических объектов в частотной области, основанный на методе наименьших отклонений годографов полученных моделей и объекта.

3. Синтезированы алгоритмы идентификации двумерных и трехмерных объектов во временной области по обобщенным временным характеристикам.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Программная реализация разработанных и усовершенствованных алгоритмов идентификации одномерных и двумерных динамических объектов ис-

пользованы: в ФГУП СКБ “Ротор” (г. Челябинск) на стадии предварительного проектирования для построения математических моделей электро-механических следящих систем с источниками питания ограниченной мощности, в ООО НПП “Монитор-Механик” (г. Челябинск) при производстве балансировочных станков на этапе наладки измерительных систем для оценки исследуемых параметров. Интегрированный программный комплекс будет востребован в учебном процессе в лекционных курсах “Моделирование систем”, “Идентификация систем”, “Основы САПР” при подготовке бакалавров и магистров по направлениям “Автоматизация и управление”, “Системный анализ и управление” и может заинтересовать различные организации, исследовательские центры и лаборатории, осуществляющие проектирование объектов и систем управления.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на конференциях, в том числе в рамках ежегодной Всероссийской научно-технической конференции “Фундаментальные исследования в технических университетах” (г. Санкт-Петербург, 1999 – 2000 гг.), а также на ежегодных научно-технических конференциях ЮУрГУ (г. Челябинск, 1999 – 2002 гг.).

Публикации. Базовые положения и результаты исследований отражены в 7 публикациях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Основная часть работы изложена на 142 страницах. Диссертация содержит 30 рисунков, 3 таблицы и 4 приложения. Список литературы включает в себя 76 наименований.

Основные положения, выносимые на защиту:

- алгоритмы и методы идентификации одномерных линейных непрерывных динамических объектов по характеристикам “вход-выход” во временной и частотной областях;
- алгоритмы и методы идентификации одномерных нелинейных непрерывных динамических объектов, описываемых моделями Гаммерштейна, Винера, общего вида и их параллельным соединением;
- алгоритмы и методы идентификации двумерных линейных непрерывных динамических объектов по характеристикам “вход-выход” во временной области на основе обобщенных временных характеристик.

- алгоритмы и методы идентификации трехмерных линейных непрерывных динамических объектов по характеристикам “вход-выход” во временной области по обобщенным временным характеристикам;
- реализация программного обеспечения идентификации одномерных и многомерных динамических объектов в виде интегрированного программного комплекса с широкими функциональными возможностями.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, определены выносимые на защиту основные положения, составляющие научную новизну и практическую ценность.

В первой главе проведен обзор современных программ идентификации, приведена классификация объектов и методов их идентификации, рассмотрено математическое описание объектов для различных модельных структур.

Анализ результатов реферативно-аналитического обзора показал, что, несмотря на обширность современных программ идентификации, в настоящее время не существует универсального инструментального программного средства, реализованного для функционирования под управлением современных операционных систем, позволяющего охватить как можно более широкий ряд модельных структур и методов идентификации.

Наиболее известны методы идентификации линейных стационарных объектов во временной области с использованием импульсной переходной функции и обобщение их на многомерные объекты (системы), имеющие более сложную внутреннюю структуру, вследствие чего их параметризация нетривиальна, особенно из-за наличия обратных и смешанных перекрестных связей, а не только прямых.

Получение импульсной переходной функции не всегда просто осуществить на реальном объекте (иногда и невозможно). Поэтому целесообразно использовать алгоритмы и методы идентификации, основанные на экспериментально полученных переходных функциях при ступенчатых входных воздействиях или зависимостях выходного сигнала от произвольного входного, отличного от воздействия при снятии частотных характеристик. Если снимаемых в произвольные дискретные моменты входных и выходных величин недостаточно для идентификации объекта, то с целью повышения точности идентификационного алгоритма используются ин-

терполяционные методы для идентифицируемых сигналов путем осуществления их обработки с большей выборкой при постоянном шаге.

Сказанное выше используется при разработке соответствующих алгоритмов идентификации одномерных и многомерных линейных стационарных объектов во временной и частотной областях.

Алгоритмы и методы с использованием экспериментальных частотных характеристик применяются для идентификации объектов соответствующими математическими моделями в виде передаточных функций или дифференциальных уравнений.

Предлагаемые алгоритмы идентификации нелинейных объектов реализованы на моделях, основанных на предположении, что нелинейность и динамику объекта можно разделить и представить его в виде последовательной комбинации двух звеньев: безынерционного нелинейного и линейного динамического. При этом для аппроксимации однозначной нелинейной статической характеристики могут применяться полиномы, использование которых ввел в теорию Н.Винер.

Алгоритмы идентификации многомерных объектов с прямыми, обратными и перекрестными связями основаны на использовании метода нескольких независимых экспериментов по эквивалентным обобщенным характеристикам, определяемым как соответствующие отношения в дискретные моменты времени входных и выходных сигналов в различных сочетаниях с применением кубической сплайн-интерполяции для эквивалентных обобщенных характеристик и алгоритма идентификации одномерных объектов.

Алгоритм идентификации определяется двумя основными свойствами динамического объекта: его линейностью и многомерностью.

Для класса линейных одномерных динамических систем предложен алгоритм идентификации во временной области, основанный на использовании функций чувствительности второго рода и позволяющий исключить интегрирование уравнений опорной системы. При представлении уравнения объекта разрешенным относительно выходной координаты

$$\begin{aligned}
 y(t) &= -(a_0 \cdot \frac{1}{p^n} + a_1 \cdot \frac{1}{p^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \cdot \frac{1}{p}) \cdot y(t) + \\
 &+ (b_0 \cdot \frac{1}{p^n} + b_1 \cdot \frac{1}{p^{n-1}} + \dots + b_{n-1} \cdot \frac{1}{p} + b_n) \cdot u(t) = \\
 &= \sum_{j=0}^{n-1} N_j(t) \cdot a_j + \sum_{i=0}^n M_i(t) \cdot b_i,
 \end{aligned} \tag{1}$$

функции чувствительности второго рода есть интегралы соответствующей кратности от входного воздействия и взятого с обратным знаком выходного сигнала:

$$\begin{aligned}
 N_0(t) &= - \int \int \dots \int y(t) \cdot dt^{(n)}; & M_0(t) &= - \int \int \dots \int u(t) \cdot dt^{(n)}; \\
 N_1(t) &= - \int \int \dots \int y(t) \cdot dt^{(n-1)}; & M_1(t) &= \int \int \dots \int u(t) \cdot dt^{(n-1)}; \\
 &\vdots & &\vdots \\
 N_{n-1}(t) &= - \int y(t) \cdot dt; & M_n(t) &= u(t).
 \end{aligned} \tag{2}$$

Значения функций чувствительности для заданных с постоянным шагом моментов времени получаются путем численного интегрирования. Для чего осуществлен переход к соотношению, принятому в дискретных системах,

$$z(k) = y(k) + v(k) = H(k) \cdot \alpha(k) + v(k). \tag{3}$$

Для оценки вектора параметров используются рекуррентные соотношения фильтра Калмана:

$$\begin{aligned}
 \Delta \hat{\alpha}(k+1) &= K(k+1) \cdot \left[z(k+1) - H(k+1) \cdot \hat{\alpha}(k) \right]; \\
 K(k+1) &= P(k) \cdot H^T(k+1) \cdot \left[H(k+1) \cdot P(k) \cdot H^T(k+1) + R(k+1) \right]^{-1}; \\
 P(k+1) &= P(k) - K(k+1) \cdot H(k+1) \cdot P(k); \\
 \hat{\alpha}(k+1) &= \hat{\alpha}(k) + \Delta \hat{\alpha}(k+1).
 \end{aligned} \tag{4}$$

Наряду с минимизацией в алгоритме фильтрации критерия оптимальности

$$M \left\{ \left[\alpha(k) - \hat{\alpha}(k) \right]^T \cdot \left[\alpha(k) - \hat{\alpha}(k) \right] \right\} = \min \tag{5}$$

предложено в качестве критерия идентификации в пространстве выходных сигналов вычислять среднеквадратическую ошибку выходных координат объекта и модели:

$$E(y, \hat{y}) = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \left[y(t) - \hat{y}(t) \right]^2 \cdot dt. \tag{6}$$

В случае расходимости процесса фильтрации критерий идентификации позволяет определить наилучшие оценки параметров, полученных в процессе вычислений.

Для класса двумерных линейных объектов предложены варианты структурного представления двумерного линейного динамического объекта: с прямыми, обратными, смешанными (прямой и обратной) перекрестными связями. Например, на рис. 1, 2 изображены соответственно объекты с прямыми и обратными перекрестными связями.

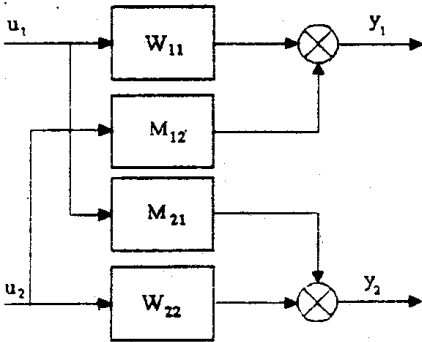


Рис.1. Представление двумерного объекта с прямыми перекрестными связями

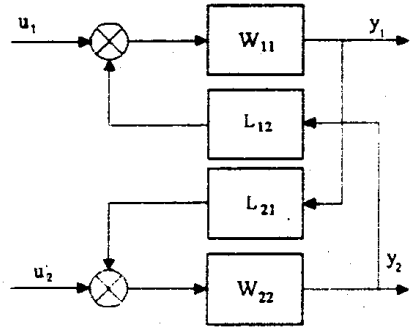


Рис.2. Представление двумерного объекта с обратными перекрестными связями

Для каждого из этих представлений с использованием результатов двух независимых экспериментов с объектом при различных входных воздействиях составлены системы уравнений:

$$\begin{cases} W_{11} \cdot U_1 + M_{12} \cdot U_2 = Y_1; \\ M_{21} \cdot U_1 + W_{22} \cdot U_2 = Y_2 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} W_{11} \cdot U'_1 + M_{12} \cdot U'_2 = Y'_1; \\ M_{21} \cdot U'_1 + W_{22} \cdot U'_2 = Y'_2; \\ (U_1 + L_{12} \cdot Y_2) \cdot W_{11} = Y_1; \\ (U_2 + L_{21} \cdot Y_1) \cdot W_{22} = Y_2; \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} (U'_1 + L_{12} \cdot Y'_2) \cdot W_{11} = Y'_1; \\ (U'_2 + L_{21} \cdot Y'_1) \cdot W_{22} = Y'_2; \end{cases}$$

которые после введения обозначений:

$$\begin{aligned} W_A = \frac{Y_1}{U_1}; W_B = \frac{Y'_1}{U_2}; W_C = \frac{Y_2}{U_1}; W_D = \frac{Y'_2}{U_2}; \\ W_M = \frac{U_2}{U_1}; W_N = \frac{U'_1}{U'_2} \end{aligned} \quad (9)$$

представляются в виде блочных матричных уравнений:

$$\begin{bmatrix} 1 & W_M & & 0 \\ W_N & 1 & & \\ \hline & & 1 & W_M \\ 0 & & W_N & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_{11} \\ M_{12} \\ M_{21} \\ W_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_A \\ W_B \\ W_C \\ W_D \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} W_A & W_C & & 0 \\ W_B & W_D & & \\ \hline & & -W_A & W_C \\ 0 & & -W_B & W_D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_{11}^{-1} \\ L_{12} \\ L_{21} \\ W_{22}^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ W_N \\ W_M \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

В предложенной форме записи уравнений в качестве переменных, подлежащих определению, используются передаточные функции двумерного объекта, а передаточные функции W_A , W_B , W_C , W_D , W_M , W_N считаются известными и определяются разработанными алгоритмами идентификации линейных объектов по экспериментальным временным характеристикам для соответствующих координат.

При анализе и синтезе сложных непрерывных динамических систем, содержащих несколько нелинейных элементов во внутренних контурах, возникают известные трудности, преодоление которых возможно путем построения по экспериментально полученным или рассчитанным в частотной области данным "вход-выход" эквивалентных в рабочем диапазоне амплитуд и частот обобщенных моделей, отражающих свойства линейной и нелинейной частей системы. Для идентификации нелинейных объектов предложено использовать следующие модели:

- модель Гаммерштейна (последовательное соединение безынерционной нелинейности и линейного динамического звена);
- модель Винера (последовательное соединение линейного динамического звена и безынерционного нелинейного элемента с однозначной статической характеристикой);
- модель общего вида (последовательное соединение линейного динамического звена, безынерционного нелинейного элемента с однозначной статической характеристикой и второго линейного динамического звена);
- модель с параллельным соединением моделей общего вида (рис.3).

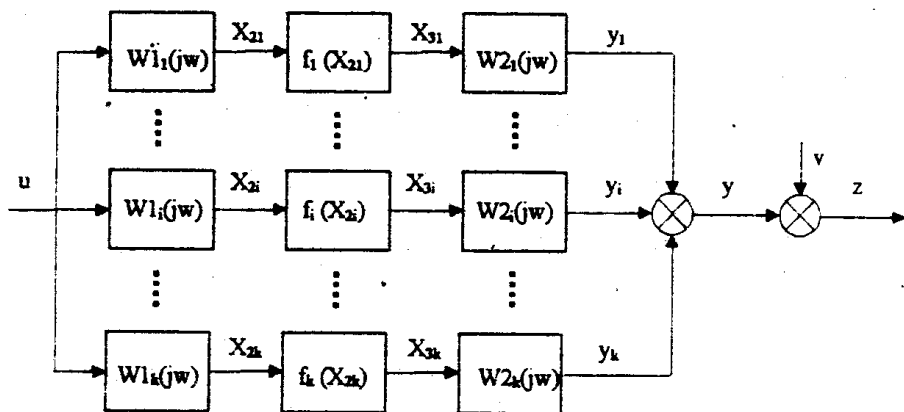


Рис.3. Модель с параллельным соединением моделей общего вида

Из последней путем модификации можно получить любые из выше-названных моделей. Для указанных моделей предложены алгоритмы и их программная реализация.

Во второй главе синтезированы алгоритмы параметрической идентификации динамических объектов для различных модельных представлений.

Для идентификации линейных одномерных динамических объектов в частотной области предложен алгоритм, основанный на разложении уравнения объекта для выходной координаты в ряд Тейлора в окрестности априорных значений параметров:

$$Y(j\omega) = Y^0(j\omega) + \sum_{i=0}^m M_i(j\omega) \cdot \Delta b_i + \sum_{L=0}^{n-1} N_L(j\omega) \cdot \Delta a_L + \dots + R_n(\Delta a_L, \Delta b_i). \quad (12)$$

Для дискретного набора частот соотношение (12) представляется в виде приближенных равенств для вещественной и мнимой составляющих выходного сигнала:

$$U(w_k) = U^0(w_k) + \sum_{i=0}^m UM_i(w_k) \cdot \Delta b_i + \sum_{L=0}^{n-1} UN_L(w_k) \cdot \Delta a_L + V_1(k);$$

$$V(w_k) = V^0(w_k) + \sum_{i=0}^m VM_i(w_k) \cdot \Delta b_i + \sum_{L=0}^{n-1} VN_L(w_k) \cdot \Delta a_L + V_2(k). \quad (13)$$

При определении оценки вектора параметров, как и в случае идентификации по временным характеристикам, используется алгоритм дискретной фильтрации Калмана. Причем алгоритм оценивания параметров

на каждой частоте используется дважды: для вещественной и мнимой составляющих выходного сигнала.

На практике оценки параметров необходимо получать на основании конечного числа измерений координат объекта, поэтому с увеличением числа вычислений в некоторых случаях наблюдается расходимость процесса фильтрации, что обусловлено следующими причинами: неточностью математического описания выходного сигнала объекта с использованием ряда Тейлора, неточностью априорных статистических данных, ошибками счета ЭВМ. В связи с чем, предложен альтернативный алгоритм, основанный на фильтрации множества решений с помощью метода наименьших отклонений для годографов объекта и моделей.

Представим математическую модель объекта в виде частной передаточной функции вида

$$W(j\omega) = \frac{b_0 + b_1 \cdot (j\omega) + b_2 \cdot (j\omega)^2 + \dots + b_m \cdot (j\omega)^m}{a_0 + a_1 \cdot (j\omega) + a_2 \cdot (j\omega)^2 + \dots + a_n \cdot (j\omega)^n}, \quad (14)$$

или

$$W(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{U(j\omega)}, \quad (15)$$

где $U(j\omega)$, $Y(j\omega)$ – гармонические входной и выходной сигналы, $m \leq n$.

При амплитуде входного сигнала $A=1$ годограф выходного сигнала $Y(j\omega)$ совпадает с АФЧХ, поэтому все дальнейшие выкладки производятся для гармонического входного сигнала с амплитудой $A=1$.

Решение поставленной задачи легко свести к аппроксимации выходных данных к функции вида передаточной функции.

Перемножив левую и правую части (14) на знаменатель и положив $a_n=1$, получим:

$$b_0 + b_1 \cdot (j\omega_i) + b_2 \cdot (j\omega_i)^2 + \dots + b_m \cdot (j\omega_i)^m - W(j\omega_i) \cdot (a_0 + a_1 \cdot (j\omega_i) + a_2 \cdot (j\omega_i)^2 + \dots + a_{n-1} \cdot (j\omega_i)^{n-1}) = W(j\omega_i) \cdot (j\omega_i)^n. \quad (16)$$

С использованием экспериментальных данных в виде массива частот и массива коэффициентов передачи идентифицируемого звена на соответствующей частоте уравнение (16) представляет собой линейное уравнение с $n+m+1$ неизвестными. Таким образом, для его решения требуется $n+m+1$ линейно независимых уравнений.

Если количество данных для идентификации больше, чем количество неизвестных параметров, которые следует оценить, то составляется не-

сколько систем уравнений. В случае, если данных меньше, то с помощью интерполяции искусственно вводится их недостающее количество. Для каждого из найденных решений полученных систем определяется значение передаточной функции, по которой строится частотная функция, находятся отклонения ее от экспериментальной, и выбирается система с наименьшим отклонением.

Для класса двумерных линейных объектов и нелинейных динамических объектов, представленных моделями Гаммерштейна, Винера, моделью общего вида и моделью с параллельным соединением моделей общего вида реализованы соответствующие алгоритмы их идентификации.

Эффективность предложенных алгоритмов для двумерных объектов послужила основой для развития и разработки алгоритмов идентификации трехмерных объектов. Идентификация многомерных объектов имеет определенные особенности. Различные варианты структурного представления многомерного объекта определяют различные матричные уравнения зависимостей и различные подходы к проведению экспериментов. В случае трехмерного динамического объекта необходимо провести три независимых эксперимента. Число вариантов структурного представления трехмерного объекта существенно превышает число вариантов для двумерного объекта, что определяет более сложный состав матричных зависимостей и повышает требования к точности промежуточных вычислений. Промежуточные операторные передаточные функции, служащие для определения искомым передаточных функций объекта, определяются как отношения входных и выходных величин в различных сочетаниях при проведении трех независимых экспериментов с трехмерным объектом и в дискретные моменты времени характеризуется числовой последовательностью. Указанное свойство позволяет определять в выражении для искомым передаточных функций эквивалентные обобщенные дискретные числовые последовательности сигналов, применяя к которым соответствующую интерполяцию и реализованный алгоритм идентификации одномерных динамических объектов, получаем требуемые передаточные функции трехмерного объекта.

В зависимости от характера прямых и обратных перекрестных связей можно выделить четыре типа структурного представления многомерных объектов (рис.4).

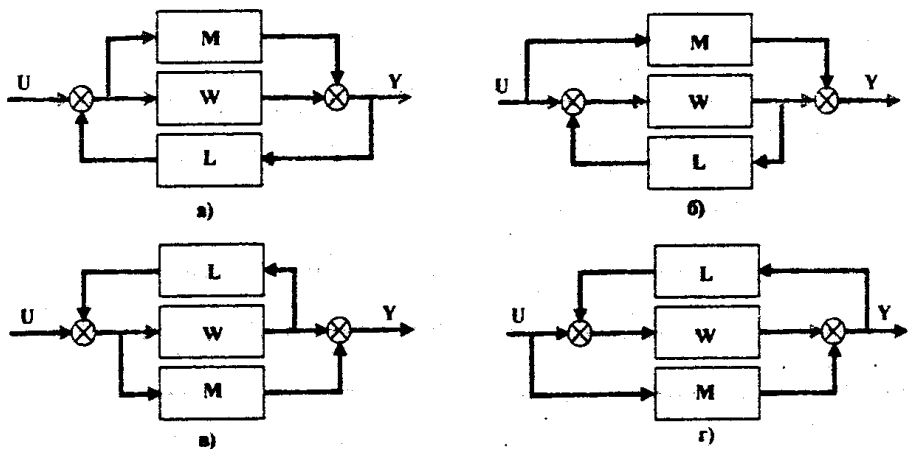


Рис.4. Типы структурного представления многомерных объектов

На рис.4:

U и Y – векторы соответственно входных и выходных координат объекта;

M – передаточная блочная матрица канала прямых перекрестных связей;

L – передаточная блочная матрица канала обратных перекрестных связей;

W – передаточная блочная матрица, характеризующая объект.

Рассмотрим трехмерный динамический объект, соответствующий многомерной структуре рис. 4,г.

Для идентификации трехмерного объекта используются результаты трех независимых экспериментов:

$$\begin{cases} W_{11}(U_1 + L_{12}Y_2 + L_{13}Y_3) = Y_1, \\ W_{22}U_2 + M_{21}U_1 + M_{23}U_3 = Y_2, \\ W_{33}U_3 + M_{31}U_1 + M_{32}U_2 = Y_3, \end{cases}$$

$$\begin{cases} W_{11}(U_1' + L_{12}Y_2' + L_{13}Y_3') = Y_1', \\ W_{22}U_2' + M_{21}U_1' + M_{23}U_3' = Y_2', \\ W_{33}U_3' + M_{31}U_1' + M_{32}U_2' = Y_3', \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} W_{11}(U_1'' + L_{12}Y_2'' + L_{13}Y_3'') = Y_1'', \\ W_{22}U_2'' + M_{21}U_1'' + M_{23}U_3'' = Y_2'', \\ W_{33}U_3'' + M_{31}U_1'' + M_{32}U_2'' = Y_3''. \end{cases}$$

После введения обозначений

$$W_A = \frac{Y_1}{U_1}; W_C = \frac{Y_2}{U_1}; W_F = \frac{Y_3}{U_1}; W_M = \frac{U_2}{U_1}; W_O = \frac{U_3}{U_1};$$

$$W_B = \frac{Y'_1}{U'_2}; W_D = \frac{Y'_2}{U'_2}; W_E = \frac{Y'_3}{U'_2}; W_N = \frac{U'_1}{U'_2}; W_P = \frac{U'_3}{U'_2}; \quad (18)$$

$$W_R = \frac{U''_1}{U''_3}; W_S = \frac{U''_2}{U''_3}; W_G = \frac{Y''_1}{U''_3}; W_H = \frac{Y''_2}{U''_3}; W_K = \frac{Y''_3}{U''_3}$$

соотношения (17) представим в виде блочных матричных уравнений:

$$\left[\begin{array}{ccc|cc} W_A & -W_C & -W_F & & \\ W_B & -W_D & -W_E & 0 & 0 \\ W_G & -W_H & -W_K & & \\ \hline & & & 1 & W_M & W_O & & & \\ & 0 & & W_N & 1 & W_P & & 0 & \\ & & & W_R & W_S & 1 & & & \\ \hline & 0 & & & & & 1 & W_M & W_O \\ & & & & & & W_N & 1 & W_P \\ & & & & & & W_R & W_S & 1 \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} W_{11}^{-1} \\ L_{12} \\ L_{13} \\ M_{21} \\ W_{22} \\ M_{23} \\ M_{31} \\ M_{32} \\ W_{33} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} 1 \\ W_V \\ W_K \\ W_C \\ W_O \\ W_H \\ W_F \\ W_E \\ W_K \end{array} \right], \quad (19)$$

в которых переменными для определения служат неизвестные передаточные функции объекта, а функции $W_A, W_B, W_C, W_D, W_E, W_F, W_G, W_H, W_K, W_M, W_N, W_O, W_P, W_R, W_S$ согласно соотношениям определяются как отношения входных и выходных величин в различных сочетаниях при проведении трех независимых экспериментов и в дискретные моменты времени характеризуются числовой последовательностью. Указанное свойство позволяет определять в соотношениях для искомых передаточных функций эквивалентные обобщенные дискретные числовые последовательности сигналов в числителе и знаменателе, применяя к которым соответствующую интерполяцию и реализованный алгоритм идентификации одномерных объектов, получаем требуемые передаточные функции трехмерного объекта.

В третьей главе выполнена разработка программного комплекса идентификации динамических объектов и систем. Определены назначение и основные требования к программному комплексу, проведен выбор среды программирования.

В соответствии с разработанными во второй главе алгоритмами и выявленными требованиями к комплексу составлена структурно-функциональная схема (рис.5), показывающая взаимосвязь программных

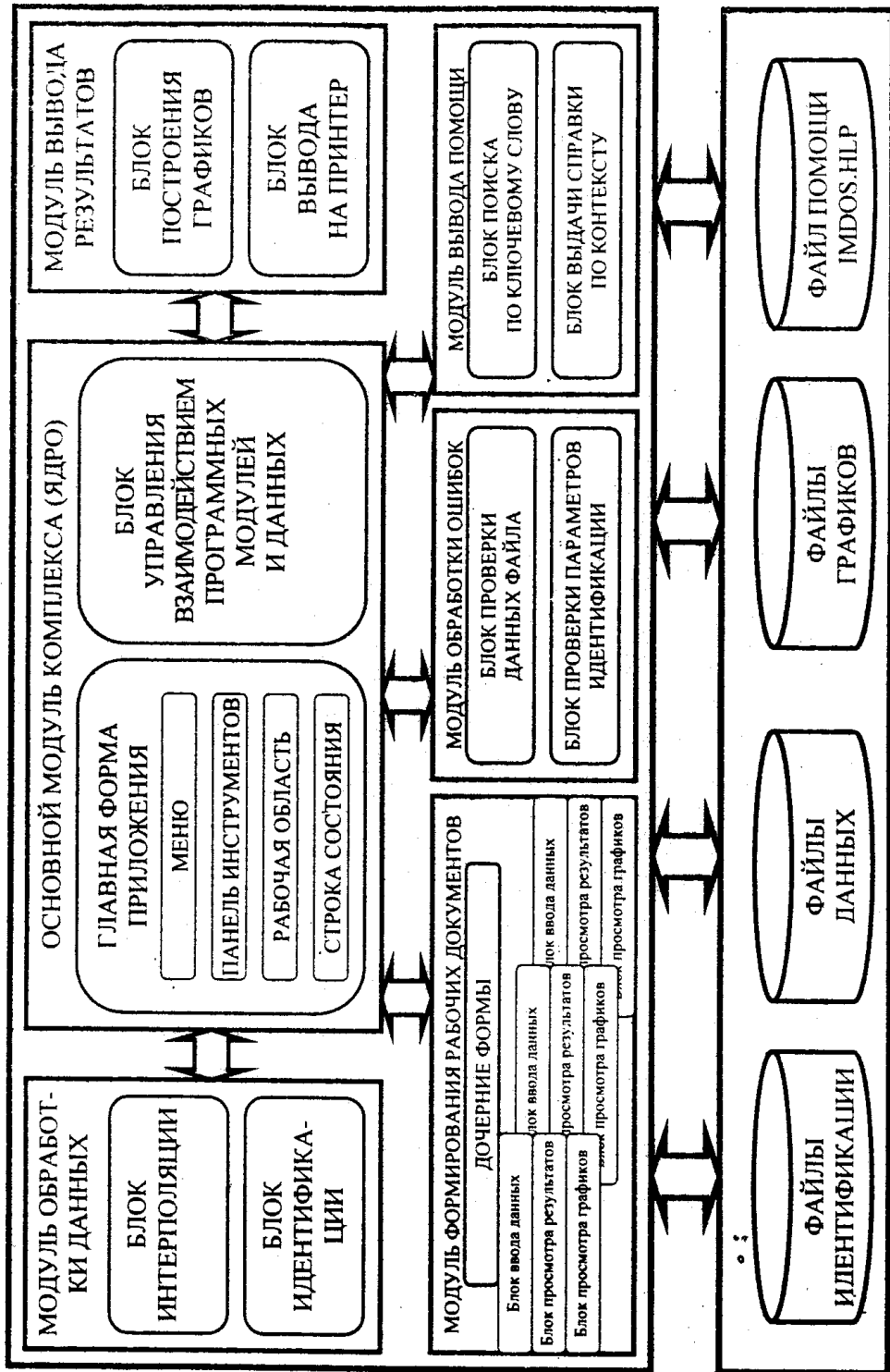


Рис. 5. Структурно-функциональная схема комплекса

модулей между собой и данными. Основным модулем комплекса является ядро, на которое возложены все функции управления взаимодействием программных модулей и данных.

С учетом особенностей программирования под Windows разработан алгоритм программного комплекса, который осуществляет формирование главных ресурсов приложения и запуск цикла обработки сообщений. Цикл обработки сообщений реализует систему реакций приложения на действия пользователя и операционной системы.

Программный комплекс реализован в форме многодокументного приложения, что позволяет исследователю параллельно проводить идентификацию различными модельными структурами во временной и в частотной областях. Немаловажной особенностью программы, выгодно отличающей ее от существующих программных средств, является визуализация течения процесса и возможность прервать процесс идентификации с указанием точности достигнутых оценок параметров.

Документы для работы с определенным классом объектов реализованы в однородном интуитивно понятном стиле в форме многостраничных окон, включающих редактор исходных данных, просмотр результатов и просмотр графиков. Страница просмотра результатов позволяет на вкладках просмотреть как итоговые результаты идентификации, так и изменение вектора параметров в процессе оценки.

В четвертой главе с целью проверки работоспособности реализованных алгоритмов на разработанном программном комплексе были проведены эксперименты по идентификации моделей динамических объектов и систем: по временным характеристикам, по частотным характеристикам для одномерных объектов и идентификация многомерного объекта во временной области. На примере системы подчиненного регулирования электропривода постоянного тока типа МЭЗОМАТИК-А, содержащего встроенные регулятор по току и регулятор по скорости, функциональная схема которой представлена на рис.6, выполнена идентификация данного реального объекта как двумерного (рис.7). Входные величины – напряжение задания U_3 и момент сопротивления M_C , а выходные – напряжение с датчика скорости $U_{ДС}$ и напряжение с датчика тока $U_{ДТ}$. Путем идентификации по экспериментальным временным характеристикам указанных выше сигналов получены четыре соответствующие передаточные функции $\hat{W}_{11}, \hat{M}_{12}, \hat{M}_{21}, \hat{W}_{22}$. По функциональной схеме (рис. 6) составлена

развернутая структурная схема, для которой на основе паспортных данных и экспериментальных данных определены параметры всех звеньев и рассчитаны по специальной программе на ЭВМ передаточные функции $W_{11}, M_{12}, M_{21}, W_{22}$ математической модели системы, представленной как двумерный объект.

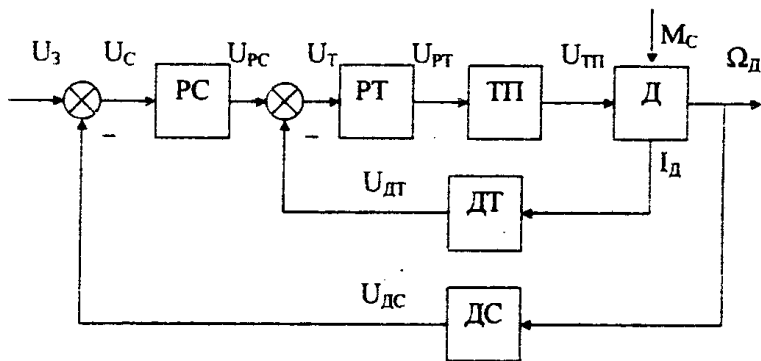


Рис.6. Функциональная схема системы подчиненного регулирования электропривода постоянного тока

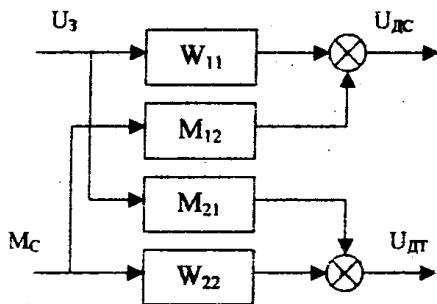


Рис.7. Представление реального объекта в виде двумерного динамического объекта с прямыми перекрестными связями

Максимальная относительная погрешность в оценках параметров идентифицируемой и теоретической моделей не превышает 30%, максимальная относительная погрешность в выходных сигналах на исследуемом временном интервале не более 10%.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенные исследования позволили получить следующие основные теоретические и практические выводы и результаты.

1. Для класса линейных одномерных динамических систем предложен алгоритм идентификации по временной области, основанный на использовании функций чувствительности второго рода и позволяющий исключить интегрирование уравнений опорной системы.
2. Предложен алгоритм идентификации линейных одномерных динамических систем в частотной области, основанный на методе наименьших отклонений годографов полученных моделей и объекта, позволяющий существенно сократить количество вычислений при оценке параметров и повысить точность их определения.
3. Единый подход к синтезируемому на основе субоптимального дискретного фильтра Калмана алгоритмам параметрической идентификации в частотной области нелинейных непрерывных динамических объектов, представленных моделями Гаммерштейна, Винера, общего вида и их параллельным соединением при полиномиальной аппроксимации однозначных нелинейных статических характеристик, обеспечивает в реализованном программном комплексе получение оценок параметров идентифицируемых объектов, частотных характеристик объекта и модели, статической характеристики модели, а также простоту диалога и корректировку исходных данных при неудовлетворительной идентификации для всех типов моделей.
4. Для двумерных линейных динамических объектов с различными перекрестными связями использование входных и выходных экспериментальных данных при двух независимых экспериментах позволяет определить матричные выражения для искомым передаточных функций, по которым на основе обобщенных временных характеристик осуществляется идентификация с применением реализованных алгоритмов идентификации одномерных объектов во временной области.
5. Исследование, разработка и модификация алгоритмов идентификации одномерных и двумерных динамических объектов во временной и частотной областях позволило обобщить методику идентификации на трехмерные объекты, для которых количество возможных структурных представлений и сложность взаимодействия намного выше, чем у одномерных и двумерных.

6. Практическим результатом исследования является разработка интегрированного программного комплекса, позволяющего:

- существенно повысить эффективность идентификации динамических объектов и систем за счет использования разработанных и модифицированных алгоритмов;
- при ограниченном объеме экспериментальных данных повысить точность оценок идентифицируемых параметров путем применения интерполяционных полиномов;
- проводить исследование объектов для широкого класса одномерных и многомерных модельных структур как во временной, так и в частотной областях.

7. Экспериментальное исследование на модельных структурах и реальном объекте показало достаточно высокую точность оценивания параметров с помощью разработанных алгоритмов, реализованных в интегрированном программном комплексе. Для реального объекта - системы подчиненного регулирования электропривода постоянного тока типа МЭЗОМА-ТИК-А - максимальная относительная погрешность в оценках параметров не превышает 30%, максимальная относительная погрешность в выходных сигналах на исследуемом временном интервале не превышает 10%.

Публикации по теме диссертационной работы:

1. Гаврилов С.А., Устюгов М.Н. Алгоритмическое обеспечение идентификации динамических объектов и систем // Материалы III Всероссийской научно-технической конференции “Фундаментальные исследования в технических университетах”: Тезисы докладов. – СПб.: Изд. СПбГТУ, 1999. – С.66-67.

2. Гаврилов С.А., Устюгов М.Н. Программный комплекс идентификации динамических систем // В сб.: Системы автоматического управления. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2000. – С.6-7.

3. Гаврилов С.А. Особенности идентификации трехмерных динамических объектов с произвольными перекрестными связями // Материалы IV Всероссийской научно-методической конференции “Фундаментальные исследования в технических университетах”: Тезисы докладов. – СПб.: Изд. СПбГТУ, 2000. – С.60-61.

4. Гаврилов С.А., Устюгов М.Н. Использование компьютерных технологий при идентификации и моделировании динамических систем // В сб.: Информационно-аналитические компьютерные системы и технологии в

региональном и муниципальном управлении. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, ЦНТИ, РАЕН, 2001. – С.298 – 301.

5. Гаврилов С.А., Устюгов М.Н. Автоматизированный комплекс построения математических моделей технических объектов по экспериментальным данным // В сб.: Информационно-аналитические компьютерные системы и технологии в региональном и муниципальном управлении. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, ЦНТИ, РАЕН, 2001. – С.301 – 303.

6. Гаврилов С.А., Устюгов М.Н. Алгоритмы идентификации трехмерных динамических объектов с произвольным видом перекрестных связей // В сб.: Вопросы автоматизации и управления в технических системах. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2002. – С.113 – 117.

7. Гаврилов С.А. Автоматизированные средства идентификации и моделирования технических объектов и систем // В сб.: Вопросы автоматизации и управления в технических системах. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2002. – С.55 – 56.



Издательство Южно-Уральского государственного
университета

ИД № 00200 от 28.09.99. Подписано в печать 13.11.2002. Формат
60x84 1/16. Печать офсетная. Усл. печ.л. 1,16. Уч.-изд.л.1.
Тираж 80 экз. Заказ 306/447.

УОП Издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.