

На правах рукописи



ЛИТВИНОВА Варвара Сергеевна

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИНЕЙНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА
В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ
НА ОСНОВЕ ЕГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ В ВИДЕ КОМБИНАЦИИ
ТИПОВЫХ ЗВЕНЬЕВ**

Специальность 05.13.01 – "Системный анализ, управление и
обработка информации (технические системы)"

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2009

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Научный руководитель: заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор
Коршунов Юрий Михайлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Локтюхин Виктор Николаевич

кандидат технических наук
Кираковский Валерий Владимирович

Ведущая организация: **ФГУП ГНПРКЦ "ЦСКБ-ПРОГРЕСС"**
филиал "ОКБ "Спектр" (г. Рязань)

Защита состоится **9 декабря 2009 г. в 12.00** на заседании диссертационного совета Д212.211.01 в ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу:
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1, аудитория 235.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Автореферат разослан 2 ноября 2009 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1, Рязанский государственный радиотехнический университет.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.211.01
канд. техн. наук, доцент



Пржегорлинский В. Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Задача идентификации динамических объектов, то есть определения структуры и параметров объектов по экспериментальным данным, является одной из основных задач современной теории и техники автоматического управления. К различным вариантам задачи идентификации приводят статистические методы обработки технической, экономической, социологической, биологической, медицинской информации.

Современная теория идентификации предоставляет в распоряжение исследователя возможность широкого выбора настраиваемых моделей и критериев качества идентификации, а также большое число алгоритмов идентификации.

Теоретические основы идентификации в нашей стране традиционно развиваются научным направлением «Идентификация систем», в создании которого активное участие принимали научные школы академика Я. З. Цыпкина и профессора Н. С. Райбмана. В научно-организационном плане лидирующая роль в создании, развитии и поддержке данного направления принадлежит Институту проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН.

Развитие теории и методов идентификации за рубежом идет в основном в рамках организаций, объединяемых Международной федерацией автоматического управления (IFAC). Ведущими зарубежными специалистами в данной области являются П. Эйкхофф, Э. П. Сейдж, Дж. Л. Мелса, Л. Льюнг.

Так как идентификация в настоящее время является обязательным элементом и наиболее сложной стадией процесса решения крупномасштабных прикладных задач, то в последнее десятилетие среди инженеров и научных работников в области теории управления степень интереса к проблемам идентификации остается стабильно высокой.

Постоянная необходимость в оптимизации процесса решения практических проблем путем рациональной идентификации стимулирует прогресс теории в классическом направлении. Поэтому по-прежнему актуальны для фундаментальной науки такие области исследования, как математические методы параметрической или непараметрической идентификации, математическая теория структурной идентификации, математическое моделирование систем, математические проблемы управления с оперативным идентификатором.

С другой стороны, с полным основанием можно говорить о том, что человек – главное звено в поиске модели задачи и его деятельность по выбору адекватного (требованиям решаемой практической задачи) типа математической модели объекта не может быть адекватно заменена алгоритмическим процессом. При решении задач практической идентификации опираются на накопленный опыт, знания и интуицию разработчиков.

Актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью решать задачу идентификации линейных динамических объектов с помощью относительно простых алгоритмов за короткое время с заданной точностью.

Степень разработанности темы. Для идентификации линейных динамических объектов широкое распространение получили статистические методы, основанные на определении по экспериментальным данным импульсной характеристики (ИХ) $w(t)$ объекта в виде конечного числа r оценок дискретных отсчетов ИХ или аналитического выражения функции $w(t)$. Трудности в получении точной математической модели реального объекта связаны в первую очередь с тем, что задача идентификации относится к классу обратных задач. Для уменьшения влияния неточности исходных данных на результат идентификации используются методы, основанные на применении входных сигналов специального вида, разложении ИХ в ряд по ортогональным функциям Лагерра, сглаживании информационных сигналов.

В инженерных задачах необходимо знать первичные параметры объекта: вид передаточной функции (ПФ), постоянные времени, коэффициенты разложения. Непараметрическое задание ИХ отражает только реакцию объекта на то или иное воздействие, не раскрывая структуру объекта и его параметры, что ограничивает возможности практического применения. Известен способ определения неизвестных параметров ПФ идентифицируемого объекта по известным коэффициентам разложения ИХ в ряд Лагерра и их взаимосвязи между собой. Однако сложность такого пересчета требует поиска других процедур идентификации, описывающих параметры ПФ идентифицируемого объекта напрямую через параметры ИХ, что и является основным содержанием настоящей диссертации.

Цели работы и задачи исследования. Целью диссертации является разработка процедуры идентификации линейного динамического объекта в условиях действия возмущений на основе определения его ИХ, которая позволит выразить параметры ПФ объекта непосредственно через параметры ИХ.

В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе решаются следующие задачи:

- анализ существующих методов идентификации линейных динамических объектов с использованием ИХ;
- разработка цифровых моделей типовых звеньев и программы для ЭВМ, моделирующей работу отдельных звеньев и сложного объекта;
- выбор входного сигнала объекта и получение вектора оценок ИХ объекта в условиях действия возмущения;
- проведение процедуры идентификации объекта путем нахождения составляющих объект типовых звеньев и получение грубой оценки их параметров, переход к точным оценкам параметров типовых звеньев;
- разработка программного обеспечения;
- анализ и сравнение с известными примерами идентификации имитационных моделей линейных динамических объектов;
- разработка процедуры входного контроля параметров разделительных фильтров акустических систем (АС) на основе идентификации ИХ.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались следующие методы исследований: метод цифрового моделирования объекта на ЭВМ, численные методы, методы обработки экспериментальных данных, методы оценки параметров. Программная реализация осуществлена в системе MATLAB.

Научная новизна работы определяется тем, что в ней предложена и исследована новая процедура идентификации линейного динамического объекта в условиях действия возмущений путем определения его ИХ, которая отличается от известных способов идентификации прямым переходом от параметров ИХ к параметрам ПФ модели объекта, в результате чего получается структура модели объекта, состоящая из комбинации параллельно соединенных выбранных типовых звеньев.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) цифровая модель объекта, реализованная в виде программы для ЭВМ, которая моделирует работу разнообразных линейных динамических объектов при различных входных сигналах в пределах заданной точности;
- 2) процедура получения грубых оценок параметров модели объекта, основанная на выборе набора типовых звеньев и их грубых параметров, сумма ИХ которых аппроксимирует экспериментально полученную ИХ идентифицируемого объекта, и обеспечивающая прямой переход от параметров ИХ к параметрам ПФ модели объекта;
- 3) алгоритм перехода от грубых оценок параметров к точным оценкам, основанный на использовании итерационной процедуры МНК и учитывающий особенность решаемой задачи;
- 4) алгоритм осуществления входного контроля качества разделительных фильтров, позволяющий повысить достоверность и надежность процедуры контроля и уменьшить время тестирования.

Практическая ценность результатов работы заключается в следующем: предложенный способ получения модели линейного динамического объекта в виде ПФ, представленной суммой ПФ типовых звеньев, на основе процедуры идентификации ИХ объекта с помощью ИХ типовых звеньев и разработанное программное обеспечение могут быть использованы для решения прикладных задач по получению математического описания объектов включительно до 5-го порядка в условиях действия умеренных шумов.

Достоверность. Достоверность результатов, полученных в диссертации, подтверждается корректным использованием математического аппарата, программных средств моделирования, действующим программным комплексом и внедрением полученных результатов.

Реализация и внедрение. Результаты диссертационной работы нашли применение в разработках ООО «НПП Цезий», ЗАО «НПО «Рязаньприбор» и в учебном процессе ГОУВПО «РГРТУ», что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Апробация работы. Результаты исследований, составляющих основное содержание работы, докладывались и обсуждались на МНТК «Гражданская

авиация на рубеже веков» (г. Москва, 2001 г.), «Научной сессии МИФИ-2002» (г. Москва, 2002 г.), 37-й научно-технической конференции (г. Рязань, 2002 г.), VI ВНТК «Информационные технологии в науке, проектировании и производстве» (г. Нижний Новгород, 2002 г.), VI ВНК студентов и аспирантов «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления» (г. Таганрог, 2002 г.), 4-й МНТК «Электроника и информатика – 2002» (г. Москва, 2002 г.), IX МНТК «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2003 г.), VIII ВНТК студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании» (г. Рязань, 2003 г. **доклад отмечен дипломом II степени**), IV международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» (г. Москва, 2005 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 17 печатных работ, в том числе 7 статей, 4 из которых опубликованы в журналах центральной печати (входящих в обязательный перечень ВАК РФ), 8 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях; получено 1 свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ в РОСПАТЕНТЕ; изданы 1 методические указания для выполнения студентами лабораторных работ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений, содержащих копии документов о внедрении и материалы, не вошедшие в основной текст работы. Общий объем работы составляет 172 страницы, в том числе основное содержание изложено на 152 страницах и содержит 69 рисунков и 18 таблиц, список литературы из 105 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, приведены практическая ценность и область применения результатов, дано краткое изложение по главам.

В первой главе рассмотрены общие вопросы идентификации объектов, проведен обзор методов идентификации линейных динамических объектов во временной области.

При решении прямой задачи по известной ИХ $w(t)$ можно однозначно определить поведение одномерного линейного стационарного динамического линейного объекта (рис. 1) из интеграла свертки:

$$y(t) = \int_0^{\infty} w(\tau) x(t - \tau) d\tau, \quad 0 \leq t \leq \infty. \quad (1)$$

При решении обратной задачи: нахождение ИХ по известным входному и выходному сигналам, ИХ в случае отсутствия помех можно найти только путем подачи на вход объекта импульсной функции.

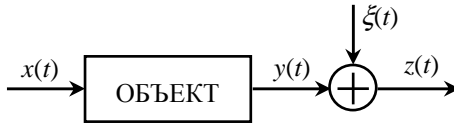


Рис. 1. Общее представление идентифицируемого объекта:
 $x(t)$ – входной сигнал; $y(t)$ – теоретический выход объекта; $z(t)$ – наблюдаемый выход объекта; $\xi(t)$ – аддитивная случайная помеха (шум наблюдения)

В случае присутствия возмущений наблюдаемый выход с учетом реальных условий проведения эксперимента будет определяться как:

$$z(t) = y(t) + \xi(t) = \int_0^{T_w} w(\tau) x(t - \tau) d\tau + \xi(t), \quad 0 \leq t \leq T_H, \quad T_H > T_w \quad (2)$$

где T_H – интервал наблюдения за объектом, T_w – интервал существования ИХ.

При решении обратной задачи путем проведения процедуры пассивной идентификации оценку ИХ получают путем решения уравнения Винера – Хопфа:

$$R_{xz}(v) = \int_0^{T_w} w(\tau) R_{xx}(v - \tau) d\tau. \quad (3)$$

В результате анализа сделаны выводы, что при аналитическом решении уравнения (3) – на основе метода корреляционных функций и метода разложения по заданной системе функций – все погрешности сложно учесть и устранить, так как они оказывают взаимное влияние друг на друга и для их компенсации необходимо выполнение противоречивых требований; при численном решении уравнения (3) неизбежны измерительные и вычислительные погрешности, связанные с неточностью исходных данных. К тому же многочисленные исследования показывают, что при пассивной идентификации возникает много трудностей, связанных с нестационарностью рабочих случайных сигналов и с неадекватностью их спектров.

Это обстоятельство делает особенно важным применением активных методов, которые носят статистический характер за счет выбора входного сигнала с заданными статистическими характеристиками, облегчающими проведение процедуры идентификации объекта. Активные методы, по сравнению с пассивными, позволяют с более высокой точностью получать математическое описание объекта.

Во второй главе разработана цифровая модель линейного динамического объекта (ЦМО) и приведены результаты экспериментальных исследований, которые подтвердили ее работоспособность и устойчивость.

В результате анализа методов цифрового моделирования объектов с учетом вопросов устойчивости и точности цифровой модели был выбран вариант, состоящий из комбинации метода подстановки и метода замены производной конечной разностью. ЦМО формируется на основании цифровых

моделей отдельных звеньев, которые, в свою очередь, получаются путем перехода от математической модели звена – ПФ и соответствующим ей дифференциальному и разностному уравнению – к моделирующему алгоритму с помощью схемы явного одношагового численного метода Рунге-Кутты 4-го порядка точности, оказавшимся на практике наиболее удачным.

Известно, что ПФ линейных динамических объектов $W(p)$ представляет собой дробно-рациональную функцию параметра p . Поэтому для получения структур непрерывных объектов введен набор из пяти простейших звеньев, которым дается название **типовое звено № 1, 2, 3, 4, 5** (см. таблицу).

Номер типового звена	ПФ типового звена	ИХ типового звена
№ 1	$W_1(p) = \frac{c}{p}$	$w_1(t) = c \cdot 1(t)$
№ 2	$W_2(p) = \frac{c}{p+a}$	$w_2(t) = ce^{-at}$
№ 3	$W_3(p) = \frac{c}{p^2}$	$w_3(t) = ct$
№ 4	$W_4(p) = \frac{c}{(p+a)^2 + b^2}$	$w_4(t) = \frac{c}{b} e^{-at} \sin(bt)$
№ 5	$W_5(p) = c \frac{p+d}{(p+a)^2 + b^2}$	$w_5(t) = \frac{c}{b} e^{-at} [b \cos(bt) + (d-a) \sin(bt)]$

Интервал дискретизации h_d непосредственно влияет на точность и устойчивость цифровой модели и на время, необходимое для проведения моделирования. Условием высокой точности численного решения дифференциальных уравнений является малая величина шага метода h . В связи с этим в работе интервал между соседними отсчетами дополнительно делится на l подынтервалов длительностью h (рис. 2), тогда

$$h_d = h \cdot l = T_n / n. \quad (4)$$



Рис. 2. Шкала дискретного времени

Значением входного сигнала $x(t)$ в каждый дискретный момент времени является значение решетчатой функции

$$x_i = x[i] = \begin{cases} x(t_i) & \text{при } t_i = ih_d, i = \overline{1, n} \\ 0 & \text{при } \text{других } t \end{cases}, h_d - \text{интервал дискретизации,}$$

и представляется как $x_i = x(t_i) \cdot \delta(t-t_i)$. С учетом модели импульсной функции $\delta(t)$ (рис. 3) значение входного сигнала $x(t_i)$ будет $\hat{x}_i = x(t_i) \cdot \hat{\delta}(t-t_i)$ и на интервале от t_i до $t_i + h_d$ в момент t_i его модель будет представлена импульсом амплитудой $v_i = \frac{x(t_i)}{h}$ и шириной h (рис. 3) с площадью, равной x_i .

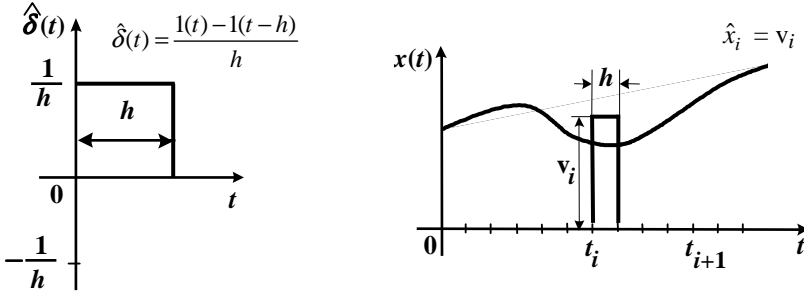


Рис. 3. Модель входного сигнала

Для всех типовых звеньев был получен моделирующий алгоритм на основе метода Рунге-Кутты. Проведена оценка точности и результативности цифрового моделирования отдельных типовых звеньев путем сопоставления реакций звеньев, полученных на цифровой модели и аналитически, на введенные типовые входные сигналы (импульсная функция, ступенчатая функция, линейно-меняющийся и синусоидальный сигналы).

Цифровое моделирование сложных непрерывных объектов осуществляется путем разложения их ПФ $W(p)$ на сумму ПФ типовых звеньев $W_s(p)$, $s = \overline{1, n_{зг}}$, $n_{зг}$ – общее число типовых звеньев в составе $W(p)$, звено одного типа может использоваться, если это необходимо, несколько раз. Структура всей ЦМО (рис. 4) формируется на основе цифровых моделей типовых звеньев, соединенных параллельно и, если необходимо, охваченных отрицательной обратной связью (ОС).

Выходная величина $y_{цм}[i+1]$ при произвольном входном сигнале $x[i+1]$ находится по соотношениям:

$$v[i+1] = x[i+1] - \beta y[i] \quad y_{цм}[i+1] = \sum_{s=1}^{n_{зг}} y_s[i+1] \quad y_s[i+1] = f_s(v[i+1], q[i]), \quad (5)$$

где $q[i] = \begin{cases} y_s[i] & \text{для звена 1-го порядка} \\ (y_s[i], y'_s[i]) & \text{для звена 2-го порядка} \end{cases}$, $y_s[0]=0, y'_s[0]=0, i = \overline{1, n}, s = \overline{1, n_{зг}}$,

f_s – моделирующий алгоритм на основе метода Рунге-Кутты 4-го порядка точности.

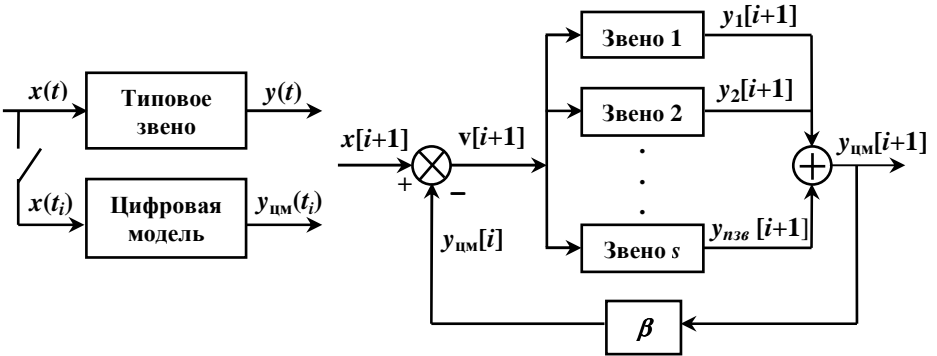


Рис. 4. Структура ЦМО

Сигнал на выходе каждого типового звена и всей ЦМО в какой-то момент времени t_i получается следующим образом:

$$y_{\text{звена}}[i] = y_{\text{цм}}(t_i) = y_m(t_i) \Big|_{j=0}, \quad y[i] = \sum_{s=1}^{n_{\text{зг}}} y_s[i]; \quad m = \overline{0, \alpha}, \alpha = (n-1) \cdot l, j = \overline{0, l-1} \quad (6)$$

(подсчет выходной величины производится на каждом шаге h , окончательно же выводятся только значения, получаемые при $j = 0$).

Многочисленные экспериментальные исследования подтвердили, что разработанная структура ЦМО (рис. 4) работает надежно и позволяет реализовать работу линейного стационарного динамического объекта (в том числе и с ОС). Показано, что при подаче на вход ЦМО разнообразных сигналов, которые могут быть входными сигналами объекта, реакция ЦМО на эти сигналы такая же, что и реакция объекта (в пределах требуемой точности). Возможность изменения в программе интервала дискретизации h_d позволяет рационально подойти к его выбору, а путем выбора величины шага численного метода h – добиться высокой точности работы ЦМО.

Третья глава посвящена описанию эффективной процедуры активной идентификации линейного динамического объекта путем определения его ИХ в условиях действия возмущений.

Задача определения ИХ по наблюдаемым реализациям сигналов на входе и выходе объекта является некорректной (относится к классу обратных задач). Известно, что входные сигналы с корреляционной функцией, аппроксимирующей функцию Дирака, обладают свойствами, желательными с точки зрения определения ИХ линейного объекта: они позволяют обойтись без решения интегрального уравнения свертки (2).

Поэтому в качестве входного сигнала выбран двоичный псевдослучайный сигнал, который генерируется регистром сдвига с обратной связью и принимает значения $+1$ и -1 (со случайными моментами перехода из одного состояния в другое). Такой сигнал является периодическим, и, по имеющимся данным, его энергия распределена равномерно и по интервалу времени, и по

частотному спектру; автокорреляционная функция, определенная по целому числу периодов, не содержит элемента случайности и хорошо аппроксимирует дельта-функцию, т. е. этот входной сигнал максимально облегчает решение обратной задачи идентификации.

На рисунке 5 представлена общая схема идентификации линейного динамического объекта предлагаемой процедурой.

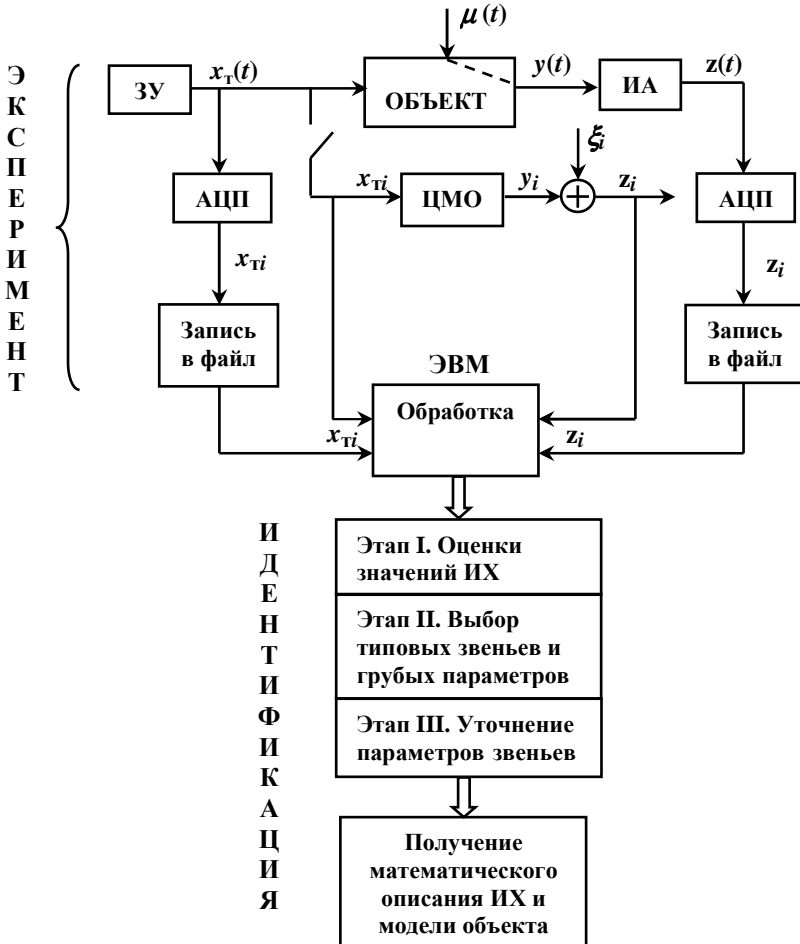


Рис. 5. Схема идентификации объекта

После организации эксперимента на объекте или на ЦМО приступают к осуществлению процедуры идентификации, которая состоит из трех этапов.

Этап I – получение отсчетов ИХ w_k , $k = \overline{1, r}$ (при $\kappa > r$ $w_k = 0$). В основу получения дискретных отсчетов ИХ положен интеграл свертки (2).

Дискретные отсчеты входного сигнала x_i рассматриваются как случайные некоррелированные величины, представляемые в модели прямоугольными импульсами (рис. 3). Рассматривая каждый такой импульс как импульсную функцию с интенсивностью x_i/h , реакцию в момент $t > t_i$ найдём как $x_i w(t - t_i)$. Тогда реакция в момент t_i на последовательность входных сигналов x_k в моменты $t_k < t_i$ будет $y_i = \sum_{k=i-r}^{i-1} x_k w(t_i - t_k)$. При замене k на $i - k$ получаем:

$$y_i = \sum_{k=1}^r w_k x_{i-k}, \quad i = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, r}, \quad n > r. \quad (7)$$

Наблюдаемый выход в векторной форме будет

$$Z = AW + \nu, \quad (8)$$

где $Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix}$, $A = \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1r} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nr} \end{bmatrix}$, $\nu = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \vdots \\ \xi_n \end{bmatrix}$, $a_{ir} = x_{i-r}$, $W = (w_1, \dots, w_r)^T$.

При решении системы уравнений (8) по МНК находится вектор оценок значений ИХ, в котором действие возмущения проявляется незначительно за счет усреднения выходного сигнала за q периодов входного сигнала:

$$\hat{W} = (A^T A)^{-1} A^T \bar{Z}, \quad (9)$$

где $\bar{Z} = \begin{bmatrix} \bar{z}_1 \\ \vdots \\ \bar{z}_n \end{bmatrix}$, $\bar{z}_i = \frac{1}{q} \sum_{k=0}^{q-1} z_{i+kn}$, $i = \overline{1, n}$.

Этап II – выбор типовых звеньев. Процедура идентификации заключается в том, чтобы выбрать набор типовых звеньев (см. таблицу), сумма ИХ которых по возможности точно аппроксимировала бы экспериментально полученные отсчеты ИХ по уравнению (9). В этом случае структура модели идентифицированного объекта получится в виде параллельного соединения подобранных типовых звеньев, а ПФ – в виде суммы ПФ этих звеньев.

Для типовых звеньев были изучены влияния изменения параметров звена на виды графиков ИХ: создан альбом ИХ типовых звеньев при различных параметрах типовых звеньев a , b , c и d .

Идентификация осуществляется исследователем графоаналитическим способом: знание вида ИХ типовых звеньев и влияние изменения параметров звена на ее характер позволяют выбрать тип звена и дать грубую оценку его параметров.

1. Процедуру идентификации провести достаточно просто, если идентифицируемый объект можно представить одним звеном. Однако в большинстве случаев приходится рассматривать два или больше типовых звеньев.

2. В таких случаях выбор звеньев разбивается на шаги, на каждом из которых выбираются только одно типовое звено и его параметры. При этом параметры *первого* выбранного звена необходимо подбирать так, чтобы ИХ звена как можно лучше аппроксимировала конечный участок ИХ объекта – в предположении, что на начальном участке ИХ объекта действуют ИХ нескольких звеньев, и только ИХ одного звена, имеющего наибольшую постоянную времени, действует на конечном участке. Найденные ПФ и ИХ первого звена – $\overline{W}_1(p)$ и $\overline{w}_1(t)$.

Для выбора вида и подбора параметров *второго* звена определяется остаточная ИХ $w'_1(t)$, равная разности между ИХ объекта $w(t)$ и найденной ИХ первого звена $\overline{w}_1(t)$. Так как для ИХ объекта $w(t)$ известны лишь ее дискретные значения w_k , $k = \overline{1, r}$, то определение остаточной ИХ проводится следующим образом. После выбора вида и параметров первого типового звена строится его цифровая модель на ЭВМ, на вход которой подается тот же самый двоичный псевдослучайный сигнал x_{Ti} , который подавался на вход объекта или ЦМО.

Сигнал на выходе первого звена обозначим через \overline{y}_{1i} , $i = \overline{1, n}$, а через $z'_i = z_i - \overline{y}_{1i}$ – разность между сигналами на выходе объекта и выходе первого звена. Таким образом, сигнал z'_i играет роль остаточного сигнала, в котором отражена реакция на x_{Ti} оставшихся звеньев с наложенным возмущением. Если объект описывается всего лишь одним звеном, то z'_i содержит только возмущение и ошибки за счет неточной оценки параметров $\overline{W}_1(p)$, остаточная ИХ не нужна.

Заменяя в (9) значения z_i на z'_i , получаем отсчеты остаточной ИХ объекта w'_{1k} , $k = \overline{1, r}$. Теперь остаточную ИХ $w'_1(t)$ можно рассматривать как ИХ нового объекта, к которой следует применить уже рассмотренную процедуру выбора подходящего типового звена и его параметров. Найденные ПФ и ИХ второго звена – $\overline{W}_2(p)$ и $\overline{w}_2(t)$.

Если второе типовое звено с ПФ $\overline{W}_2(p)$ выбрано так, что ИХ $\overline{w}_2(t)$ будет близка к остаточной ИХ $w'_1(t)$, то этап II идентификации считается законченным. В противном случае второе звено следует выбирать так, чтобы получившаяся после его выбора остаточная ИХ как можно лучше приближалась бы к ИХ какого-либо типового звена.

Далее следует определить новую остаточную ИХ w'_{2k} , $k = \overline{1, r}$, пользуясь выше описанной процедурой: определить реакцию второго звена \bar{y}_{2i} на вход x_{Ti} и $z'_i = z'_i - \bar{y}_{2i}$ и получить отсчеты остаточной ИХ объекта w'_{2k} из уравнения (9), заменив z_i на z'_i , потом приступить к подбору *третьего* звена. Если объект полностью описывается двумя звеньями, то z'_i – грубая оценка возмущения ξ_i . Подобная процедура может повторяться несколько раз до тех пор, пока не будет подобрано последнее звено, ИХ которого будет достаточно хорошо аппроксимировать остаточную ИХ.

Так как процедура идентификации основана на визуальном сравнении ИХ очередного звена с остаточной ИХ и об окончательном виде идентифицированной ИХ можно судить лишь по окончании выбора типов всех звеньев и их параметров, то в результате будет получена структура исследуемого объекта в виде набора типовых звеньев с грубыми оценками параметров звеньев.

Этап III – получение точной оценки параметров. Вектор грубых параметров обозначим как $\bar{\beta} = (\bar{\beta}_1, \dots, \bar{\beta}_m)^T$.

Существенной особенностью рассматриваемой задачи, отличающей ее от известных задач оценивания параметров, является то, что в результате идентификации получена модель объекта, вектор параметров которой $\bar{\beta} = (\bar{\beta}_1, \dots, \bar{\beta}_m)^T$ является лишь грубым приближением к вектору параметров β идентифицируемого объекта. С этой моделью можно проводить те же самые эксперименты на ЭВМ, что и с объектом, то есть подавать на вход модели тот же самый сигнал x_{Ti} и получать на выходе реакцию $\bar{y}_i = f_i(\bar{\beta})$, $i = \overline{1, n}$. Судить о качестве модели можно сопоставляя сигнал \bar{y}_i на выходе модели объекта с сигналом z_i на выходе объекта.

Вектор невязок, вызванный неточностью определения параметров объекта и действием возмущения, который характеризует отличие выхода идентифицируемого объекта от выхода модели, будет равен:

$$e_i = z_i - \bar{y}_i = z_i - f_i(\bar{\beta}), \quad i = \overline{1, n}. \quad (10)$$

Если вектор поправок к грубой оценке $\Delta\beta = (\Delta\beta_1, \dots, \Delta\beta_m)^T$ такой, что $\beta = \bar{\beta} + \Delta\beta$, то компоненты $\Delta\beta_k$, $k = \overline{1, m}$ вектора $\Delta\beta$ можно найти по МНК: для этого уравнение $z_i = f_i(\beta) + \xi_i$ приводим к линейному путем разложения $f_i(\beta)$ в ряд Тейлора в окрестности грубой оценки $\bar{\beta}$, ограничившись линейными членами разложения:

$$f_i(\beta) = f_i(\bar{\beta} + \Delta\beta) = f_i(\bar{\beta}) + \sum_{k=1}^m h_{ik} \Delta\beta_k, \quad \text{где } h_{ik} = \left. \frac{\partial f_i(\beta)}{\partial \beta_k} \right|_{\beta = \bar{\beta}}, \quad i = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, m}. \quad (11)$$

Так как аналитическое выражение для $f_i(\beta)$ отсутствует, то значения h_{ik} можно получить лишь численным методом: задаваясь малыми приращениями параметров $d\beta_k$, $k=\overline{1, m}$, и вводя в рассмотрение измененный вектор грубых оценок:

$$\overline{\beta}^{(k)} = (\overline{\beta}_{1k}, \dots, \overline{\beta}_{mk}), \quad k=\overline{1, m}, \text{ где } \overline{\beta}_{jk} = \begin{cases} \overline{\beta}_j & \text{при } j \neq k \\ \overline{\beta}_k + d\beta_k & \text{при } j = k, j = \overline{1, m} \end{cases}.$$

Величина h_{ik} найдется из соотношения $h_{ik} = \frac{f_i(\overline{\beta}^{(k)}) - f_i(\overline{\beta})}{d\beta_k}$, $i = \overline{1, n}$.

Тогда выражение (11) можно записать в более компактном виде:

$$f_i(\beta) = f_i(\overline{\beta}) + h_i \Delta\beta, \quad i = \overline{1, n}, \text{ где вектор } h_i = (h_{i1}, \dots, h_{im}). \quad (12)$$

С учетом уравнения (12) уравнение $z_i = f_i(\beta) + \xi_i$ при этом принимает вид:

$$z_i = f_i(\overline{\beta}) + h_i \Delta\beta + \xi_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (13)$$

Вектор невязок (10) с учетом (13) будет равен: $e_i = z_i - f_i(\overline{\beta}) = h_i \Delta\beta + \xi_i$, $i = \overline{1, n}$,

или

$$E = H \Delta\beta + v, \quad (14)$$

где
$$E = \begin{bmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_n \end{bmatrix}, \quad v = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \vdots \\ \xi_n \end{bmatrix}.$$

Тогда оценка значений $\Delta\beta$ по обычному МНК получится $\hat{\Delta\beta} = (H^T H)^{-1} H^T E$, а уточненный вектор значений параметров объекта найдется как $\hat{\beta} = \overline{\beta} + \Delta\hat{\beta}$.

Критерием качества оценки может служить сумма квадратов невязок

$$S = \sum_{i=1}^n e_i^2. \quad (15)$$

Исходная грубая оценка $\overline{\beta}$ может значительно отличаться от истинного значения вектора параметров β . Если произошло даже небольшое улучшение оценки – о чём можно судить по уменьшению величины S , то можно новую оценку принять снова за грубую и повторить процесс оценивания, то есть использовать итерационную процедуру. Процесс оценивания заканчивается, если в результате очередной итерации не произошло уменьшение критерия S .

Проверкой *адекватности* полученной модели объекта является успешное завершение итерационной процедуры оценивания параметров. Если совокупность типовых звеньев правильно отражает структуру модели объекта и грубые оценки параметров не очень сильно отличаются от истинных значений, то с каждой новой итерацией величина S (15) будет уменьшаться, пока не достигнет некоторого минимального значения, обусловленного действием возмущения. Величина вектора поправок к грубой оценке $\Delta\beta$ при

этом будет близка к нулю, что также подтверждает правильность проведения процедуры идентификации.

Если же структура модели объекта в виде комбинации типовых звеньев была выбрана неправильно или грубые оценки параметров очень сильно отличались от истинных значений, то итерационная процедура не приведет к уменьшению S : величина S с увеличением числа итераций будет возрастать. Тогда необходимо проводить процедуру идентификации заново.

Проведенное сравнение результатов идентификации имитационных моделей линейных динамических объектов разработанной процедурой с известными способами идентификации показало, что применение данной процедуры дает преимущество по точности от 25 до 79 % в зависимости от порядка объекта и величины дисперсии возмущающего воздействия. В работе возмущение формировалось с помощью встроенного в систему MATLAB оператора RANDN как массив размером $1 \times n$, состоящий из случайных величин, распределенных по нормальному закону с дисперсией dsp .

Оценка погрешности результатов идентификации производилась по нормированному СКО идентифицированных значений ИХ от заданных значений

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^r [w_H(t_k) - w_T(t_k)]^2}{\sum_{k=1}^r [w_T(t_k)]^2}}, \quad (16)$$

где $w_H(t_k)$ и $w_T(t_k)$ – идентифицированные и теоретические значения ИХ.

В четвертой главе проводится решение прикладной задачи по осуществлению входного контроля электрических параметров разделительных фильтров для акустических систем (АС) на основе идентификации ИХ.

В процессе проектирования АС активно используется компьютерное моделирование электроакустических характеристик будущей АС, которые существенным образом зависят от конструкции, схемотехники и качества элементов разделительных фильтров. Исправные разделительные ФНЧ и ФВЧ второго порядка имеют ПФ и ИХ, соответствующие типовым звеньям № 5 и 4 (см. таблицу).

В работе сделан анализ возможных неисправностей в схемотехнике двух видов пассивных фильтров: ФНЧ и ФВЧ второго порядка (короткие замыкания и обрывы, вызванные некачественным монтажом или браком печатной платы), и для всех случаев получены ПФ, выражения для ИХ и связь параметров типовых звеньев a , b , c и d с электрическими параметрами элементов фильтров.

Для этих двух типов фильтров были рассчитаны диапазоны значений параметров a , b , c и d при заданных допусках возможных разбросов значений элементов фильтров – резистора, катушки индуктивности, конденсатора.

Получены соотношения, позволяющие по экспериментально измеренной ИХ фильтра сделать оценки значений параметров a , b , c и d . Если получаемые оценки значения коэффициентов a , b , c и d попадают в теоретически рассчитанный диапазон значений, то это указывает на исправность фильтра и использование качественных элементов, монтажа.

Разработан и внедрен алгоритм для проверки оператором фильтра из партии однотипных фильтров. При применении этого алгоритма время тестирования одного фильтра уменьшилось в 5 раз (с 2 минут до 24 секунд), а также повысились достоверность и надежность входного контроля качества электрических параметров разделительных фильтров АС по сравнению с имеющимися методиками (при измерении АЧХ или частотной зависимости входного комплексного сопротивления фильтра) за счет автоматизации процесса анализа ИХ реального фильтра.

Осуществление входного контроля параметров фильтров с помощью ИХ типовых звеньев позволяет получить математическую модель реального разделительного фильтра в таком виде, который востребован в процессе проектирования и оптимизации конструкции АС и ее электроакустических параметров.

В заключении приводится обобщение основных результатов работы.

В приложениях приводятся поясняющий материал, не вошедший в основной текст работы, а также копии документов о внедрении результатов исследования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен обзор методов идентификации линейных динамических объектов во временной области на основе определения ИХ. Показаны преимущество активных методов идентификации и недостатки имеющихся способов получения ПФ объекта. Сформулированы задачи исследования.

2. Разработана цифровая модель линейного динамического объекта в виде программы для ЭВМ. Проведены экспериментальные исследования ЦМО объектов с различными ПФ и входными сигналами, которые подтвердили ее работоспособность и устойчивость. Сделаны рекомендации относительно выбора интервала дискретизации h_d и шага численного метода h , которые обеспечивают требуемую точность.

3. Предложены процедура выделения из экспериментально полученной ИХ объекта в условиях действия возмущений путем подачи на вход объекта двоичного псевдослучайного сигнала входящих в объект ИХ типовых звеньев и грубая оценка их параметров. При этом структура модели объекта получается в виде комбинации параллельно соединенных выбранных типовых звеньев, а ПФ – в виде суммы ПФ выбранных типовых звеньев.

4. Разработан алгоритм перехода от грубых оценок параметров к их точным оценкам в условиях действия возмущений.

5. Создан программный комплекс *IDNTF* в системе MATLAB для идентификации линейных динамических объектов в условиях действия возмущений, основанный на предлагаемой процедуре идентификации.

6. Проведены анализ и сравнение с известными примерами идентификации имитационных моделей линейных динамических объектов с использованием входного двоичного псевдослучайного сигнала.

7. Идентификация ИХ типовыми звеньями использована для классификации видов неисправностей пассивных разделительных фильтров второго порядка для АС и создания математической модели реальных фильтров.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

1. Сафронова В. С., Коршунов Ю. М. Цифровая модель аналогового динамического объекта // Вестник РГРТА. – 2000. – Вып. 7. – С. 44 – 47.
2. Литвинова В. С., Коршунов Ю. М. Оценка параметров идентифицированной импульсной характеристики // Вестник РГРТА. – 2002. – Вып. 10. – С. 112 – 113.
3. Коршунов Ю. М., Литвинова В. С. Идентификация линейного динамического объекта на основе его представления в виде комбинации типовых звеньев // Известия АН. Теория и системы управления. – 2003. – № 5. – С. 5 – 11.
4. Yu. M. Korshunov, V. S. Litvinova. Identification of linear dynamic object from its representation as a combination of standard units // **Journal of Computer and Systems Sciences International**. – 2003, Vol. 42, No. 5 – PP. 663 – 669.

В других изданиях:

5. Сафронова В. С., Коршунов Ю. М. Идентификация импульсной характеристики типового звена динамической системы // Проблемы математического моделирования и обработки информации в задачах управления: сб. науч. тр. – Рязань: РГРТА. – 2000. – С. 62 – 66.
6. Сафронова В. С. Идентификация импульсной характеристики линейного динамического объекта // Тез. докл. международной научн.-техн. конф. «Гражданская авиация на рубеже веков». – М.: МГТУГА, 2001. – С. 166.
7. Сафронова В. С. Идентификация линейных динамических объектов путем синтеза структуры объекта в виде комбинации типовых звеньев // Тез. докл. “Научной сессии МИФИ-2002” Т.12. Информатика. Компьютерные системы и технологии. – М.: МИФИ, 2002. – С. 83–84.

8. **Коршунов Ю. М., Литвинова В. С.** Оценка параметров идентифицированной модели динамического объекта // Тез. докл. 37-й научн.-техн. конф. – Рязань: РГРТА, 2002. – С. 32.
9. **Коршунов Ю. М., Литвинова В. С.** Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002611619 «Программный комплекс для идентификации и оценки параметров импульсных характеристик аналоговых линейных динамических объектов в условиях действия возмущений» / Зарегистрировано 19.09.2002 г. Оф. бюл. Рос. агентства по патентам и товарным знакам "Программы для ВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем", 2002. –№ 4(41). Ч.2.– С. 333.
10. **Литвинова В. С.** Выбор входного сигнала при статистической идентификации линейного динамического объекта // Тез. докл. VI всероссийской научн. - тех. конф. «Информационные технологии в науке, проектировании и производстве». – Н. Новгород: НГТУ, 2002. – С. 17.
11. **Литвинова В. С.** Идентификация импульсной характеристики на основе цифровой модели // Тез. докл. VI Всероссийской научн. конф. студентов и аспирантов «Техническая кибернетика, радиоэлектроника и системы управления». – Таганрог: ТПРУ, 2002. – С. 40.
12. **Коршунов Ю. М., Литвинова В. С.** Определение импульсной характеристики линейного динамического объекта в условиях действия возмущения // Тез. докл. 4-й международной научн.-техн. конф. «Электроника и информатика – 2002». Часть 2. – М.: МИЭТ, 2002. – С. 112 – 113.
13. **Литвинова В. С.** Задача идентификации и оценки параметров аналогового линейного динамического объекта // Тез. докл. IX международной научн.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – С. 379 – 380.
14. **Литвинова В. С.** Сравнительный анализ вариантов статистической идентификации линейных динамических систем с использованием псевдослучайных сигналов // Проблемы математического моделирования и обработки информации в научных исследованиях: сб. научн. тр. – Рязань: РГРТА, 2003. – С. 71 – 76.
15. **Литвинова В. С.** О применении метода типовых звеньев для решения задачи идентификации линейных систем // Тез. докл. VIII всероссийской научн.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». – Рязань: РГРТА, 2003. – С. 60–62.
16. **Коршунов Ю. М., Литвинова В. С.** Идентификация линейных динамических объектов: методические указания к лабораторным работам. (№ 3530). – Рязань: РГРТА, 2004. – 24 с.
17. **Коршунов Ю. М., Литвинова В. С.** О применении метода типовых звеньев в задаче идентификации линейного динамического объекта // Тез. докл. IV международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'05. –М.: ИПУ РАН, 2005. – С. 245 – 259.

Литвинова Варвара Сергеевна

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИНЕЙНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА
В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ
НА ОСНОВЕ ЕГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ В ВИДЕ КОМБИНАЦИИ
ТИПОВЫХ ЗВЕНЬЕВ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 30. 10. 09 . Формат бумаги 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать ризографическая. Усл. печ. л. 1,0.
Уч. - изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № **910**

Отпечатано в ООО "Интермета"
390000, Рязань, ул. Семинарская, 3.