

На правах рукописи



Минко Анна Александровна

**АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ
НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПОДОБНЫХ
ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ГАУССА**

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 ГОУ ВПО «Рязанский государственный
радиотехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Витязев Владимир Викторович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ
Егупов Николай Дмитриевич

кандидат технических наук, доцент
Сосулин Юрий Андреевич

Ведущая организация: **ФГУП «НИИ автоматики», г. Москва**

Защита состоится 15 мая 2009 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д212.211.01 в ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Автореферат разослан 8 апреля 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.211.01
кандидат технических наук,
доцент



В. Н. Пржегорлинский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В аэрокосмических, металлообрабатывающих и других отраслях промышленности широко используются многозвенные устройства, которые в процессе эксплуатации подвергаются воздействиям ударных и других временных возмущений. Реакции на подобные возмущения, наблюдаемые в известных точках данных устройств, носят характер непериодических колебаний сложной формы. Задача идентификации поведения многозвенных устройств в данном случае сводится к определению моделей их динамических свойств по реализациям вход-выход, заданным на коротких временных интервалах, соизмеримых с длительностью переходных процессов в устойчивых объектах, но не критичных к свойствам их устойчивости и многомерности.

В теории автоматического управления в разделе «Идентификация» накоплен большой опыт построения математических моделей динамических свойств объектов управления. На практике предпочтение для построения математических моделей такого рода процессов отдается моделям в виде обыкновенных линейных дифференциальных уравнений (ДУ). Более точные методы описания динамических свойств идентифицируемых объектов, такие как функциональные ряды, нелинейные ДУ и т. д., требуют при процедуре идентификации неприемлемо большого объема аппаратно-временных затрат, так что полученная модель либо теряет свою адекватность вследствие неизбежных изменений параметров объекта, либо может использоваться на временных интервалах, значительно меньших, чем время, затрачиваемое на определение модели. Данный подход позволяет сократить время, затрачиваемое на определение моделей каждого из каналов многомерного объекта, и увеличить время использования этих моделей каналов, если режим работы объекта не выходит за пределы окрестностей типовых значений, учтенных при идентификации. Задача идентификации объектов в форме ДУ до сих пор не получила исчерпывающего решения. Современные высокоразвитые моделирующие системы, такие как MATLAB и Simulink, не имеют в своих арсеналах эффективных методик идентификации объектов по реализациям вход-выход в виде ДУ, ограничиваясь лишь разностными аналогами, не позволяющими однозначно восстановить обыкновенное ДУ. В связи с этим возникает необходимость разработки алгоритмов и реализующих их программных средств идентификации объектов моделями, описываемыми линейными ДУ высокого порядка по коротким реализациям вход-выход.

Идентификация объектов, формируемая на протяжении последних 60 лет, базируется на основополагающих работах Гропа Д., Дейча А.М., Льюнга Л., Медича Дж., Мелса Дж.Л., Сейджа Э.П., Райбмана Р.С., Солодовникова В.В., Цыпкина Я.З., Эйкхоффа П., Коршунова Ю.М., Егупова Н.Д. и других авторов.

В качестве **объекта** исследования рассматриваются системы автоматического управления техническими объектами, в том числе и многомерные. **Предметом** исследований являются каналы многомерного объекта, экспериментально исследуемого по технологии «один вход – все выходы» моделями в виде линейных ДУ с постоянными коэффициентами.

Цель работы заключается в разработке и исследовании эффективных алгоритмов идентификации каналов одно- и многомерных объектов моделями в виде обыкновенных ДУ по коротким реализациям сигналов вход-выход, использующих априорную информацию о величине допустимой погрешности аппроксимации заданного выходного сигнала канала выходным сигналом его модели.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **основные задачи**:

- выбор интегральных преобразований финитных реализаций вход-выход объектов, осуществляющих алгебраизацию линейных ДУ и аппроксимацию сигналов;
- исследование основных свойств и разработка алгоритмов использования изображений сигналов вход-выход;
- выработка рекомендаций по выбору известных численных процедур, позволяющих программными средствами реализовать алгоритмы идентификации объектов обыкновенными ДУ до 10-го порядка включительно;
- исследование предложенных алгоритмов для подтверждения их работоспособности и выработки рекомендаций по практическому применению.

Методы проведения исследований. Теоретические исследования основаны на гипотезе о возможности описания динамических свойств объекта (или одного из его каналов) линейным ДУ заданной структуры с постоянными коэффициентами, определяющим связь между финитными реализациями вход-выход объекта, и методах вычислительной математики и моделирования. Программная реализация осуществлена на базе пакета MATLAB в среде программирования Delphi 7.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Предложена коррекция обыкновенного линейного ДУ для описания связи между финитными реализациями вход-выход объекта. Обоснована методика учета постначальных и предоконечных координат фазового состояния финитной реализации вход-выход.

2. Исследовано аппроксимационное свойство преобразований Гаусса, позволяющее оценивать векторы фазовых координат предначального состояния реализаций вход-выход объекта на одной методической основе с решением других этапов процедуры идентификации.

3. Исследованы преобразования Гаусса полигармонических и случайных сигналов с целью выделения областей значений их параметров, при которых они обладают либо сглаживающими, либо резонансными свойствами.

4. Разработаны алгоритмы формирования систем линейных алгебраических уравнений из преобразований Гаусса реализаций вход-выход объектов при их идентификации моделями-кандидатами.

5. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение обобщенной идентификации объектов на основе вейвлет-подобных преобразований Гаусса. Они позволяют формировать банк моделей-кандидатов объекта и выбирать из него модель-претендент, отвечающую заданным требованиям к качеству идентификации.

Основные положения, выносимые на защиту:

- коррекция обыкновенного линейного ДУ, задающего связь между реализациями вход-выход, заданными на всей числовой оси, с целью получения связи между финитными реализациями вход-выход;
- результаты теоретических исследований основных свойств преобразований Гаусса, позволяющих эффективно решать задачу обобщенной идентификации;
- алгоритмы обобщенной идентификации линейных стационарных объектов на основе преобразований Гаусса реализаций вход-выход объекта с использованием банка моделей;
- результаты исследования эффективности разработанных алгоритмов обобщенной идентификации объектов на основе вейвлет-подобных преобразований Гаусса.

Практическая ценность работы состоит в том, что предложенные алгоритмы идентификации не имеют методических погрешностей, поэтому их следует применять:

- 1) для контроля качества численного решения линейных ДУ;
- 2) идентификации объектов по реализациям вход-выход длительностью единицы или десятки секунд с помощью разработанного программного продукта, в том числе и при искажениях выходного сигнала аддитивными шумами умеренной интенсивности.

Материалы исследований и разработанный программный продукт использованы в учебных процессах в Рязанском государственном радиотехническом университете и Рязанском высшем военном командном училище связи (военном институте) имени маршала Советского Союза М.В. Захарова, внедрены в проектах ООО «Космические системы спасения», г. Москва.

Апробация работы. Научные результаты, полученные в работе, докладывались и обсуждались на следующих международных, всероссийских и межрегиональных научно-технических конференциях: 2-й международной конференции и выставке «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (г. Москва, 1999), 36-й научно-технической конференции и 47-й студенческой научно-технической конференции (г. Рязань, 2000), международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO 2000 (г. Москва, 2000), межвузовской научно-методической конференции «VII Рязанские педагогические чтения» (г. Рязань, 2000), 6-й всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании» (г. Рязань, 2001), XII всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании» (г. Рязань, 2007), 33-й всероссийской научно-технической конференции «Сети, системы связи и телекоммуникации. Деятельность вуза при переходе на Федеральный государственный стандарт 3-го поколения» (г. Рязань, 2008).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 10 печатных работах, в том числе в 5 статьях, 2 из которых опубликованы в издании-

ях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 14 приложений. Работа содержит 164 страницы основного текста, 40 рисунков, 9 таблиц, список литературы включает 101 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, изложены цель и соответствующие ей задачи, представлена структура работы.

В первой главе произведен анализ задач идентификации объектов. В современных информационных технологиях одним из основополагающих подходов к решению задач обработки сигналов и изображений, нечеткого и нейросетевого управления динамическими процессами является декомпозиция с последующим объединением. В области идентификации объектов управления этот подход выражается в виде нечетких моделей, формируемых путем взвешивания упрощенных компонент функциями принадлежности. Идентификация нечеткими моделями заостряет необходимость использования методов, позволяющих при приемлемом уровне аппаратно-временных затрат получать упрощенные модели, адекватные объекту в локальных режимах его функционирования. Особенно часто в качестве упрощенных моделей выбирают линейные модели с постоянными параметрами, особенности которых рассмотрены в данной главе. Методы определения линейных моделей объектов подразделяются на непараметрические и параметрические. Непараметрические методы описывают оператор модели в виде частотных характеристик или интеграла свертки, а параметрические – в виде ДУ. Непараметрическое описание модели позволяет исключить из рассмотрения проблему «выбора порядка» ДУ, описывающего модель, но порождает другую проблему – необходимость стабилизации каналов объекта, если они неустойчивы, обратными связями. В этом случае экспериментальное исследование объекта должно осуществляться по технологии «один вход – один выход». Это значительно усложняет задачу получения адекватной модели. Более приемлемым в работе отмечено описание модели многомерного объекта системой обыкновенных линейных ДУ вход-выходы:

$$\sum_{i=0}^{n_k} a_{ki} p^{n_k-i} y_k(t) = \sum_{q=1}^r \sum_{j=0}^{m_{kq}} b_{kqj} p^{m_{kq}-j} v_q(t), \quad k=\overline{1,l}, \quad p \equiv \frac{d}{dt}, \quad (1)$$

или в форме уравнений состояния и выхода. Модель вход-выход каждого канала содержит в качестве неизвестных следующие параметры: порядки n_k и коэффициенты a_{ki} , $i=\overline{0, n_k-1}$, операторов $D_k(p)$ левой части; порядки m_{kq} и коэффициенты b_{kqj} , $j=\overline{0, m_{kq}}$, операторов $B_{kq}(p)$ правой части, векторы $Y_k(0-) = (Y_k(0-) \dots Y_k^{(n_k-1)}(0-))^T$, $k=\overline{1,l}$, фазовых координат выходного сигнала k -го канала в предначальный момент времени $t=0-0=0-$. Технология «один вход – все выходы» экспериментального исследования многомерного объекта

позволяет рассматривать совокупность ДУ:

$$\sum_{i=0}^{n_{kq}} a_{kqi} p^{n_{kq}-i} y_{kq}(t) = \sum_{j=0}^{m_q} b_{qj} p^{m_q-j} v_q(t), \quad k = \overline{1, l}, \quad q = \overline{1, r}, \quad (2)$$

с параметрами, соответствующими вышеотмеченному списку. Совокупность (2) отмечена как универсальная форма декомпозиции модели многомерного объекта, сводя задачу его идентификации к определению совокупности одномерных моделей. Кроме того, эта форма не критична к устойчивости объекта и является наиболее «экономичной» по числу учитываемых параметров, поскольку в линейных режимах объекта она не имеет методической погрешности. Уравнения состояния отмечены в качестве вторичной формы описания модели, так как в общем случае координаты состояния могут быть физически ненаблюдаемыми.

В работе проанализированы известные способы определения параметров линейных ДУ по реализациям вход-выход: понижение порядка ДУ за счет интегрирования, применение модулирующих функций, методы моментов, использование разностных аппроксимаций ДУ и аппроксимаций сигналов ортогональными рядами. По результатам анализа сделаны следующие выводы.

1. Понижение порядка ДУ за счет интегрирования, использование модулирующих функций и методы моментов в принципе эквивалентны друг другу, различаясь лишь видом интегральных преобразований, используемых для алгебраизации ДУ. Ядра преобразований имеют вид:

1) $\psi_n(\tau, t) = \frac{1}{n!} (t - \tau)^n$, $n = 0, 1, 2, \dots$, $\tau \in [0, T]$, - ядра метода понижения порядка;

2) $\psi_n(t)$ - неизвестные модулирующие функции, обращающиеся в ноль вместе со своими производными на краях интервала $[0, T]$;

3) $\psi_n(t) = \frac{1}{n!} (-t)^n$, $n = 0, 1, 2, \dots$, $t \in [0, 1]$, - ядра метода М. Симою;

4) $\psi_n(t) = e^{-s_n t}$, $n = 0, 1, 2, \dots$, $t \in [0, \infty)$, $s_n \in R$, - ядра в методах моментов.

Последовательности этих ядер не используются непосредственно в качестве элементов систем ортогональных функций и, следовательно, практически не позволяют решать задачи аппроксимации, имеющиеся в общем случае в процедуре идентификации.

2. Использование аппроксимаций сеточных соотношений вход-выход решениями разностных уравнений является доминирующим подходом, положенным в основу большинства работ, посвященных идентификации объектов управления. В основу аппроксимаций положены: замена производных конечными или разделенными разностями, аппроксимация Тастина, применение матричного экспоненциала. Во всех случаях дискретный аналог ДУ нелинейным образом зависит от периода квантования и требует тщательной обработки сеточных соотношений $[t_i, v_i]_0^{N_v}$, $[t_j, y_j]_0^{N_y}$, $t_i \neq t_j$ при $i = j$, вход-выход объекта с целью придания им свойств, определяемых условиями аппроксимации. Однако условия обработки могут изменить статистические характеристики шумов. Для решения подобных задач широко используются методы оптимального оценива-

ния. Применение метода МНК-решений нецелесообразно из-за их смещенности. Марковские и байесовские оценки, а также оценки максимального правдоподобия требуют при реализации значительного объема априорной информации о входо-выходных соотношениях многомерного объекта, получение которой представляется проблематичным.

Несмотря на внушительное число публикаций (более 40 тысяч), посвященных решению различных аспектов задачи идентификации, она до сих пор остается актуальной. Иллюстрацией этого являются периодические международные конференции «Идентификация систем и задачи управления». Отмечено, что современные идеи вейвлет-преобразований не привлекаются для решения задач идентификации. Наиболее востребованными являются вейвлет-преобразования с материнскими вейвлетами, полученными дифференцированием гауссовской кривой. Для решения поставленной в работе задачи идентификации эти вейвлеты предлагается дополнить, получив двупараметрические интегральные преобразования, названные Уваевым А.И. преобразованиями Гаусса (ПГ).

Во второй главе рассмотрены основные свойства ПГ, используемые в разработанных алгоритмах. ПГ порядка « k » функции $f(x)$, $x \in R$, названы двупараметрические вещественные преобразования

$$G_f^{(k)}(r, s) = \langle f, Q_k \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) Q_k(x-r, s) dx, \quad r \in R, \quad s \in R_+, \quad (3)$$

$$\text{где } Q_k(x-r, s) = \frac{(-1)^k}{\sqrt{2\pi s}} \frac{d^k}{dx^k} e^{-\frac{(x-r)^2}{2s}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, - \quad (4)$$

функции Гаусса, допускающие представление

$$Q_k(x-r, s) = \frac{1}{s^k \sqrt{2\pi s}} H_k(x-r, s) e^{-\frac{(x-r)^2}{2s}}, \quad (5)$$

где $H_k(x-r, s)$, $k = 0, 1, 2, \dots$, - полиномы Эрмита.

Частные производные ПГ удовлетворяют условию

$$G_f^{(m)}(r, s) = G_f^{(m+k)}(r, s), \quad m, k = 0, 1, 2, \dots, \quad r, s \in R_+. \quad (6)$$

Для последовательности $s_1 > s_2 > \dots \in R_+^2$ функции $Q_k(x-r, s_i)$, $i = 0, 1, 2, \dots$, дают секвенциальное определение δ -функции и ее производных. Свойство (6) лежит в основе формул обращения ПГ:

$$\lim_{s \rightarrow 0+} G_f^{(m)}(x, s) = f^{(m)}(x), \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (7)$$

являющихся секвенциальными формулами, задающими обобщенные производные функции $f(x) \in L_G$, где $L_G = \{f(x), x \in R : \langle f, Q_l \rangle < \infty, l = 0, 1, 2, \dots\}$ - множество функций, преобразуемых по Гауссу.

Получена формула численного обращения ПГ функции $f(x) \in L_G$:

$$f(x) = \sum_{i=0}^n a_i(r_1, s_1) H_i(x-r_1, s_1) + a_{n+1}(\zeta, \eta) H_{n+1}(x-r_1, s_1), \quad \zeta \in [x, r_1], \eta \in [s, s_1], \quad (8)$$

где $a_i(r_1, s_1) = \frac{1}{i!} G_f^{(i)}(r_1, s_1)$ - коэффициенты Фурье разложения функции

$$f(x) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i(r_1, s_1) H_i(x - r_1, s_1) \quad (9)$$

в ряд по полиномам Эрмита. Получено, что ошибка аппроксимации функции $f(x), x \in [a, b]$ конечной суммой ряда (9) допускает оценку

$$\max_{x \in [a, b]} |\varepsilon_n(x)| \leq |a_{n+1}(\zeta, \eta)| \max_{x \in [a, b]} |H_{n+1}(x - r_1, s_1)| \quad (10)$$

в метрике пространства C . Выражение (9) допускает дифференцирование так, что справедливы представления

$$f^{(k)}(x) = \sum_{m=k}^{\infty} m(m-1)\dots(m-k+1) a_m(r_1, s_1) H_{m-k}(x - r_1, s_1), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (11)$$

где $x \in R_{l_\varepsilon} \subset R$, а в качестве $f^{(k)}(x)$ выступают обобщенные производные функции $f(x)$. При оценке производных функций в точках разрыва непрерывности ряды (11) расходятся.

При исследовании преобразований периодических функций показано, что оператор ПГ можно рассматривать в виде фильтра с амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ)

$$M_k(\omega) = \omega^k e^{-\frac{\omega^2 s}{2}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad s > 0, \quad (12)$$

и фазочастотной характеристикой

$$\varphi_k(\omega) = k \frac{\pi}{2}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad s > 0. \quad (13)$$

АЧХ $M_k(\omega), k = 1, 2, 3, \dots$, являются резонансными, а их максимумы

$$\max_{\omega \in [0, \infty)} M_k(\omega) = \left(\frac{k}{se} \right)^{\frac{k}{2}}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, \quad (14)$$

наблюдаются при частотах

$$\omega_{pk} = \sqrt{\frac{k}{s}}, \quad k = 1, 2, 3, \dots,$$

где e - число Непера. Максимумы (14) принимают при $k > 30$ значения не меньшие чем $4,4 \cdot 10^{15}$. На каждом из интервалов изменения частоты ω на один рад/с $n < \omega < n+1$ содержится $2n$ значений ω_{pk} таких, что $n^2 < k < (n+1)^2$, $n = 1, 2, 3, \dots$. Сдвиг параметра $s \in R_+$ вдоль положительной вещественной полуоси позволяет менять значения резонансных частот, что дает возможность селекции низкочастотных $\omega \in [0, 1]$ колебаний на фоне, состоящем из постоянной составляющей и колебаний с частотами $f \geq 10$ Гц. Коэффициенты $a_k(r, s)$ Фурье практически нечувствительны к колебаниям любых частот при $k \geq 7$. Показано нормирование функций Гаусса, которое приводит к преобразованиям с максимумами АЧХ, равными единице.

Проанализированы ПГ финитных сигналов в виде импульсов с вершиной $f(t)$, $t \in (0, T)$, имеющей не более счетного числа разрывов 1-го рода. Получено выражение функционала

$$\langle f, \delta^{(k)}(t-r) \rangle = \lim_{s \rightarrow 0+} \langle f, Q_k(t-r, s) \rangle = \begin{cases} 0, & r < 0, r > T; \\ f^{(k)}(r), & r \in (0, T); \\ 0,5 f^{(k)}(0+), & r = 0; \\ 0,5 f^{(k)}(T-), & r = T, k = 0, 1, 2, \dots, \end{cases} \quad (15)$$

определяющего значения обобщенных производных. Это соотношение используется в алгоритме оценки предначальных значений фазовых координат объекта по «обучающей выборке» его выходной реализации.

Проделанный анализ ПГ центрированного стационарного белого шума интенсивностью N показал, что элементы ковариационной матрицы $K_{G_e}^{(k,n)}(\tau) = \left(M \left[G_e^{(k)}(r_1, s) G_e^{(n)}(r_2, s) \right] \right)$, $k, n = 0, 1, 2, \dots$, определяются в виде

$$K_{G_e}^{(k,n)}(\tau) = (-1)^n N Q_{k+n}(\tau, s_2), \quad k, n = 0, 1, 2, \dots, \quad (16)$$

где $\tau = r_2 - r_1$, $s_2 = 2s$, N - интенсивность белого шума.

Дисперсии $D_{G_e}^{(n)} = K_{G_e}^{(n,n)}(0)$ ПГ центрированного белого шума имеют вид

$$D_{G_e}^{(n)} = N \frac{(2n+1)!!}{2^{n+1} s^n \sqrt{\pi s}} = N \alpha_n(s), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (17)$$

С увеличением n дисперсии $D_{G_e}^{(n)}$ возрастают при $s \leq 2$ и равномерно убывают при увеличении значения параметра s . Дисперсии коэффициентов $a_k(r, s)$ Фурье равномерно убывают с ростом k при всех $s \geq 0,5$.

Анализ особенностей обобщенной параметрической идентификации показал, что интегральным преобразованиям следует подвергать модифицированное ДУ вида

$$\sum_{i=0}^n a_i y_T^{(n-i)}(t) = \sum_{j=0}^m b_j v_T^{(m-j)}(t) + V_0^B - V_T^B, \quad (18)$$

где $y_T(t)$, $v_T(t)$ - финитные сигналы вида $z_T(t) = \begin{cases} z(t), & t \in (0, T); \\ 0, & t < 0, t > T, \end{cases}$

а

$$V_0^B = \sum_{i=0}^n a_i \left[\sum_{j=1}^{n-i} y^{(n-i-j)}(0+) \delta^{(j-1)}(t) \right] - \sum_{k=0}^m b_k \left[\sum_{j=1}^{m-k} v^{(m-k-j)}(0+) \delta^{(j-1)}(t) \right];$$

$$V_T^B = \sum_{i=0}^n a_i \left[\sum_{j=1}^{n-i} y^{(n-i-j)}(T-) \delta^{(j-1)}(t-T) \right] - \sum_{k=0}^m b_k \left[\sum_{j=1}^{m-k} v^{(m-k-j)}(T-) \delta^{(j-1)}(t-T) \right] -$$

балансирующие слагаемые. ДУ (18) задает связь между сигналами финитной реализации вход-выход. Учет балансирующих членов позволил разработать эффективные алгоритмы обобщенной идентификации на основе ПГ.

В третьей главе дается теоретическое обоснование алгоритмов обобщен-

ной идентификации линейных стационарных объектов на основе ПГ реализации вход-выход, заданной на конечном интервале $[0, T]$. Модель объекта представлена линейным ДУ

$$\sum_{i=0}^n a_i y^{(n-i)}(t) = \sum_{j=0}^m b_j v^{(m-j)}(t), \quad n = \overline{1, 10}, \quad m \leq n-1, \quad a_n = 1. \quad (19)$$

Сначала рассмотрен вариант, когда объект под действием входа $v(t)$, $t \in (0, T)$, стартует из нулевых предначальных $Y_{0-} = (y(0-)\dots y^{(n-1)}(0-))^T = 0$ условий. Параметрами обобщенной модели объекта являются вектор $P = (a_0 \dots a_{n-1} \ b_0 \dots b_m)^T$ коэффициентов и вектор координат фазового состояния $Y_{T-} = (y(T-)\dots y^{(n-1)}(T-))^T$ выходного сигнала в предоконечный момент времени. Это позволяет использовать модель (19) для прогнозирования реакций объекта на входной сигнал при $t \in (T, \infty)$. Модификация ДУ за счет балансирующих членов обосновывает связь между ПГ реализации вход-выход в виде

$$\sum_{i=0}^n a_i G_y^{(h+n-i)}(r_{k_q}, s_{k_q}) = \sum_{j=0}^m b_j G_v^{(h+m-j)}(r_{k_q}, s_{k_q}), \quad (20)$$

$$h = 0, 1, 2, \dots, \quad (r_{k_q}, s_{k_q}) \in R_+^2, \quad a_n = 1,$$

соответствующем проекциям ДУ (19) на координатные функции $Q_l(t - r_{k_q}, s_{k_q})$, $l = \overline{0, 11}$, Гаусса. Зависимость (20) определяет правомочность системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)

$$GP = G^0, \quad (21)$$

где (G, G^0) - ее расширенная матрица. При первом подходе к формированию СЛАУ используются ПГ минимально необходимого порядка при количестве значений параметров $(r_{k_q}, s_{k_q}) \in R_+^2$, $k_q = \overline{1, q}$, ПГ, равном $q = n + m + 1$. Значения параметров ПГ выбираются так, чтобы $|Q_l(t - r_{k_q}, s_{k_q})| \leq \varepsilon$, $l \leq 11$, при $t \geq T$, где ε - произвольно малое число. Структуру матриц G и G^0 определяют выражения:

$$G = (G_y^{(n)}(r_{k_q}, s_{k_q}) \dots G_y^{(1)}(r_{k_q}, s_{k_q}) - G_v^{(m)}(r_{k_q}, s_{k_q}) \dots - G_v^{(0)}(r_{k_q}, s_{k_q})); \quad (22)$$

$$G^0 = (-1)G_y^{(0)}(r_{k_q}, s_{k_q}), \quad k_q \in [2, 20], \quad n = \overline{1, 10}, \quad m \in [0, n-1].$$

При другом подходе, полярном первому, ограничивается старший порядок используемых ПГ величиной, равной $h + n \leq 11$, $h = 1, 2, \dots$, и выбирается минимальное число значений параметров $(r_{k_q}, s_{k_q}) \in R_+^2$ ПГ. В данном случае требуется меньшее число ПГ, покрывающих расширенную матрицу (G, G^0) СЛАУ

(21), так как блоки G_y, G_v матрицы G являются теплицевыми.

После решения СЛАУ (21) определен вектор P параметров модели-кандидата объекта. Он позволяет рекуррентно вычислить вектор Y_{0+} постначальных значений координат фазового состояния выходного сигнала модели-кандидата исходя из баланса сингулярных составляющих ДУ модели:

$$\begin{aligned} y_M^{(g)}(0+) &= 0; \\ y_M^{(n-m)}(0+) &= \frac{b_0}{a_0} v(0+); \\ y_M^{(n-m+k)}(0+) &= \frac{1}{a_0} \left(\sum_{j=0}^k b_j v^{(k-j)}(0+) - \sum_{p=1}^{k-1} a_p y_M^{(k-p)}(0+) \right), \\ g &= \overline{0, n-m-1}, \quad n = \overline{1, 10}, \quad m = \overline{0, n-1}, \quad k = \overline{1, n-2}, \quad a_0 \neq 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Особенностью варианта идентификации объектов из нулевых $Y_{0-} = 0$ предначальных условий является то, что они позволяют решать СЛАУ с матрицей размером не более чем $2n \times 2n$.

При идентификации объектов, стартующих из ненулевых $Y_{0-} \neq 0$ предначальных условий, структура уравнений связи между ПГ реализации сигналов вход-выход приобретает следующий вид:

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^n a_i \left(G_y^{(h+n-i)}(r_{k_q}, s_{k_q}) - \sum_{g=0}^{n-1-i} y^{(n-1-i-g)}(0+) Q_{h+g}(-r_{k_q}, s_{k_q}) \right) = \\ = \sum_{j=0}^m b_j \left(G_v^{(h+m-j)}(r_{k_q}, s_{k_q}) - \sum_{p=0}^{m-1-j} v^{(m-1-j-p)}(0+) Q_{h+p}(-r_{k_q}, s_{k_q}) \right), \\ n = \overline{1, 10}, \quad m \in [0, n-1], \quad h = 0, 1, 2, \dots, \quad a_n = 1, \end{aligned} \quad (24)$$

при условии, что значения параметров $(r_{k_q}, s_{k_q}) \in R_+^2$ ПГ обеспечивают $|Q_l(t - r_{k_q}, s_{k_q})| \leq \varepsilon$, $l \leq 11$, при $t \geq T$, где ε - произвольно малое число. Для формирования СЛАУ, определяющей параметры модели объекта, требуется уже $q = 2n + m + 1$ значений параметров ПГ. Вектор P неизвестных СЛАУ содержит вектор $Z = (z_0 \dots z_{n-1})^T$, определяющийся постначальными значениями координат фазового состояния сигналов вход-выход объекта:

$$\begin{aligned} z_k &= \sum_{j=0}^{k+w} b_j v^{(k+w-j)}(0+) - \sum_{i=0}^k a_i y^{(k-i)}(0+), \\ k &= \overline{0, n-1}, \quad w = m - n, \quad w \in [-n, -1]. \end{aligned} \quad (25)$$

СЛАУ (21) размерностью $2n + m + 1$ имеет матрицу G со строками:

$$\begin{aligned} (G_y^{(n)}(r_{k_q}, s_{k_q}) \dots G_y^{(1)}(r_{k_q}, s_{k_q}) - G_v^{(m)}(r_{k_q}, s_{k_q}) \dots - G_v^{(0)}(r_{k_q}, s_{k_q}) Q_{n-1}(r_{k_q}, s_{k_q}) \dots Q_0(r_{k_q}, s_{k_q})), \\ k_q = \overline{1, 2n + m + 1}, \quad m \leq n - 1, \end{aligned} \quad (26)$$

и вектор-столбец правой части

$$G^0 = (-1) \left(G_y^{(0)}(r_1, s_1) \dots G_y^{(0)}(r_{2n+m+1}, s_{2n+m+1}) \right)^T. \quad (27)$$

Решение системы позволяет определить вектор P и вычислить значения координат $Y_{0+}^{(i)}$, $i \in \overline{0, n-1}$, вектора Y_{0+} при известном векторе V_{0+} . Из условий (23), (25) видно, что вектор Y_{0+} определяется только тогда, когда известен и вектор $V_{0+} = \left(v(0+) \dots v^{(m)}(0+) \right)^T$ координат фазового состояния входного сигнала объекта в постначальный момент времени, причём в общем случае он должен иметь $v^{(m)}(t) \neq 0$, $t \in (0, T)$. В противном случае потребуется модификация алгоритма, учитывающая конкретный вид входного сигнала.

Таким образом, при идентификации объекта неизвестной структуры с порядками операторов ДУ $n = \overline{1, 10}$, $m \leq n-1$, возбуждаемого произвольным входным сигналом как из нулевых, так и из ненулевых предначальных условий, следует определить вектор V_{0+} и сформировать банк моделей-кандидатов для данных значений ПГ, состоящий из 55 моделей: одна модель 1-го порядка; две модели 2-го порядка; три модели 3-го порядка и т.д. Затем последовательно определить векторы Y_{0+} , решить все линейные ДУ моделей-кандидатов и вычислить значения критерия качества аппроксимации выходного сигнала объекта решениями ДУ моделей-кандидатов. В качестве критерия соответствия объект-модель использован

$$J = \frac{\|y - y_M\|}{\|y\|}, \quad (28)$$

где $\|\cdot\|$ - подходящая норма. Выбор модели-претендента среди моделей-кандидатов осуществляется на основе условий: $J^* = \min$ или $J^* \leq J_{доп}$.

Получены соотношения, позволяющие оценить координаты векторов V_{0+} и V_{T-} фазового состояния входа в постначальный и в предоконечный моменты времени на основе ПГ этого сигнала. Отмечено, что с увеличением порядка производных возможности качественной аппроксимации уменьшаются. Поэтому предпочтение следует отдавать испытаниям предварительно невозбужденного объекта тестовыми сигналами.

Четвертая глава посвящена разработке численной реализации алгоритмов обобщенной идентификации в виде программного продукта. В него включены следующие компоненты:

- 1) блок приема и обработки входных данных;
- 2) блок определения параметров моделей-кандидатов;
- 3) блок выбора модели-претендента объекта.

Блок приема и обработки входных данных вычисляет ПГ $G_y^{(l)}(r_{k_q}, s_{k_q})$, $l = \overline{0, 10}$, и ПГ $G_v^{(m)}(r_{k_q}, s_{k_q})$, $m = \overline{0, 9}$, $k_q = \overline{1, q}$. Из этого набора ПГ в блоке определения параметров моделей-кандидатов формируется последовательность из 55 СЛАУ,

решения которых определяют операторы левой и правой частей ДУ при их фиксированных порядках. Для каждой модели-кандидата определяется вектор Y_{0+} постначальных значений координат фазового состояния выходного сигнала. В блоке выбора модели объекта решаются ДУ каждой модели-кандидата и рассчитываются критерии (28). «Наилучшей» моделью объекта выбирается та, для которой $J^* = \min$ или $J^* \leq J_{\text{доп}}$, где $J_{\text{доп}}$ - априорно допустимое значение критерия соответствия объект-модель. В работе предусмотрена возможность визуальной оценки качества модели объекта. Для модели-претендента рассчитывается вектор Y_{T-} предоконечных значений координат фазового состояния ее выходного сигнала с целью управления объектом при $t > T$. Укрупненная схема алгоритма процедуры идентификации объекта на основе вейвлет-подобных ПГ сигналов вход-выход приведена на рис.1.

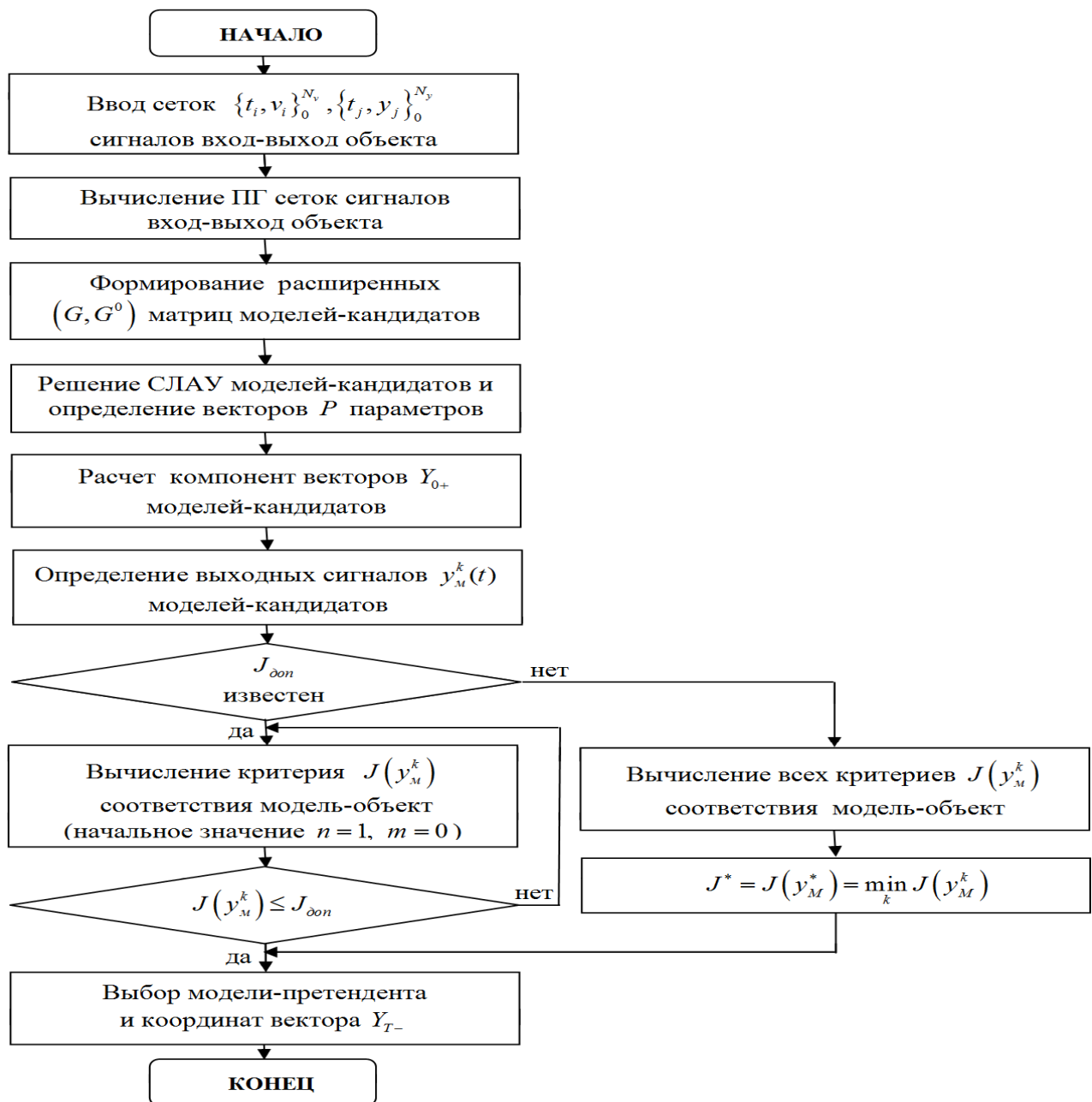


Рис.1. Укрупненная схема алгоритма процедуры идентификации объекта на основе вейвлет-подобных ПГ сигналов вход-выход

В работе приведены результаты моделирования процедуры идентификации объектов с 5-го по 10-й порядок включительно с использованием разработанного программного продукта. Для всех объектов были сформированы банки моделей-кандидатов.

На рис.2 приведен пример идентификации объекта 10-го порядка по импульсной переходной характеристике (ИПХ) длительностью $T = 20$ с.

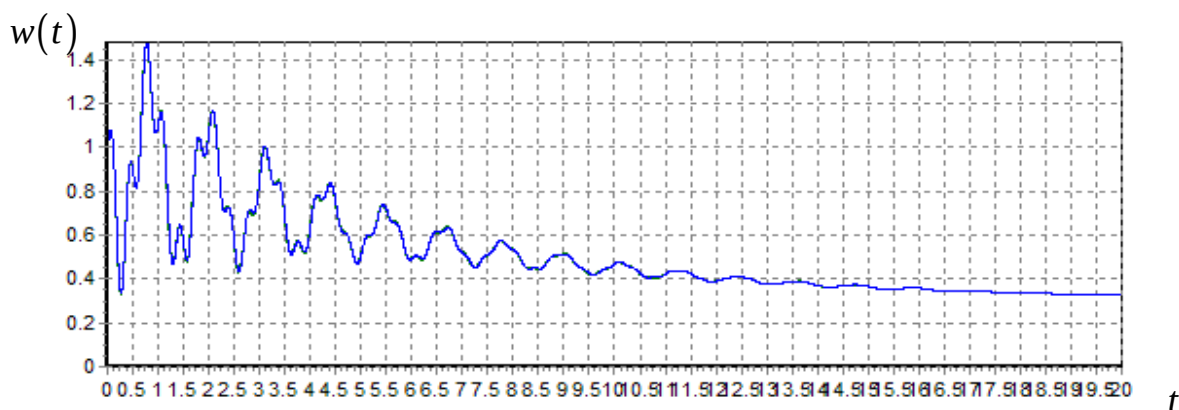


Рис.2. ИПХ объекта и модели-претендента

В результате моделирования разработанных алгоритмов идентификации было получено ДУ модели-претендента тоже 10-го порядка, ИПХ которой показана на рис.2. Как видим, ИПХ объекта и ИПХ модели-претендента практически совпадают. Критерий соответствия объект-модель принимает значение $J^* = 6,72 \cdot 10^{-3}\%$. На рис.3 приведены логарифмические частотные характеристики объекта и модели-претендента: они совпадают на всем рассматриваемом диапазоне частот.

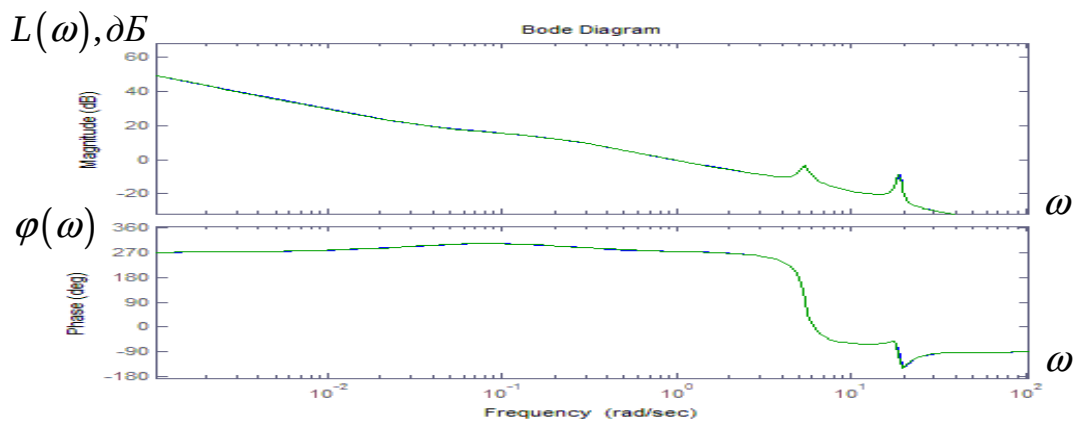


Рис. 3. ЛАЧХ и ЛФЧХ объекта и модели-претендента

Для оценки пригодности модели-претендента использована процедура перекрестного подтверждения. Для данного объекта критерий рассогласования выходных реакций объекта и модели-претендента на входной сигнал $v(t) = 1(t)$, $t \in (0, T)$, имеет значение $J = 2,37 \cdot 10^{-7}\%$.

Таким образом, в отсутствие шумов разработанные алгоритмы позволяют достаточно точно определять модели линейных объектов в виде обыкновенных ДУ. Искажение выходной реализации объекта шумом приводит к необходимо-

сти обеспечения компромисса между сглаживающими свойствами ПГ и их нечувствительностью к быстро затухающим составляющим выхода. Данное свойство может привести к аппроксимации объектов моделями пониженного порядка, что отмечено в работе.

Для иллюстрации зависимости критерия соответствия объект-модель от параметра s ПГ в работе была приведена процедура идентификации объекта управления 7-го порядка при различных значениях дисперсии шумовой компоненты, искажающей его выходную реализацию.

Результаты исследований разработанного программного продукта позволили сделать следующие рекомендации.

1. ПГ реализации вход-выход объекта, заданной в виде сетки, удобнее вычислять по формулам трапеций, обеспечивающим компромисс между методическими погрешностями и чувствительностью к шумовым компонентам.

2. Значения параметра «сдвига» r ПГ должны лежать в первой половине интервала $[0, T]$ задания реализации вход-выход объекта.

3. Значения «масштаба» s ПГ целесообразно выбирать из диапазона $[0,5, \dots, 4]$. При этих значениях s критерий J соответствия объект-модель остается практически постоянным, как это показано на рис.4. При $s < 0,1$ порядок ДУ определяемой модели меньше порядка ДУ объекта за счет нечувствительности ПГ к медленно затухающим составляющим переходного процесса. При $s > 4$ вновь наблюдается понижение порядка ДУ модели за счет нечувствительности ПГ к быстро затухающим составляющим переходного процесса в объекте.

4. Значения критерия J соответствия объект-модель не зависят от параметра «масштаба» s ПГ, а зависят от величины дисперсии аддитивного шума, искажающего выходную реакцию объекта (рис. 4).

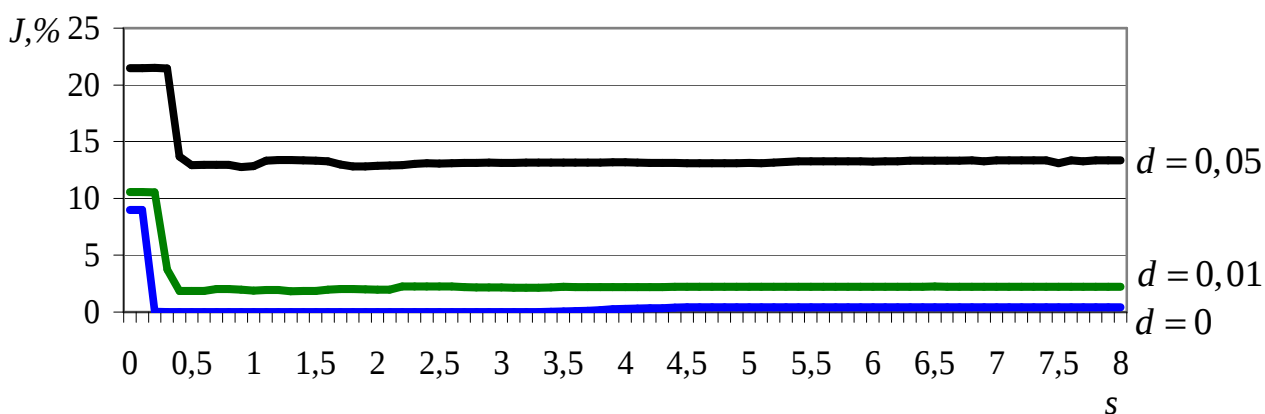


Рис. 4. График зависимости критерия соответствия J объект-модель от параметра «масштаба» s ПГ

5. Моделирование процедур решения СЛАУ подтверждает, что метод наименьших квадратов дает смещенные решения, метод исключений Гаусса мало приспособлен к выявлению линейной зависимости столбцов матриц формируе-

мых СЛАУ. Наиболее надежным является SVD метод.

6. Если объект возбуждается сигналом произвольной формы, то для формирования банка выходов моделей-кандидатов требуется определение вектора V_{0+} для вычисления последовательности $Y_{0+}^{(i)}$, $i = \overline{1, 55}$, векторов, необходимых для решений ДУ. Для моделей старших порядков это становится трудно решаемой проблемой. В связи с этим предпочтение отдано типовым входным сигналам: $\delta(t)$, $1(t)$, e^{-t} , $a \sin \omega t$ и нулевым $Y_{0-} = 0$ предначальным условиям.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

В приложениях приведены алгоритмы идентификации линейного стационарного объекта при входном сигнале типа δ – функция, $1(t)$, $a \sin \omega t$; варианты банков моделей-кандидатов для идентифицируемых объектов, а также листинг разработанного программного продукта.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработаны алгоритмы обобщенной идентификации линейного стационарного объекта или канала многомерного объекта моделью в виде линейного ДУ по коротким реализациям вход-выход длительностью единицы, десятки секунд.

2. В качестве интегральных преобразований, алгебраизирующих линейное ДУ объекта, выбраны ПГ, являющиеся обобщением группы вейвлетов-гауссидов.

3. Исследованы основные свойства ПГ, показана их связь с коэффициентами Фурье разложения сигналов по полиномам Эрмита. Получены оригинальные выражения, позволяющие оценить векторы постначальных и предоконечных значений координат фазового состояния финитных сигналов.

4. Предложена коррекция линейного ДУ балансирующими членами, учитывающими финитность реализаций вход-выход объекта.

5. Разработана программная реализация предложенных алгоритмов идентификации объектов с неизвестной структурой обобщенными моделями, параметры которых определяются на основе ПГ реализаций вход-выход объектов. Показана практическая целесообразность ограничения порядка ДУ $n \leq 10$. При этом процедура идентификации включает формирование и решение 55 СЛАУ, каждое из которых определяет параметры одной модели-кандидата. Порядок старшей СЛАУ в этом случае может быть равен 30.

6. На основе результатов моделирования процедуры идентификации установлено, что представленные алгоритмы соответствуют требованиям к качеству моделей объектов и не критичны к устойчивости объектов. Разработанный на их основе программный продукт может быть модифицирован для идентификации объектов более высокого порядка.

7. Отмечен неизбежный субъективизм выбора модели-претендента из банка моделей-кандидатов.

8. При незначительных модификациях разработанные алгоритмы позволят

идентифицировать объекты с запаздыванием, некоторые классы нестационарных и нелинейных объектов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Уваев А.И., Минко А.А. Исследование преобразований Гаусса гармонических сигналов // Проблемы математического моделирования и обработки информации в научных исследованиях: сборник научных трудов. - Рязань, 1999. - С.83-88.

2. Уваев А.И., Минко А.А. Оценка вектора фазового состояния финитного сигнала на основе преобразований Гаусса // Труды 2-й международной конференции и выставки «Цифровая обработка сигналов и ее применение». - М., 1999. - С. 567-572.

3. Уваев А.И., Минко А.А. Идентификация структуры и параметров модели Гаммерштейна по временной характеристике вход-выход объекта // Тезисы докладов 36-й научно-технической конференции и 47-й студенческой научно-технической конференции. - Рязань, 2000. - С. 35-36.

4. Уваев А.И., Минко А.А. Определение гистерона по реакциям безынерционного преобразователя на линейно меняющиеся сигналы // Труды международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO 2000. - М., 2000. - С. 1912-1917.

5. Минко А.А. Определение творческого потенциала студента // Профессионально-педагогическая и специальная подготовка студентов как социокультурная деятельность: тезисы докладов межвузовской научно-методической конференции «VII Рязанские педагогические чтения». - Рязань, 2000. - С. 89-90.

6. Минко А.А. Идентификация безынерционного преобразователя по реакциям на линейно меняющийся сигнал // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании: сборник трудов 6-й всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов: тезисы докладов. - Рязань, 2001. - С. 138-140.

7. Уваев А.И., Минко А.А. Особенности обобщенной параметрической идентификации объектов управления на основе модели вход-выход // Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании: материалы XII всероссийской научно-технической конференции студентов. - Рязань, 2007. - С. 210-213.

8. Минко А.А. Идентификация линейного объекта по реакции на гармонический сигнал // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. № 1 (выпуск 23). - Рязань, 2008. - С. 63-68.

9. Минко А.А., Витязев В.В. Оценка вектора преднаачального фазового состояния финитного сигнала на основе преобразований Гаусса // Сети, системы связи и телекоммуникации. Деятельность вуза при переходе на Федеральный государственный стандарт 3-го поколения: материалы 33-й всероссийской научно-технической конференции. В 2 ч. Ч. 1/ РВВКУС. - Рязань, 2008. - С. 299-302.

10. Минко А.А., Витязев В.В. Обобщенная идентификация линейного объекта по сигналам вход-выход // Цифровая обработка сигналов. №4. - М., 2008. - С.34-40.

Минко Анна Александровна

**АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ
НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПОДОБНЫХ
ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ГАУССА**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 31.03.2009. Формат бумаги 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ №1619

ООО НПЦ «Информационные технологии»
390035, г. Рязань, ул. Островского 21/1.