

На правах рукописи

Рудницкий Владислав Александрович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО И
ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИДЕНТИФИКАТОРА НА ОСНОВЕ
ВЕЩЕСТВЕННОГО ИНТЕРПОЛЯЦИОННОГО МЕТОДА

Специальность: 05.13.01 - «Системный анализ, управление и
обработка информации»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск - 2002 г.

Работа выполнена в Томском политехническом университете.

Научный руководитель: доктор технических наук,
доцент Гончаров В.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор, Карташов В.Я.

кандидат технических наук,
Хорьков К.А.

Ведущая организация: НИИ автоматики и электромеханики
при ТУСУР

Защита диссертации состоится "25" декабря 2002 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.06 Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Советская, 84.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета (634004, г. Томск, ул. Белинского, 55).

Автореферат разослан "23" ноября 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета Д 212.269.06
к.т.н., доцент

М.А. Сонькин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Задача идентификации сложных производственных объектов является одной из основных, возникающих при построении адаптивных систем автоматического управления (САУ). В последнее время процедура идентификации, базирующаяся на анализе экспериментальных динамических характеристик систем, оказалась эффективным средством решения задач оперативной диагностики САУ. При этом обеспечивается возможность выявления тенденций изменения характеристик САУ, в частности, тенденций приближения системы к предельно допустимым значениям параметров. На этой же основе развиваются технологии инструментальной настройки систем на текущие модели объектов управления. Такой подход применим как на стадии ввода системы в эксплуатацию, так и в период регламентных работ для компенсации изменений параметров объекта управления.

Решение указанных задач требует создания компактных аппаратно-программных средств. Это могут быть встраиваемые в САУ устройства либо портативные идентификаторы.

В любом случае такие устройства должны отвечать ведущему требованию – они должны иметь низкие вычислительные затраты. Задача усложняется тем, что при ее решении, как правило, приходится оперировать единичной выборкой ограниченного объема.

В этих условиях обычно используют частотные методы, которые, во-первых, обладают существенными возможностями для достижения поставленной цели и, во-вторых, имеют резервы для снижения объема вычислений. Последнее обстоятельство связано с тем, что частотные модели на определенном этапе представляют собой функции мнимого аргумента $j\omega$. Переход к удобным для преобразований и дальнейшего использования математическим описаниям в виде функций аргумента ω встречает трудности, которые могут оказаться существенными и даже непреодолимыми. Последнее, например, может возникнуть при идентификации объектов с распределенными параметрами, передаточные функции которых содержат иррациональные и/или трансцендентные выражения. Еще один резерв снижения числа операций связан с необходимостью выполнения действий в случае неминимально фазовых систем над парой частотных характеристик, например, амплитудной и фазовой, вещественной и мнимой. Устранение такой необходимости может привести к двукратному уменьшению объема вычислений.

В этой связи поиск путей идентификации, не связанных с переходом от функций мнимого аргумента к функциям аргумента ω , является достаточно важным, обеспечивая снижение числа операций, упрощение алгоритмов и программ, повышение их надежности.

Актуальность задачи определена также второй важной ее составляющей – обобщением на системы с распределенными параметрами. Учет таких параметров является необходимой и часто единственной возможностью повышения качества и точности работы САУ. Поэтому поиск путей получения моделей объектов в форме передаточных функций (ПФ), содержащих не только дробно-

рациональные, но и трансцендентные и иррациональные составляющие, представляет собой важную в настоящее время научную и практическую задачу.

Все это характеризует тему как актуальную, направленную на решение современных и перспективных проблем.

Цель и задачи работы заключается в разработке, исследовании и реализации алгоритмических и программных средств, предназначенных для создания портативных приборов и встроенных в системы управления устройств идентификации линеаризуемых стационарных объектов.

Для достижения указанной цели должны быть решены следующие задачи:

- разработка алгоритма получения математической модели объекта управления в виде численной характеристики и вещественной передаточной функции на основе экспериментально полученной переходной характеристики ОУ;

- исследование влияния на точность получаемых моделей аддитивных помех и разработка мер, направленных на уменьшение этого влияния;

- распространение разработанного алгоритма идентификации на объекты с распределенными в пространстве параметрами и импульсные объекты исследования;

- экспериментальное исследование алгоритма идентификации ОУ в составе аппаратно-программного идентификатора.

Методы исследования. Для достижения сформулированной цели и связанных с нею задач в работе использованы методы операционного и интегрального исчисления, теории автоматического управления, линейной алгебры, вещественный интерполяционный метод, а также методы численного и компьютерного моделирования.

Научная новизна Автор видит новизну работы в развитии вещественного интерполяционного метода (ВИМ) в задачах идентификации, а также в практическом использовании метода в качестве алгоритмической основы построения портативного идентификатора и технических средств идентификации, встраиваемых в системы управления. При этом получены следующие новые научные результаты:

- разработан алгоритм формирования численных характеристик и вещественных передаточных функций объекта управления по его экспериментальной переходной характеристике;

- предложен способ снижения вычислительных затрат при решении задачи ВИМ-идентификации за счет использования переменного шага интегрирования;

- исследовано влияние помех на точность ВИМ-идентификации. Найдены их предельно допустимые уровни;

- получено обобщение основных результатов на системы с распределенными параметрами и импульсные системы;

- проведена экспериментальная проверка работоспособности разработанных алгоритмического и программного обеспечения, реализованных в среде аппаратного комплекса **MCU4**.

Практическая ценность работы состоит в существенном упрощении алгоритма идентификации ОУ, получении возможности построения на его основе экономичного в вычислительном отношении идентификатора, а также технических средств идентификации объектов, встраиваемых в системы управления.

Алгоритм, положенный в основу программного обеспечения средств идентификации, является приемлемым для обработки информации, как в условиях действия помех, так и при их отсутствии.

Разработанные алгоритмы и программы применимы для идентификации цифровых систем, а также для решения задач идентификации объектов с распределенными параметрами. В последнем случае модели могут быть найдены в специфической для таких объектов форме, содержащей иррациональные и трансцендентные составляющие.

Реализация результатов работы. Основные результаты теоретических исследований переданы в организацию НИИ АЭМ г. Томск для использования в системах бесперебойного питания средств связи, а также используются в учебном процессе на кафедре Интегрированные компьютерные системы управления АВТФ ТПУ.

Практическое использование результатов диссертационной работы подтверждено соответствующими актами.

В работе автор защищает следующие положения:

- алгоритм получения математической модели объекта управления в форме численных характеристик и вещественных передаточных функций по его экспериментальной переходной характеристике;
- способ уменьшения вычислительных затрат при осуществлении ВИМ-идентификации на основе использования переменного шага интегрирования;
- распространение разработанных алгоритмов идентификации на классы непрерывных объектов с сосредоточенными и распределенными в пространстве параметрами, а также на импульсные объекты исследования;
- результаты экспериментального исследования работоспособности идентификатора, реализующего разработанное алгоритмическое и программное обеспечение в среде адаптированного к задаче идентификации комплекта автоматизации MCU4.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены и представлены на конференциях и семинарах всероссийского и международного уровней:

1. III Сибирский конгресс по прикладной и индустриальной математике, Новосибирск, 1998.
2. II Всероссийская научно-техническая конференция «Компьютерные технологии в науке, проектировании и производстве», Нижний Новгород, 2000.
3. The 4th Korean-Russian International Symposium on Science and Technology Ulsan, Korea, 2000.
4. III Wrocławskie Sympozium „Automatyzacja produkcji. Wiedza. Technika. Postęp”. Wrocław, Poland, 2000.

5. VII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, 2001.
6. XIV International Conference on Systems Science, Wroclaw, Poland, 2001
7. III Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, проектировании и производстве», Нижний Новгород, 2001.
8. VIII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, 2002.
9. III Научно-практическая конференция «Современные средства и системы автоматизации», Томск, 2002.

Публикации результатов работы. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, списка литературы из 158 наименований и 9 приложений. Общий объем работы составляет 225 страниц, из них 34 страницы приложений, 15 страниц - список литературы. Основная часть диссертации иллюстрируется 39 рисунками и 24 таблицами.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проблемы, ставятся цель и задачи диссертационной работы, приводятся краткие комментарии к содержанию диссертации, сведения об апробации, публикациях и практическом использовании результатов проведенных научных исследований.

В первой главе дан краткий обзор современного состояния проблемы идентификации сложных производственных САУ, методов и алгоритмов решения задач идентификации для класса стационарных линеаризуемых непрерывных объектов.

Создание технических средств, предназначенных для получения математических моделей объектов, связано с выбором наиболее подходящих методов и алгоритмов решения задач идентификации объектов рассматриваемого класса. При этом полагают, что наиболее целесообразный путь решения задачи состоит в сочетании теоретического и экспериментального подходов, когда структура объекта принимается на основе теоретических знаний, а численные значения ее параметров определяются экспериментально. В этих случаях полагают структуру модели известной, а задачу идентификации рассматривают в параметрической постановке.

Дальнейшее уточнение задачи и исходных данных во многих практических случаях возможно за счет отказа от определения либо уточнения статистических характеристик ошибок измерения, заменяя эту процедуру уточнением самих ошибок¹. Такой подход к задаче идентификации позволяет устранить трудности принятия какого-либо определенного распределения вероятностей

¹ Шамриков Б.М. Параметрическая идентификация динамических объектов по выборкам ограниченного объема // Изв. АН. Теория и системы управления. – 1997. -№2. –С. 81-89.

ошибок измерения. Кроме того, эта постановка соответствует условиям, когда приходится иметь дело с единственной выборкой ограниченного объема. В указанных ситуациях становится возможным рассматривать детерминированные сигналы, обеспечивая снижение объема вычислений, памяти и других параметров, обычно определяемых термином «вычислительные затраты».

Для решения задачи при таких условиях обычно используют временные и частотные методы. В первом случае оперируют какими-либо временными динамическими характеристиками, во втором - частотными. Методы временной группы алгоритмически просты и в большинстве своем легко реализуются. Наиболее заметным вариантом из этой группы является аппроксимационный подход на базе полиномов Лагерра. Однако он, как и другие способы и варианты временной группы, обладает типичными недостатками: малой точностью, большим объемом вычислений, низкой помехозащищенностью. Эти особенности не позволяют однозначно ориентироваться на какой-либо конкретный метод временной области для целей построения портативного идентификатора или достаточно простых и надежных устройств, встроенных в систему управления.

Частотный метод получил более широкое распространение. Он применяется не только при решении задач идентификации в режиме on-line, но также служит эффективным инструментом при настройке различных промышленных САУ. Определенные его преимущества связаны с тем, что формирование математической модели объекта осуществляется в области изображений, где соответствующие операции выполняются значительно проще по сравнению с областью времени. В то же время можно заметить, что частотный подход имеет возможности для дополнительного снижения вычислительных затрат. Поясним это утверждение.

Математические модели объектов в частотной области представляют собой функции, имеющие аргументом мнимую переменную $j\omega$. Последующие вычислительные процедуры требуют перехода к функциям вещественного аргумента ω . Переход от функций мнимого аргумента к функциям аргумента ω довольно затруднителен, обычно требует больших вычислительных затрат при численной реализации, а в ряде случаев, например, при рассмотрении объектов с распределенными параметрами, этот переход может оказаться непреодолимым¹. Следовательно, речь может идти о таких формах математических моделей, которые бы удовлетворяли двум условиям. Во-первых, они должны относиться к области изображений, обеспечивая малый объем вычислений по сравнению с методами временной области. Во-вторых, они должны быть свободны от трудоемких операций перехода от функций мнимого аргумента к вещественным функциям.

В этой связи обращает на себя внимание вещественный интерполяционный метод (ВИМ), который оперирует вещественными функциями в области изображений². Предварительный анализ показал возможность и целесообраз-

¹ Синтез активных RC- цепей / под ред. А.А.Ланнэ.- М.: Связь, 1975.- 296 с.

² Гончаров В.И. Вещественный интерполяционный метод синтеза систем автоматического управления.- Томск: ТПУ, 1995. -107с.

ность использования ВИМ для решения задач идентификации. Суть подхода состоит в использовании интерполяционных условий, связывающих модель и реальную систему. Поэтому метод можно рассматривать как развитие частотных и корневых методов, основанных на приближении характеристик рассматриваемой системы к желаемым характеристикам на основе их совпадения при каких-то значениях аргументов¹.

Метод базируется на вещественном интегральном преобразовании

$$F(\delta) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-\delta t} dt, \quad \delta \in [C, \infty[, C \geq 0, \quad (1)$$

которое ставит в соответствие оригиналу $f(t)$ изображение $F(\delta)$ в виде вещественной функции вещественного аргумента δ .

Формула прямого δ -преобразования (1) может быть интерпретирована как частный случай прямого преобразования Лапласа при замене комплексной переменной s на вещественную δ . Последнее является принципиально важным в практических задачах, поскольку позволяет осуществлять взаимно однозначные переходы $F(s) \rightarrow F(\delta)$, $F(\delta) \rightarrow F(s)$. При выполнении достаточно простых условий переход можно осуществить простой заменой переменных s и δ . Следует обратить внимание и на другие существенные для практики особенности δ -преобразования. С позиций решения задач идентификации полезным и важным является перекрестное свойство δ -преобразования. Оно заключается в том, что поведение функции $F(\delta)$ при больших значениях аргумента δ определяется в основном поведением оригинала $f(t)$ при малых значениях переменной t . Справедливо и обратное. Важность указанных взаимосвязей состоит в том, что при поиске приближенных решений имеется возможность перераспределять погрешность в области времени путем соответствующих изменений в области изображений.

Применение вещественных функций для расчета средствами вычислительной техники требует перехода от непрерывных функций-изображений $F(\delta)$ к их дискретным аналогам. Для этих целей в ВИМ используются численные характеристики (ЧХ) $\{F(\delta_i)\}_\eta$. Их получают как совокупности значений функции $F(\delta)$ в узлах δ_i , $i=1, 2, \dots, \eta$: $\{F(\delta_i)\}_\eta = \{F(\delta_1), \dots, F(\delta_\eta)\}$, где η - размерность ЧХ. Элементы ЧХ $F(\delta_i)$ могут быть найдены по известной функции времени $f(t)$ по выражению (1) или по вещественной функции $F(\delta)$, если она известна.

Понятие вещественных функций-изображений $F(\delta)$ распространяется на сигналы линейных динамических систем и описывающих их уравнений. Если $x(t)$ и $y(t)$ соответственно входной и выходной сигналы объекта или системы управления, имеющие изображения $X(\delta)$ и $Y(\delta)$, то в соответствии с определением передаточных функций (ПФ) можно получить форму

¹ Скворцов Л.М. Интерполяционный метод назначения доминирующих полюсов при синтезе многомерных регуляторов // Изв. РАН. Теория и системы управления. - 1997.- №1. - С. 31-34.

$$W(\delta) = \frac{Y(\delta)}{X(\delta)} = \frac{b_m \delta^m + b_{m-1} \delta^{m-1} + \dots + b_1 \delta + b_0}{a_n \delta^n + a_{n-1} \delta^{n-1} + \dots + a_1 \delta + 1}, \quad n \geq m, \quad (2)$$

которая может рассматриваться как модель системы и использоваться для получения ЧХ $\{W(\delta_i)\}_\eta$, настройки и самонастройки регуляторов, диагностики и т.д.

Сказанное является весомым аргументом при выборе ВИМ как математического аппарата для разработки алгоритмического и программного обеспечения портативного устройства идентификации и подобных устройств, встраиваемых в САУ для указанных целей.

Вторая глава посвящена рассмотрению ряда специфических вопросов, связанных с разработкой алгоритма ВИМ-идентификации для систем с сосредоточенными параметрами.

Пусть дан линейный непрерывный объект, относящийся к классу одномерных, стационарных, детерминированных. Входной и выходной сигналы $x(t)$, $y(t)$ отвечают условиям существования вещественных изображений $X(\delta) \doteq x(t)$ и $Y(\delta) \doteq y(t)$. Это позволяет найти вещественную передаточную функцию вида (2). Тогда задача параметрической идентификации будет заключаться в следующем: задана форма (2) с известными параметрами m и n , известны сигналы $x(t)$ и $y(t)$ либо их выборки в тактовые моменты времени γT_0 , $\gamma=0, 1, 2, \dots$. Требуется определить значения коэффициентов a_k , $k=1, 2, \dots, n$, b_j , $j=0, 1, \dots, m$, обеспечивающие достаточную в смысле какого-либо принятого критерия близость характеристик объекта и модели.

Схема решения задачи может быть представлена несколькими основными этапами: получение по $x(t)$, $y(t)$ или их выборкам характеристики $\{X(\delta_i)\}_\eta$, $\{Y(\delta_i)\}_\eta$, определение модели объекта в виде ЧХ $\{W(\delta_i)\}_\eta$ и вещественной передаточной функции $W(\delta)$, проверка полученного результата и его коррекция. Конкретизируем содержание схемы. С этой целью в качестве основной динамической характеристики объектов исследования примем переходную характеристику $h(t)$. Тогда можно записать

$$W(\delta) = \frac{Y(\delta)}{X(\delta)} = \frac{h(\delta)}{1/\delta},$$

где $h(\delta) = Y(\delta) \doteq y(t)$, $X(\delta) = 1/\delta \doteq 1(t)$. С учетом (1) получим

$$W(\delta) = \delta \int_0^{\infty} h(t) e^{-\delta t} dt, \quad \delta \in [c, \infty], c > 0 \quad (3)$$

На основе полученного выражения (3) найдутся элементы

$$W(\delta_i) = \delta_i \int_0^{\infty} h(t) e^{-\delta_i t} dt, \quad i=1, 2, \dots \quad (4)$$

ЧХ $\{W(\delta_i)\}_\eta$.

Существенную роль в формуле (4) играют узлы интерполирования δ_i . Они определяют точность решения задачи, распределение погрешностей по интервалу времени $[0, \infty]$ и могут быть использованы как инструмент настрой-

ки на интересующее решение. Имеются рекомендации по использованию двух типов распределения узлов: равномерный закон распределения и распределение по узлам ортогональных полиномов, в частности по узлам экспоненциальных полиномов Чебышева I-го рода. Первый из них определяет наиболее простой в вычислительном плане вариант, в общем случае вполне достаточный для удовлетворения основных требований решения большинства задач получения ЧХ. Второй тип распределения позволяет добиться повышения точности решения приближенных задач. В случае равномерного закона узлы интерполирования заданы соотношением

$$\delta_i = i \cdot \delta_1, \quad i = \overline{2, \eta}, \quad \eta = m + n + 1,$$

где $\delta_1 = \frac{\Delta}{t_p}$, Δ - параметр, определяющий точность решения задачи (для при-

нятых в работе условий принято $\Delta = 10.35$), t_p - длительность переходного процесса.

Для получения расчетной формулы численного интегрирования рассмотрены основные методы. В качестве рабочего принят метод средних прямоугольников обеспечивающий наиболее подходящее соотношение «точность решения - минимум вычислительных затрат». Расчетная формула имеет вид вида

$$W(\delta_i) \approx \delta_i \sum_{j=0}^N h(t_j) e^{-\delta_i t_j} \Delta t, \quad i = \overline{1, \eta}, \quad \eta = m + n + 1, \quad (5)$$

где $\Delta t = T/N$, $T = k \cdot t_p$ - время наблюдения переходного процесса, k - некоторый коэффициент пропорциональности, обуславливающий связь времени наблюдения с длительностью переходного процесса ОУ, N - число используемых измерений переходной характеристики ОУ $h(t)$.

Следующий этап решения задачи идентификации состоит в получении коэффициентов передаточной функции (2) по найденной ЧХ $\{W(\delta_i)\}_\eta$. Для его выполнения составим систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) вида

$$W(\delta_i) = \frac{b_m \delta_i^m + b_{m-1} \delta_i^{m-1} + \dots + b_0}{a_n \delta_i^n + a_{n-1} \delta_i^{n-1} + \dots + 1} \quad (6)$$

В левой части СЛАУ - найденные согласно (5) элементы ЧХ. Неизвестными остаются лишь коэффициенты ПФ объекта идентификации a_k , $k = \overline{1, \dots, n}$ и b_j , $j = \overline{0, \dots, m}$. При выполнении несложных условий, решение СЛАУ (6) существует и оно единственно.

Для практических целей систему (6) целесообразно представить и решать в матричной форме.

Решение СЛАУ находится известными методами. Полученные в результате значения a_k , b_j , $k = \overline{1, \dots, n}$, $j = \overline{0, \dots, m}$ являются коэффициентами вещественной передаточной функции (2), что означает получение модели объекта в виде аналитического выражения. На этом этапе целесообразен переход от вещественной ПФ $W(\delta)$ к лапласовой функции $W(s)$. Он осуществляется

путем формальной замены δ на s . После выполнения такой замены задачу параметрической идентификации объекта в первом приближении можно считать законченной.

В работе показана возможность обобщения алгоритма идентификации на класс неустойчивых объектов. Она сводится к назначению узлов интерполирования правее всех корней характеристического полинома. Если «правые» корни неизвестны, то суждение о них можно составить по переходной характеристике.

Полное завершение задачи связано с оцениванием полученного результата и настройкой решения, если это необходимо, на принятый критерий близости модели и объекта. В качестве критерия используется

$$\Delta h_{\max} = \max_t |\Delta h(t)| \rightarrow \min, \quad (7)$$

где $\Delta h(t) = \frac{h_0(t) - h_m(t)}{h_0(t)} \cdot 100\%$, $h_0(t)$ - переходная характеристика объекта,

$h_m(t)$ - переходная характеристика его модели.

Определены основные источники методических и вычислительных погрешностей при решении задачи ВИМ-идентификации. Рассмотрены способы уменьшения их влияния, заключающиеся в соответствующем выборе узлов интерполирования δ_i и времени наблюдения переходного процесса в системе T .

Предложены и подтверждены в ходе численных экспериментов некоторые практические рекомендации по выбору значения времени наблюдения T и числа используемых отсчетов $N=120 \div 150$ переходной характеристики ОУ.

В третьей главе рассматривается возможность дополнительного снижения вычислительных затрат за счет введения переменного шага интегрирования в процедуре нахождения численных характеристик сигналов при осуществлении идентификации. Проведено исследование помехоустойчивости алгоритма идентификации непрерывных объектов, проверена возможность повышения точности идентификации за счет применения метода наименьших квадратов (МНК).

Структурно-дифференциальные особенности переходных характеристик дают возможность использовать переменный шаг квантования Δt , что приводит к повышению быстродействия алгоритма. Наибольшее значение это имеет в случае выбора времени наблюдения T переходного процесса в при $k \geq 1$. Кроме того, несмотря на относительно малые приращения значений элементов численных характеристик в (4) на интервале $[t_p, \infty]$, они представляют собой основную составляющую погрешности вычисления ЧХ. По этой причине время наблюдения переходного процесса T увеличивается более величины t_p . При этом число шагов интегрирования N целесообразно оставить без изменения, увеличивая лишь величину шага Δt по мере приближения к T .

Рассмотрены возможные варианты варьирования шага, принят наиболее подходящий к условиям данной задачи алгоритм.

Использование переменного шага Δt , учитывающее особенности переходных характеристик, приводит к более простой процедуре по сравнению с

известным вариантом¹. Так для подынтегральной функции $h(t)e^{-\delta_i t}$ в выражении (4) приближенное значение интеграла (4) может быть найдено в виде суммы приращений ΔS_j

$$W(\delta_i) \approx \sum_{j=1}^N \Delta S_j.$$

Существует такое значение ΔS_0 , начиная с которого величина приращений уже не оказывает существенного для данных условий влияния на общую величину рассматриваемого элемента ЧХ (4). Это позволяет свести задачу определения Δt_j к нахождению значения ΔS_0 . Тогда при определении условий автоматического увеличения шага интегрирования можно отказаться от использования неоднозначной оценки меры погрешности интегрирования на каждом шаге и перейти к критерию

$$\Delta S_i < \varepsilon, \quad i = \overline{1, \eta}, \quad \varepsilon = \Delta S_0.$$

На практике в подавляющем большинстве случаев выходные сигналы зависят также от ненаблюдаемых и неуправляемых воздействий – помех. Их влияние в ряде случаев может оказаться существенным. Все помехи, воздействующие на объект целесообразно привести к его выходу и представлять одним сигналом. Исследования осуществлялись в условиях реально зашумленного выходного сигнала. Как показали результаты численных экспериментов алгоритм обладает высокими свойствами помехозащищенности, сравнимыми с частотными методами. Это является следствием использования процедуры интегрирования, обеспечивающей сглаживание помех. При генерации случайной помехи $\varepsilon(t)$ в пределах $5 \div 10\%$ от величины сигнала $h_{\text{уст}}(t)$ достигаются достаточно малые значения погрешности Δh_{max} – менее 5% .

С целью дальнейшего повышения точности решения задач идентификации в условиях действия помех была рассмотрена возможность формирования и решения переопределенной системы уравнений. Предполагалось, что в этом случае будет достигнуто дополнительное сглаживание помех. Проведение анализа результатов решения задачи показало, что применение МНК при рассмотренном уровне помех не дает принципиального повышения точности по критерию (7) в сравнении с использованием основного алгоритма. Этот результат можно рассматривать как несколько неожиданный, интересный и позитивный с позиций разработки программного обеспечения идентификатора, поскольку приемлемая точность достигается без увеличения объема вычислений и снижения быстродействия. Кроме того, это дает возможность сохранить основной алгоритм идентификации, приемлемый для обработки информации, как в условиях действия помех, так и при их отсутствии.

В четвертой главе представлено обобщение алгоритма ВИМ-идентификации на объекты с распределенными параметрами и цифровые системы. Для случая систем с распределенными параметрами рассмотрен специфический вопрос выбора узлов интерполирования, проведен сравнительный

¹ Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы – М: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. –632 с.

анализ идентификации по ВИМ и метода идентификации на основе частотного подхода. Для цифровых ОУ получен алгоритм идентификации, выявлено влияние некорректности, предложен способ уточнения моделей на основе чисел обусловленности.

Передаточные функции объектов с распределенными параметрами в общем случае содержат иррациональные и трансцендентные составляющие, т. е. они имеют вид

$$\mathbf{W}(s) = \mathbf{F}(e^{-\sqrt{T}s}, 1/\sqrt{T_1s}, 1/\sqrt{T_2s+1}, \sqrt{s}, \operatorname{sh} s, \operatorname{ch} s, \operatorname{sh}\sqrt{T_3s}, \operatorname{ch}\sqrt{T_4s}, \operatorname{sh}\sqrt{as^2+bs+c}, \dots). \quad (8)$$

Трудности определения параметров столь сложных ПФ очевидны. В настоящее время решение ищется в классе дробно-рациональных ПФ, что приводит к значительным погрешностям. В работе рассмотрена задача получения функций вида (8), учитывающих хотя бы основные особенности объектов с распределенными параметрами. Возможность для получения решений задачи прямо связана с описанием объектов в виде функций вещественного аргумента и привлечением интерполяционного метода. Двухэтапная процедура состоит в определении ЧХ объекта $\{\mathbf{W}(\delta_i)\}_n$ по его экспериментальной переходной характеристике $\mathbf{h}(t)$ и последующем решении системы уравнений, сформированной на основе (8):

$$\mathbf{W}(\delta_i) = \mathbf{F}(e^{-\sqrt{T\delta_i}}, 1/\sqrt{T_1\delta_i}, 1/\sqrt{T_2\delta_i+1}, \sqrt{\delta_i}, \operatorname{sh} \delta_i, \operatorname{ch} \delta_i, \operatorname{sh}\sqrt{T_3\delta_i}, \operatorname{ch}\sqrt{T_4\delta_i}, \operatorname{sh}\sqrt{a\delta_i^2+b\delta_i+c}, \dots). \quad (9)$$

При небольшом числе искомых параметров $T, T_1, \dots, a, b, c, \dots$ удается найти решение такой системы. Заметим, что первый этап остается неизменным как для систем с сосредоточенными параметрами, так и распределенными параметрами, что делает унифицированным программное обеспечение.

Имеющиеся особенности решения сводятся к неравномерному расположению узлов интерполирования δ_i . Рекомендации по выбору таких распределений имеются. В частности, приемлемые результаты удается получить при задании узлов в нулях ортогональных полиномов, например, полиномов Чебышева I-го рода.

Алгоритм идентификации на основе ВИМ обобщен на цифровые системы управления (ЦСУ) и их отдельные элементы. Если известен входной сигнал $\mathbf{X}(nT_0)$ и реакция на него объекта исследования $\mathbf{Y}(nT_0)$, то задача сводится к определению коэффициентов ПФ

$$\mathbf{W}(z) = \frac{\mathbf{Y}(z)}{\mathbf{X}(z)} = \frac{\mathbf{b}_m z^m + \mathbf{b}_{m-1} z^{m-1} + \dots + \mathbf{b}_0}{\mathbf{a}_n z^n + \mathbf{a}_{n-1} z^{n-1} + \dots + 1}, \quad n \geq m \quad (10)$$

Математической основой для поиска решения принято дискретное вещественное преобразование, устанавливающее связь между оригиналом $\mathbf{f}(nT_0)$ и изображением $\mathbf{F}(v)$ соотношением

$$\mathbf{F}(v) = \sum_{n=0}^{\infty} \mathbf{f}(nT_0) v^{-n}, \quad v \in [C, \infty[, \quad C \geq 1. \quad (11)$$

Вещественные функции-изображения имеют графическое представление, что делает их наглядными при отображении информации. Привлекательные особенности преобразования (11) в основном сохраняются теми же, что и в случае

непрерывного преобразования (1): получаемые изображения относятся к классу функций с вещественным аргументом; при выполнении несложных условий обеспечивается взаимное однозначное соответствие между z -формой и изображением $F(v)$; для численных действий над функциями $F(v)$ легко привлекаются известные численные методы, в том числе матричное исчисление; могут формироваться массивы чисел, имеющих смысл численных характеристик сигналов и объектов. Имеются другие важные для практики свойства и особенности. Отмеченные параллели позволяют создать и использовать прежнюю схему решения задачи идентификации: на первом этапе по переходной характеристике $h(nT_0)$, определяются элементы ЧХ $\{h(v_i)\}_\eta$ по формуле

$$h(v_i) = \sum_{n=0}^N h(nT_0) \cdot v_i^{-n}, v_i \in]1, \infty[, \quad (12)$$

вытекающей из (11); на втором этапе определяются элементы ЧХ объекта по расчетному соотношению

$$W(v_i) = \frac{v_i - 1}{v_i} \cdot h(v_i), i = \overline{1, \eta}, \eta = m + n + 1;$$

далее находятся коэффициенты вещественной функции $W(v)$, которые являются одновременно коэффициентами ПФ (10). Заключительные этапы по смыслу остаются прежними: нужно оценить близость модели и объекта по их переходным характеристикам и осуществить минимизацию невязки в смысле принятого критерия. Последняя процедура является итерационной. Показано, что инструментальной переменной может выступать величина узла интерполирования v_η .

При решении задач идентификации ЦСУ могут возникать ситуации, когда отсутствует достаточная априорная информация о структурных параметрах передаточной функции объекта. В этих случаях имеются возможности для выбора модели объекта, в наибольшей степени отражающей его свойства. Одновременно это создает определенные вычислительные проблемы, поскольку при повышении значений параметров m и n сверх некоторых предельных значений в полной мере проявляется некорректность задачи. Для нахождения предельных возможностей алгоритма без привлечения специальных мер регуляризации использован аппарат чисел обусловленности. В работе рассмотрены вычислительные аспекты некоторых стандартных чисел обусловленности, выбрано и рекомендовано одно из них. Расчетные примеры подтвердили справедливость сделанных выводов и рекомендаций, направленных на получение моделей максимальной размерности в принятых условиях решения задачи.

Разработанный алгоритм идентификации ЦСУ, несмотря на специфику математических описаний объектов и сигналов, в своей основе совпадает с алгоритмом идентификации непрерывных объектов. Это дает возможность унифицировать программное обеспечение устройств идентификации, обеспечивая на этом уровне уменьшение вычислительных затрат.

В пятой главе обоснован выбор модуля вычислителя **MCU42-3** комплекта автоматики **MCU4** в качестве аппаратной части идентификатора, со-

держатся материалы по экспериментальной проверке работоспособности аппаратно-программного комплекса в целом при решении задач идентификации.

Решение задачи построения идентификатора зависит главным образом от двух составляющих: наличия математического обеспечения, которое позволяет получить достаточно точную модель **ОУ**, и вычислительных средств, реализующих обработку сигналов в соответствии с заданным алгоритмом. Вопросы разработки алгоритмического обеспечения, обеспечивающего приемлемо низкую вычислительную сложность, были рассмотрены в предыдущих главах. В результате оказалось возможным выбрать микропроцессорный комплект автоматики **MCU4**, отличающийся малой стоимостью, функциональной полнотой и адекватностью своих характеристик разработанному алгоритму.

Комплект представляет собой набор функционально законченных модулей. Они унифицированы по размерам, разъемам и сигналам, что позволяет без труда объединять их в единое устройство. Номенклатура изделий включает в себя практически все узлы, необходимые для построения ведущих, ведомых и автономных устройств автоматики, что позволяет широко применять комплект управления **MCU4** для реализации широко круга задач идентификации и управления, определяемых пользователем.

Отличительной особенностью является встроенный интерпретатор языка программирования **Fractal-BASIC**, который позволяет быстро создавать и отлаживать программы, не заботясь об особенностях процессора и схемотехники контроллера. Для создания управляющего узла на базе **MCU42-3** достаточно ознакомиться с перечнем сигналов на разъемах и несколькими специальными операторами **Fractal-BASIC**. Главным аппаратным элементом для построения прибора-идентификатора является модуль вычислителя **MCU42-3**. Алгоритм идентификации на основе вещественного интерполяционного метода может быть легко записан в ОЗУ или ПЗУ вычислителя с помощью операторов языка **Fractal-BASIC**. Подобная процедура не встречает каких-либо принципиальных затруднений и ничем не отличается от стандартного описания алгоритма ВИМ-идентификации на любом языке программирования высокого уровня.

Важно, что имеется возможность значительного уменьшения частоты дискретизации по времени путем сопряжения через шину **I²C** модуля вычислителя **MCU42-3** с модулем ввода / вывода **IO1-3** со специальной прошивкой памяти контроллеров и соответствующими ассемблерными вставками в тело программы **Fractal-BASIC**. Это дает возможность распространить алгоритм идентификации на объекты, длительность переходных процессов которых менее 1 мс. Такой путь, по всей видимости, является наиболее перспективным при расширении области применения идентификатора на класс систем с существенно меньшей длительностью переходных процессов **t_p**.

Для тестирования и отладки идентификатора на основе ВИМ и **MCU4-3** использовался аналоговый вычислительный комплекс **ABK-6**. С его помощью был смоделирован достаточно простой объект, обеспечивающий проверку результатов на каждом этапе идентификации. Модель объекта имеет передаточную функцию

$$W(s) = \frac{k}{a_2 s^2 + a_1 s + 1}, \quad (13)$$

где для упрощения параметр k , как и в практических задачах, принят известным: $k=4.8 \text{ В}$.

Поскольку экранирование выводов АЦП и платы модуля вычислителя не производилась, эксперимент по идентификации модели проходил в условиях действия помех, обусловленных наведенными сигналами. Их величина не определялась, но по ряду косвенных признаков, в частности, путем сопоставления некоторых значений измеряемой величины переходной характеристики со значениями соответствующей характеристики компьютерной модели, можно предположить, что этот уровень не превышал $5 \div 10\%$ от уровня сигнала $h_{\text{уст}}(t)$.

Расчеты проводились при выборе параметра Δ , определяющего расположение узлов интерполирования δ_i равным 10.35 . Значения коэффициентов ПФ модели и относительной ошибки Δh_{max} , полученные при изменении времени наблюдения T переходного процесса в системе, показаны в таблице 1.

Таблица 1. Результаты идентификации модели ПФ вида (13)

$T, \text{ с}$	6	7	8	9	10	12	20
a_2	0.37	0.57	0.89	1.08	1.23	1.91	1.24
a_1	0.84	0.92	0.94	1.08	1.26	1.49	3.20
$\Delta h_{\text{max}}, \%$	75	57	11	7	18	45	50

Данные эксперимента показывают, что наилучшая модель по критерию (7) соответствует $T=9 \text{ с}$. При этом максимальная погрешность Δh_{max} не превышает 7% .

Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанное алгоритмическое и программное обеспечение, а также аппаратная часть идентификатора позволяют в принятых условиях получать положительные результаты. Это является определенным подтверждением правильности полученных теоретических расчетов, выводов и принятых решений.

В качестве тестового примера и прикладной задачи идентификации объектов с распределенными параметрами был рассмотрен химический источник тока (ХИТ) **A512 Sonnenschein**. Для математических моделей процессов, протекающих в батарее, используют два подхода. Первый базируется на методе эквивалентных преобразований и использует дробно-рациональные ПФ

$$W(s) = \frac{b_1 s + k_a}{a_2 s^2 + a_1 s + 1}. \quad (14)$$

Второй подход учитывает распределенность параметров рассматриваемого ОУ, что приводит к более сложным описаниям, когда операторные модели могут содержать иррациональные и трансцендентные выражения вида (8). Такими моделями являются

$$W_1(s) = \frac{k_a}{T_1 \cdot s + 1} \cdot e^{-\alpha\sqrt{s}}, \quad W_2(s) = \frac{k_a}{\sqrt{T_2 \cdot S + 1}}. \quad (15)$$

Полученные по результатам идентификации функции $\Delta h(t)$ (7) при значениях $\Delta \in [6, 8, 10.35, 12, 15]$ для моделей вида (14) представлены на рисунке 1, а зависимость $\Delta h(t)$ для моделей (15) на рисунке 2.

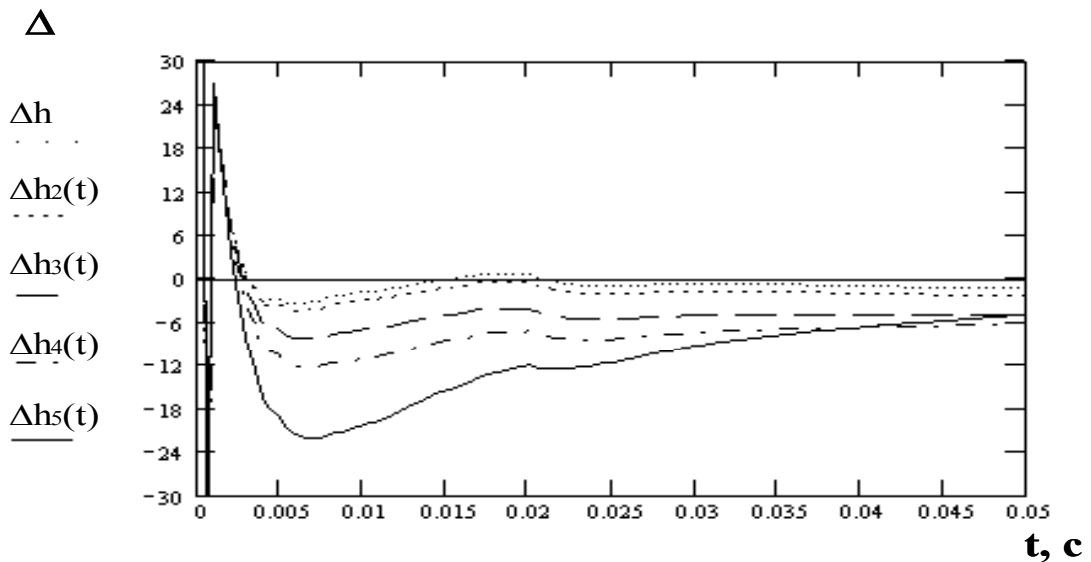


Рисунок 1.- Графики зависимостей относительной ошибки $\Delta h(t)$ для моделей ХИТ (14) при различных значениях параметра Δ

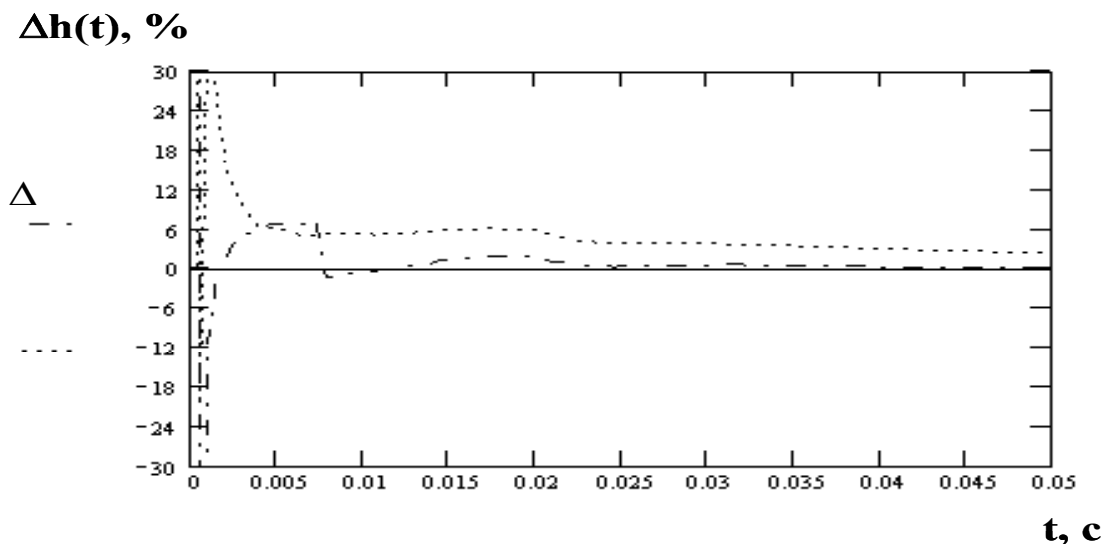


Рисунок 2.- Графики зависимостей относительной ошибки $\Delta h(t)$ для моделей ХИТ вида (15)

При использовании ПФ, учитывающей распределенность параметров ХИТ, была достигнута точность более высокая, чем для дробно-рациональной модели: относительная ошибка $\Delta h(t)$ не превышает 6%, тогда как аналогичный показатель для дробно-рациональной модели достигает 20%. Результат свидетельствует о том, что, несмотря на имеющиеся препятствия возможно получать модели, учитывающие распределенность параметров ХИТ, и они оказываются более точными.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В соответствии с поставленной целью и задачами исследования в диссертационной работе получены следующие научные и практические результаты.

1. В качестве основы алгоритмического и программного обеспечения идентификатора целесообразно принять вещественный интерполяционный метод, позволяющий снизить вычислительные затраты, например, по сравнению с частотным методом - примерно вдвое.

2. Получен алгоритм решения задачи для систем с сосредоточенными параметрами. Предложены способы задания узлов интерполирования, обоснован выбор метода интегрирования при нахождении численных характеристик, определена процедура получения коэффициентов передаточной функции модели объекта по найденным численным характеристикам.

3. Обоснован выбор критерия адекватности модели и объекта на основе оценивания близости их переходных характеристик, применимый к системам с сосредоточенными и распределенными параметрами.

4. Определены основные источники методических и вычислительных погрешностей при решении задачи ВИМ-идентификации, рассмотрены способы уменьшения их влияния.

5. Получены положительные результаты экспериментальной проверки алгоритма идентификации в условиях действия случайных помех.

6. При идентификации объектов как с распределенными, так и с сосредоточенными параметрами сохраняются в основном неизменными алгоритм решения задачи и разработанное программное обеспечение. При этом возможно получать модели объектов и систем в форме передаточных функций с иррациональными и трансцендентными составляющими, которые являются характерными для объектов с распределенными параметрами. Последнее обстоятельство позволяет учесть структурные особенности объектов, повысить точность решаемых задач.

7. Рассмотрено обобщение вещественного преобразования на дискретные системы. Алгоритм идентификации и его программная реализация во многом остаются близки к математическому обеспечению идентификации непрерывных систем и объектов. Показана возможность и целесообразность использования математического аппарата стандартных чисел обусловленности для получения моделей, в наибольшей степени удовлетворяющей условиям конкретной задачи по точности, сложности математического описания и т.д.

8. Проведенные численные и полунатурные эксперименты подтверждают эффективность разработанного алгоритмического и программного обеспечения.

9. Вычислительная экономичность алгоритма в сочетании с аппаратно-программными возможностями комплекта автоматики **МСU4** обеспечивают благоприятные условия для создания портативного идентификатора, а также устройств идентификации, встраиваемых в системы автоматического управления объектами определенного класса.

РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Гончаров В.И., Рудницкий В.А. Экспериментальное получение коэффициентов передаточных функций вещественным интерполяционным методом // Теория и техника автоматического управления. Кибернетический центр при Томском политехническом ун-те. – Томск, 1996. – с. 21 – 28. Деп. в ВИНИТИ 12.03.96, 785-В96.
2. Гончаров В.И., Лиепиньш А.В., Рудницкий В.А. (Томск). Синтез систем управления объектом с распределенными параметрами на основе непараметрического подхода // Третий сибирский конгресс по прикладной и индустриальной математике ИНПРИМ'98, посвященный памяти С.Л. Соболева (1908-1989): Тезисы докладов, 22-27 июня 1998 г.- Новосибирск., 1998, - С.56.
3. Рудницкий В.А., Лиепиньш А.В. Получение машинно-ориентированных моделей объектов управления в адаптивных системах // Компьютерные технологии в науке, проектировании и производстве: Тезисы докладов II Всероссийская научно-техническая конференция, часть VIII, 3-4 февраля 2000 г. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет. - 2000, - С.39.
4. Goncharov V., Liepinsh A., Roudnitski V. Synthesis of the predetermined order regulators regarding detect quality indicators // Proceedings of the 4th Korean-Russian International Symposium on Science and Technology. Part 2. Electronics and information Technology, June 27- July 1, 2000. – Ulsan, Republic of Korea. – 2000.- P. 271-276.
5. Goncharov V., Liepinsh A., Rudnicki W. Diagnosing of Automatic Control Systems based on their dynamic characteristics under field conditions // Automatization in Manufacturing'2000: Scientific Papers of the III Wrocław Symposium, 7-8 December, 2000. – Wrocław, Poland. 2000.- P. 107-110.
6. А.В.Лиепиньш, В.А.Рудницкий. Идентификация цифровых систем управления по их временным динамическим характеристикам на основе вещественного интерполяционного метода.// Современные техника и технологии: Труды VII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск. – 2001.- Т.2.- С. 253-255.
7. Гончаров В.И., Рудницкий В.А.. Применение переменного шага квантования при решении задач идентификационной диагностики систем на основе ве-

- ществленного интерполяционного метода // Теория и техника автоматического управления: Сборник / Институт Кибернетический центр при Томском политехническом ун-те. – Томск, 2001. – С. 88-98: 3 ил.- 4 табл. – Библиогр.: 9 назв. - Рус. - Деп. в ВИНТИ 4.10.01, 2092-В01.
8. А.В. Лиепиньш, В.А. Рудницкий. Формирование эталонных моделей систем автоматического управления по прямым показателям качества // Информационные технологии в науке, проектировании и производстве: Материалы III Всероссийской научно-технической конференции, август 2001 г.– Нижний Новгород: Межрегиональное Верхне-Волжское отделение Академии технологических наук Российской Федерации .- 2001. – С. 24.
 9. Goncharov V., Liepinsh A., Rudnicki W. System Identification based on Real Interpolation Method // Proceedings of the XIV International Conference on Systems Science. Part 1. Plenary and Invited Papers. System Theory. Control. Theory, September 11-14, 2001. - Wroclaw, Poland.- 2001. – P. 234-238.
 10. Гончаров В.И., Лиепиньш А.В., Рудницкий В.А. Синтез робастных регуляторов низкого порядка // Изв. АН. Теория и системы управления. – 2001. - №4. – С.36-43.
 11. Рудницкий В.А., Лиепиньш А.В. Повышение точности математических моделей объектов управления с распределенными параметрами на основе вещественного интерполяционного метода // Информационные технологии в науке, проектировании и производстве: Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции. Часть 2, январь 2002 г. – Нижний Новгород: Межрегиональное Верхне-Волжское отделение Академии технологических наук Российской Федерации. – 2002. – С.7.

Соискатель