



ВЕСТНИК

ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО № 3 (103)
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА 2008

ISSN 1991-976X

СЕРИЯ

«КОМПЬЮТЕРНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ,
РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»

Выпуск 7

ПОСВЯЩАЕТСЯ
65- ЛЕТИЮ ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Редакционная коллегия:

Д.т.н., профессор Казаринов Л.С. (*отв. редактор*); д.т.н., профессор Войтович Н.И.;
д.т.н., профессор Логиновский О.В.; д.т.н., профессор Шестаков А.Л.;
д.т.н., профессор Тележкин В.Ф.; д.т.н., профессор Карманов Ю.Т.;
д.т.н., профессор Щипицын А.Г.; д.т.н., профессор Лысов А.Н.;
к.т.н., доцент Кафганников И.Л.;
Фокин Л.А. (*техн. редактор*)

СОДЕРЖАНИЕ

КОСТРОМИН В.А., ШАЛИМОВ Л.Н. Управление разработкой сложных систем на основе системно-целевого подхода.....	3
КОНДРАТОВ А.А., КРИВОНОЖЕНКОВ В.А., ЩИПИЦЫН А.Г. О построении модели бесплатформенной инерциальной навигационной системы авиабомбы с неинвариантными алгоритмами обработки информации	12

ПАНЮКОВ А.В., ЛАТИПОВА А.Т. Программное обеспечение системы оптимизации бюджета продаж с использованием ценовой диверсификации.....	16
ЩИПИЦЫНА М.А. Алгоритм функционирования имитационной модели процедуры калибровки инерциальной навигационной системы.....	21
ЛЕБЕДЕВ А.А., РАЗНОПОЛОВ К.О., РАЗНОПОЛОВ О.А. Применение адаптивного фильтра в системе измерения веса.....	26
БЕЛОУСОВ М.Д., ШЕСТАКОВ А.Л. Преобразователь температуры без опорного сопротивления	29
ЛАПИН А.П., ЦЫПИНА Ю.Н., ЛАПИНА Е.А. Статистическое моделирование функций преобразования датчиков давления типа «Метран».....	34
ПОПОВ А.Е., ЛАЗУКОВ А.В. Использование двухпараметрических математических моделей для аппроксимации функций преобразования давления	38
КАФТАННИКОВ И.Л., ПИМЕНОВА Н.В. Методика ассоциативного формирования онтологий корпоративного знания	41
ГРИШИН И.В., МАНКЕВИЧ Е.И., ТЕЛЕГИНА К.В., ШЕЛУДЬКО А.С., ШИРЯЕВ В.И. О решении задач параметрической идентификации процессов с хаотической динамикой	44
БЕРЕБИН М.А., РЯЗАНОВА А.Ю. Разработка алгоритма табличного метода дифференциальной диагностики органического расстройства личности и его реализация в форме компьютерной экспертной системы.....	51
ВЕРНЕРГОЛЬД А.Р., КАЗАРИНОВ Л.С., КОЛЕСНИКОВА О.В., ШНАЙДЕР Д.А. Об оптимальном управлении процессом вельцевания цинковых кеков.....	54
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ.....	57

УПРАВЛЕНИЕ РАЗРАБОТКОЙ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНО-ЦЕЛЕВОГО ПОДХОДА

В.А. Костромин, Л.Н. Шалимов

Предприятиям военно-промышленного комплекса (ВПК) для осуществления успешного бизнеса в современной конкурентной среде необходимо:

- выполнять заказы в сжатые сроки с качеством продукции, полностью удовлетворяющим заказчика и потребителя;
- минимизировать непроизводительные затраты, обеспечивать высокую эффективность разработки и производства изделий.

Эти задачи можно соотносить с известным подходом так называемого «бережливого предприятия», разработанного и успешно используемого компанией «Toyota» [1]. Подход включает, в частности, «бережливое производство» (Lean Manufacturing) и «бережливую систему разработки продукции» (Lean Product Development System – LPDS).

Бережливое производство – это комплекс инструментов, позволяющих устранять потери и поддерживать поток трансформируемых материалов. LPDS – это система, которая для достижения целей предприятия оптимально использует процессы, персонал и технологии при трансформации проектной информации, что позволяет существенно снижать затраты на стадии разработки продукции и оказать значительное влияние на конечный результат в конкурентной борьбе.

Известные достижения в производственной деятельности компании «Toyota» и, соответственно, в практической реализации концепции «бережливая система разработки продукции» свидетельствуют о появлении новой парадигмы управления качеством как комплексный подход к управлению качеством деятельности предприятия. Эта парадигма означает включение в «область определения» понятия «качество» наряду с качеством продукции или услуг, также качество процессов проектирования, качество технологий и качество ресурсов, используемых при разработке изделий.

На отечественных предприятиях ВПК комплексный подход фактически означает объединение нескольких подходов к управлению предприятием: системного, целевого, проектно-ориентированного, процессного, поведенческого, ситуационного и др.

При этом задачи повышения результативности управления предприятием могут быть достигнуты на основе комплексного применения адаптированных положений ряда международных стандартов, таких как ИСО 9000 (система менеджмента качества), ИСО 10006 (технологии управления проектами), ИСО 10303 (ИПТ–технологии), OHSAS 18000, SA 8000 (технологии управления персоналом) и др.

В широком постановочном плане данные задачи следует рассматривать в качестве стратегиче-

ских целей по совершенствованию управления предприятием. С точки зрения реализации их можно отнести к тактическим и оперативным целям предприятия, в частности, к целям управления конкретными проектами (портфелем проектов) на этапах жизненных циклов (ЖЦ) изделий, в том числе и на этапах разработки продукции.

Передовые предприятия ВПК, такие как ФГУП «Научно-производственное объединение автоматики им. акад. Н.А. Семихатова» (НПОА), обеспечивают решение задач управления проектами путем качественного управления ЖЦ в соответствии со стандартами CALS (ИПИ). При этом используются современные инструменты информационной поддержки, методы ускоренного создания опытных образцов, компьютерное моделирование, автоматизированное проектирование, при котором информация об изделии из систем CAD/CAM/CAE/PDM передается в ERP-систему и становится исходной для управления производственной деятельностью предприятия.

1. Системно-целевой подход к разработке систем управления

Современные проектно-ориентированные предприятия ВПК в своей деятельности используют методологию системных исследований. Данная методология базируется в основном на системно-целевом подходе, в котором взаимосвязь целевого и системного видения проекта применительно к сложным системам проявляется как в единстве множества целей в системе, так и в процессах их формирования и практического выполнения на всех стадиях и этапах ЖЦ продукции.

Успех проектов по созданию сложных систем управления (СУ) ракет космического назначения (РКН), таких как РКН «Союз-2», определяется во многом грамотным управлением (менеджментом) реализацией целей разработки, к которым относят цели проекта и цели продукта проекта. Цели продукта – это свойства и функции, которыми должна обладать продукция – аппаратура СУ, цели проекта – это совокупность работ, которые необходимо выполнить для производства продукта с заданными свойствами в требуемые сроки в объемах выделенных на заказ ресурсов и имеющегося на предприятии информационного потенциала. Разработка сложных СУ включает различные этапы научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР). Основной объем проектных работ выполняется на этапах ОКР в процессе:

- системного проектирования;
- детальной проработки с использованием средств автоматизации, методов моделирования и

макетирования вопросов аппаратной, алгоритмической и программной реализации СУ;

- разработки и выпуска конструкторской документации (КД);
- автономной и комплексной отработки КД на опытных образцах аппаратуры СУ, натурных испытаний, например, в составе РКН.

Эти работы по своему целевому назначению часто определяют как задачи «нисходящего» и «восходящего» проектирования продукции. Например, системное проектирование состоит как из подхода «от целого к частному», так и движения «от частного к целому», т.е. методов определения подсистем, компонентов и способов их соединения в систему, задания режимов, при которых система должна функционировать, выбора наиболее эффективного сочетания приборов, алгоритмов и программного обеспечения для реализации системы.

В общем случае на нисходящем этапе системного проектирования СУ множество частных целей является результатом определенного разложения (декомпозиции) генеральной (множества главных) цели (целей) – Z^0 , заданных в виде требований ТЗ с учетом договорных соглашений между исполнителем и заказчиком. При этом приходится учитывать то обстоятельство, что особенностью разработок, проводимых по ТЗ, является обязательность выполнения всех без исключения согласованных и предъявляемых разработчику требований ТЗ и условий в соответствии с исходными данными (ИД).

Частные цели СУ отражаются в ТЗ, ИД и в протоколах по взаимодействию, которые содержат конкретные требования к компонентам СУ. Реализации этих требований – частных целей продукта – являются частными целями проекта по созданию СУ, которые проявляются в виде частных задач разработки (ЧЗР). Перечень ЧЗР выпускается отдельно или в составе технических требований (ТТ) на разработку СУ и является исходным документом, в частности, для сетевого планирования и контроллинга работ проекта.

Достижение частных целей разработки СУ обеспечивается путем управления решением ЧЗР во времени на этапах ЖЦ. При этом жизненные циклы составных частей СУ и содержание соответствующих ЧЗР могут варьировать в зависимости от конкретных особенностей процесса реализации (включая заимствование аналогов и использование аутсорсинга), имеющихся ресурсов и применяемых технологических средств и методов.

Детализация генеральной цели продукта Z^0 при разработке аппаратуры СУ РКН может осуществляться с помощью функциональной и пространственной (территориальной) декомпозиции.

При функциональной декомпозиции в качестве частных целей выделяются основные системные функции и свойства аппаратуры СУ в целом, включая функциональные и эксплуатационные требования. Примерами могут служить задачи обеспечения требуемых характеристик точности,

надежности, эффективности управления, режимов функционирования и ряд других. Множество таких целей проектирования СУ обозначим Z^0 .

Методом пространственной декомпозиции можно выделить частные цели подсистем СУ (Z^I), при этом различают материальную и концептуальную пространственные декомпозиции. При материальной декомпозиции объектами проектирования являются конструктивные компоненты аппаратуры СУ (детали, сборочные единицы, комплексы, комплекты). Множество целей по результатам этой декомпозиции обозначим Z^M . Пример территориальной (пространственной) декомпозиции аппаратуры СУ РКН приведен на рис. 1. Условные обозначения: ЗИ – завод-изготовитель; КИС – контрольно-испытательная станция; ТК – технический комплекс; МИК – монтажно-испытательный корпус; СК – стартовый комплекс; КИАСУ – контрольно-испытательная аппаратура СУ; НАСУ – наземная аппаратура СУ; БАСУ – бортовая аппаратура СУ; ПУС – пульт управления стартом; ПУЦ – прибор управляющий цифровой; АПА – аппаратура приема альманаха спутниковой навигационной обстановки; АЭП – аппаратура электропитания.

Для концептуальной декомпозиции характерно *воображаемое расчленение СУ на ее подсистемы* (система выработки начальных условий, система управления центром масс РКН, система стабилизации РКН, система управления расходом топлива и многие другие) и дальнейшая декомпозиция подсистем на цели и задачи более низкого уровня. Например, в задаче обеспечения точности СУ целями низшего уровня являются задачи обеспечения заданных уровней погрешностей (методических, инструментальных, вычислительных и др.) работы выделенных пространственных подсистем. Множество этих целей обозначим Z^K .

Следует отметить, что ЧЗР подсистем, сформулированные вследствие концептуальной декомпозиции, как правило, решаются комплексно в составе определенной группы конструктивно выделенных приборов аппаратуры СУ с одновременным обеспечением выполнения общих функциональных и эксплуатационных требований.

Итогом применения различных видов декомпозиции является объединение частных целей создания СУ: $Z^0 = Z^0 \cup Z^I = Z^0 \cup Z^M \cup Z^K$.

При выполнении ЧЗР к целям проекта относится и обеспечение экономических показателей, что переводит задачи управления разработкой аппаратуры СУ РКН в область проблематики управления эффективностью бизнеса.

Процесс разработки СУ является, таким образом, процессом достижения множества целей, полученных в результате последовательной декомпозиции (разложения) генеральной цели (множества главных целей) в некоторую совокупность частных целей более низких уровней. В общем виде этот процесс можно представить в виде *т-*

уровневого графа с вершинами, соответствующими частным операциям и их целям.

Граф обозначим

$$G = (Z, R), Z = \{Z^0, Z^1, \dots, Z^{m-1}\},$$

где Z^0 – множество главных целей разработки СУ РКН; $Z^i = \{Z_{1i}^i, Z_{2i}^i, \dots, Z_{li}^i\}$ – множество целей i -го ранга или $(m - i - 1)$ уровня.

Дуги графа G , составляющие множество $R = \{r_{ij}^i\}$; $0 \leq i \leq m - 2$; $0 \leq j \leq l_i$; $0 \leq v \leq l_{i+1}$, являются отношениями условий достижения целей верхнего уровня. Граф изображен на рис. 2.

В общем случае граф G представляет дерево с корнем Z^0 только на множестве вершин первого ранга. Ниже могут появиться перекрестные связи (изображены пунктирными линиями), что будет указывать на взаимосвязь решения ЧЗР $(i + 1)$ -го ранга для достижения функциональных и пространственных целей i -го ранга.

Решение состоит в выборе таких целей и задач i -го ранга, выполнение которых обеспечило бы достижение целей более высокого $(i - 1)$ -го ранга.

Если решения ЧЗР для достижения целей различных рангов должны формироваться в моменты времени t_i , где $i = 0, 1, \dots, m - 1$, то в результате упорядочения множества вершин во времени получаем граф $G_i = G(Z, R, t_i)$, $i = 0, 1, \dots, m - 1$, который отображает желаемую реализацию ЧЗР во времени как процесс целевого планирования. Этот процесс следует от вершины графа Z^0 вниз вплоть до цели и задач самого низкого уровня. Ему соответствует множество дуг, ориентированных на рис. 2 сверху вниз, что соответствует процессам *нисходящего проектирования* аппаратуры СУ РКН.

Граф $G = (Z, R)$ (рис. 2) можно рассматривать и как модель процессов проверки и подтверждения правильности выполнения технических требований к СУ и ее составным частям в ходе моделирования, экспериментальной отработки и испытаний опытных образцов аппаратуры СУ (процессы восходящего проектирования). При этом критериями для оценки результатов проверочных работ являются требования и данные соответствующих ТЗ и ИД.

Пусть проверка соответствия реальных характеристик аппаратуры системы заданным критериям начинается с целей и соответствующих ЧЗР $(m - 1)$ -го ранга и далее в моменты времени t_k последовательно распространяется вверх до достижения генеральной цели Z^0 . Тогда процессы отработки создаваемой системы отображаются графом

$$G_{ik} = (Z, R^{-1}, t_k),$$

где $k = 0, 1, \dots, m - 1$ – номера уровней или страт; R^{-1} – инверсия отношений R , множества дуг, ориентированных в обратном направлении (снизу вверх).

Указанной модели соответствует иерархическая структура комплекса программ экспериментальной отработки, предварительных и приемочных испытаний аппаратуры СУ (программы-методики автономных испытаний приборных компонентов, частные программы экспериментальной

отработки подсистем СУ, комплексные программы экспериментальной отработки аппаратуры СУ и ракетного комплекса в целом, программы летных испытаний и пр.).

Логика развития способов формирования системы целей и их выполнения при разработке сложных систем и изделий в современных условиях привела в итоге к коллективным формам организации работ, которые иногда называют системой управления по целям [2]. Суть этой системы заключается в широком участии в назначении частных целей и в определении ЧЗР различного уровня непосредственно исполнителей этих целей и задач. На практике это наиболее наглядно проявляется при составлении сетевых графиков, когда разработчики совместно с руководителями в соответствии с главными целями и директивными срокам проекта, составом и квалификацией участников, определяют детализированный перечень задач и работ, необходимую логическую последовательность и промежуточные сроки их выполнения. После согласования и утверждения такой план становится обязательным для выполнения и является основой для управления разработкой сложной системы.

2. Модели задач разработки аппаратуры СУ

Развитие процесса проектирования во времени связано как с выбранным способом расчленения СУ РКН, так и со спецификой ЧЗР, выполняемых на соответствующих этапах проектных работ. Множество ЧЗР СУ РКН, сформулированных и приведенных в документации (исходной и полученной в процессе разработки), представляют собой систему информационных моделей (ИМ), раскрывающих изначальную неопределенность проекта и отражающих желаемые результаты разработки СУ РКН. Таким образом, информационной моделью СУ является совокупность документов, однозначно описывающих ЧЗР, или, другими словами, совокупностью информационных моделей ЧЗР. Информационная модель аппаратуры СУ РКН приведена на рис. 3. Из рис. 3 следует:

- разработка СУ является сложной задачей, в процессе решения которой приходится решать многочисленные ЧЗР (как последовательно, так и параллельно) и осуществлять обмен информацией различного типа;
- ИМ системы включает множество ИМ ЧЗР наземной, бортовой и контрольно-испытательной аппаратуры СУ (НАСУ, БАСУ, КИАСУ) и их взаимодействия со смежными системами;
- множество вложенных ИМ ЧЗР соответствует иерархической структуре системы, целей разработки СУ и матричному виду совокупности ЧЗР;
- на каждом горизонтальном уровне и в вертикальных направлениях иерархии целей существует подмножества ИМ ЧЗР (пакеты задач), которые можно представить в виде наборов информационных цепей взаимосвязанных и не связанных между собой звеньев (рис. 4).

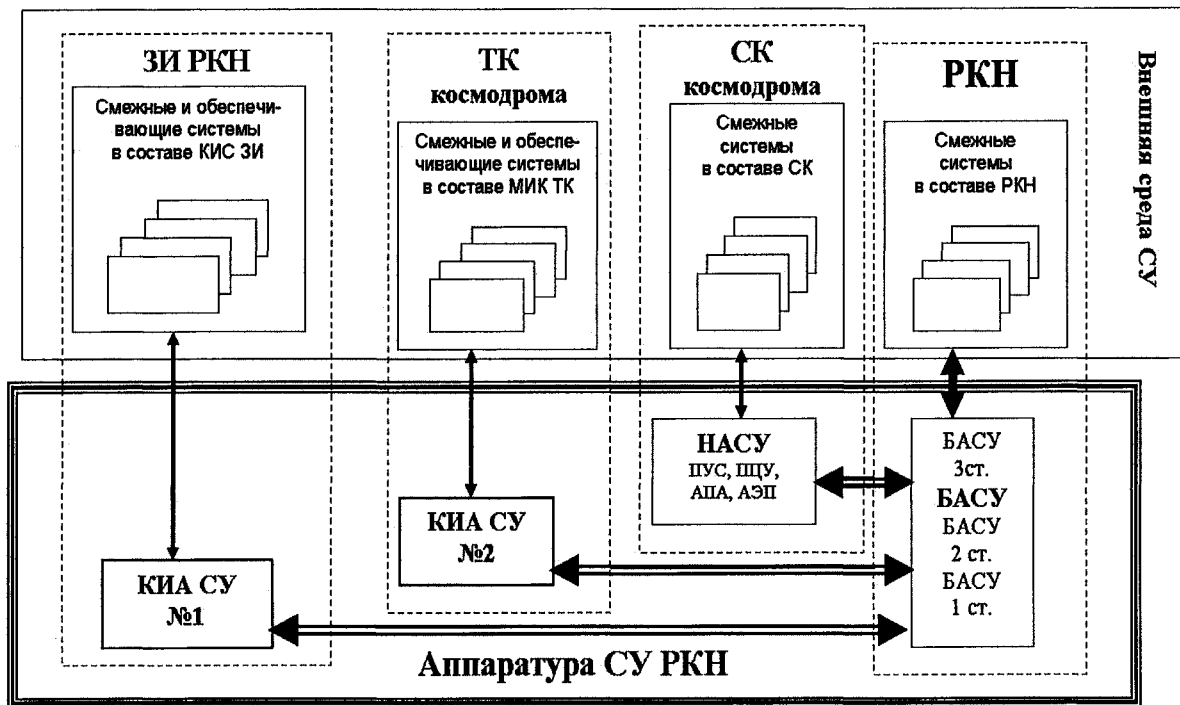


Рис. 1. Территориальная (пространственная) декомпозиция аппаратуры СУ РКН

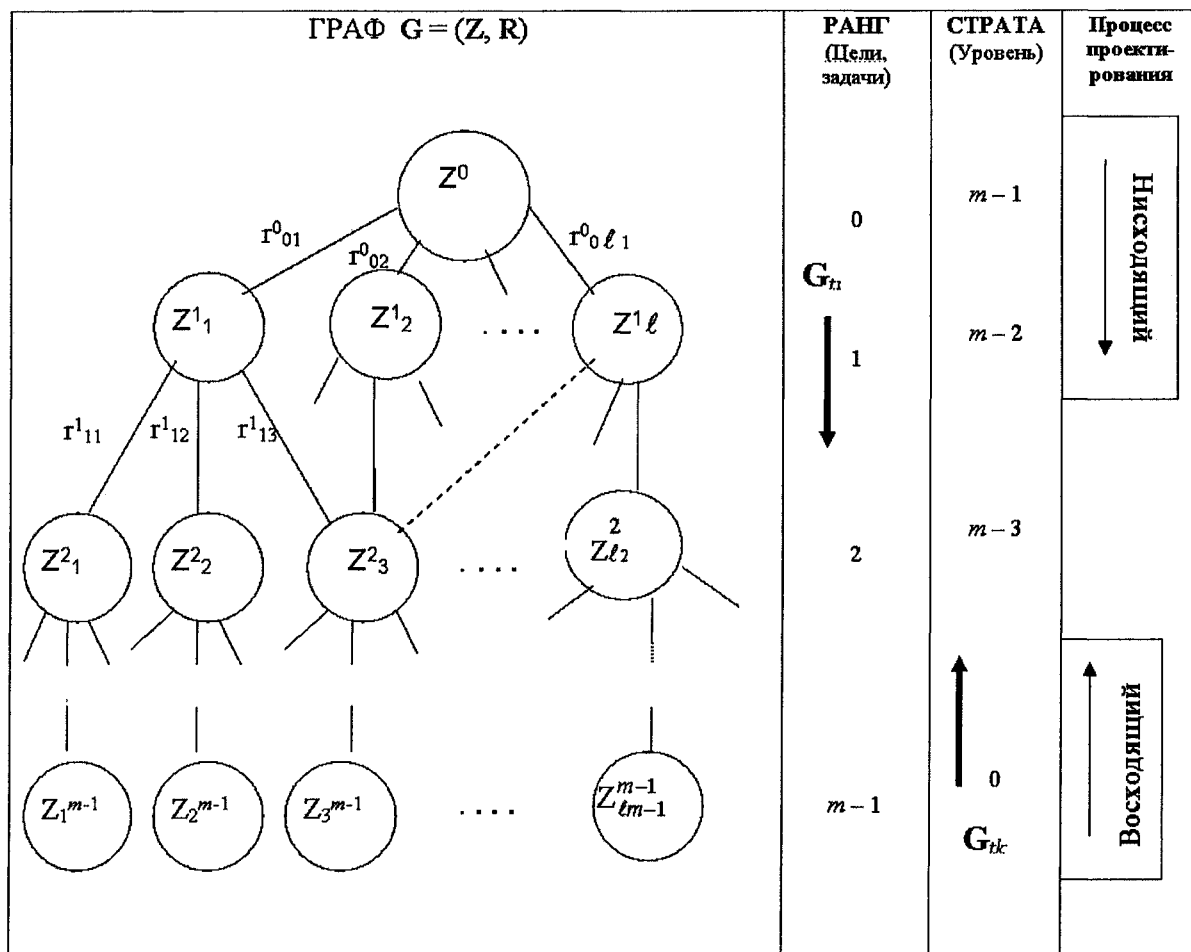


Рис. 2. Модель процесса разработки СУ РКН

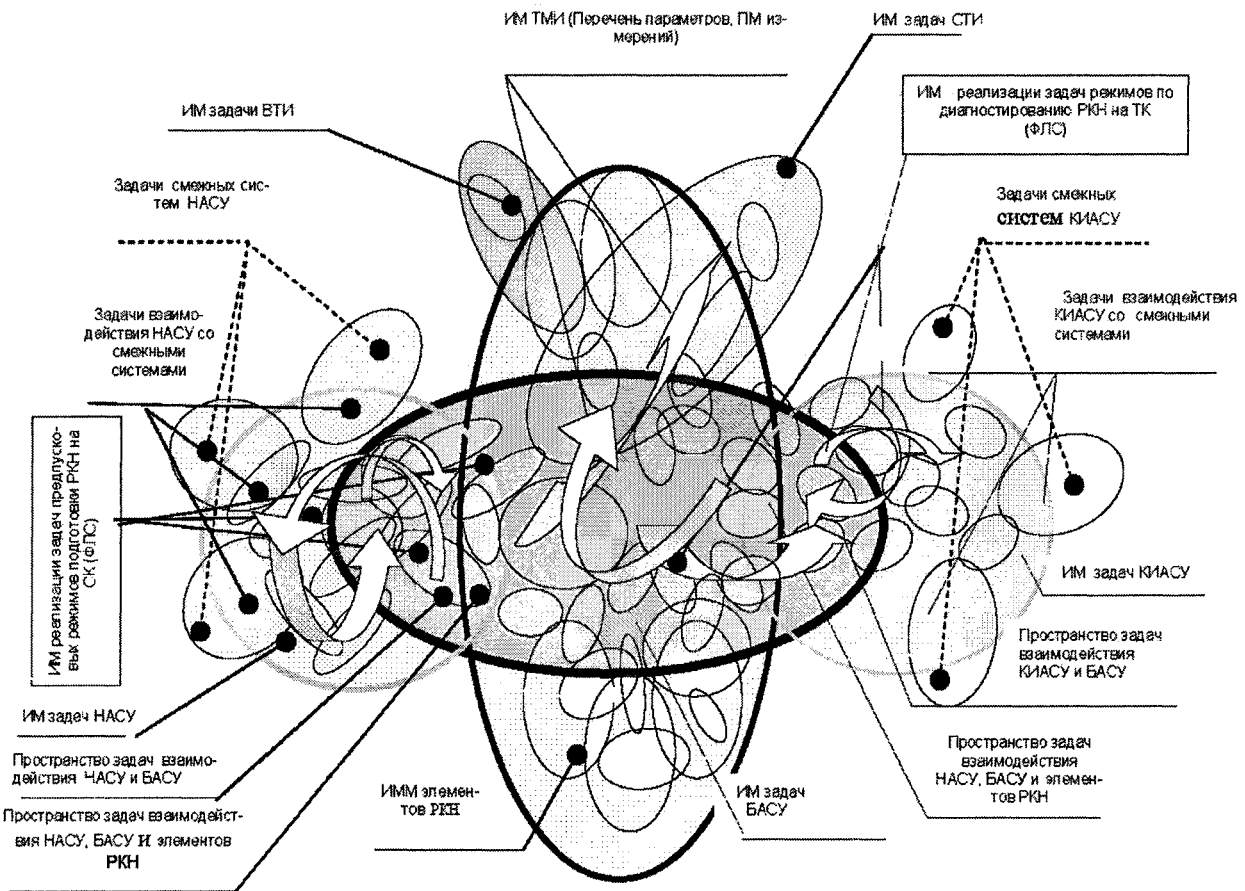


Рис. 3. Информационная модель задач проектирования алгоритмов, программ и аппаратуры СУ РКН

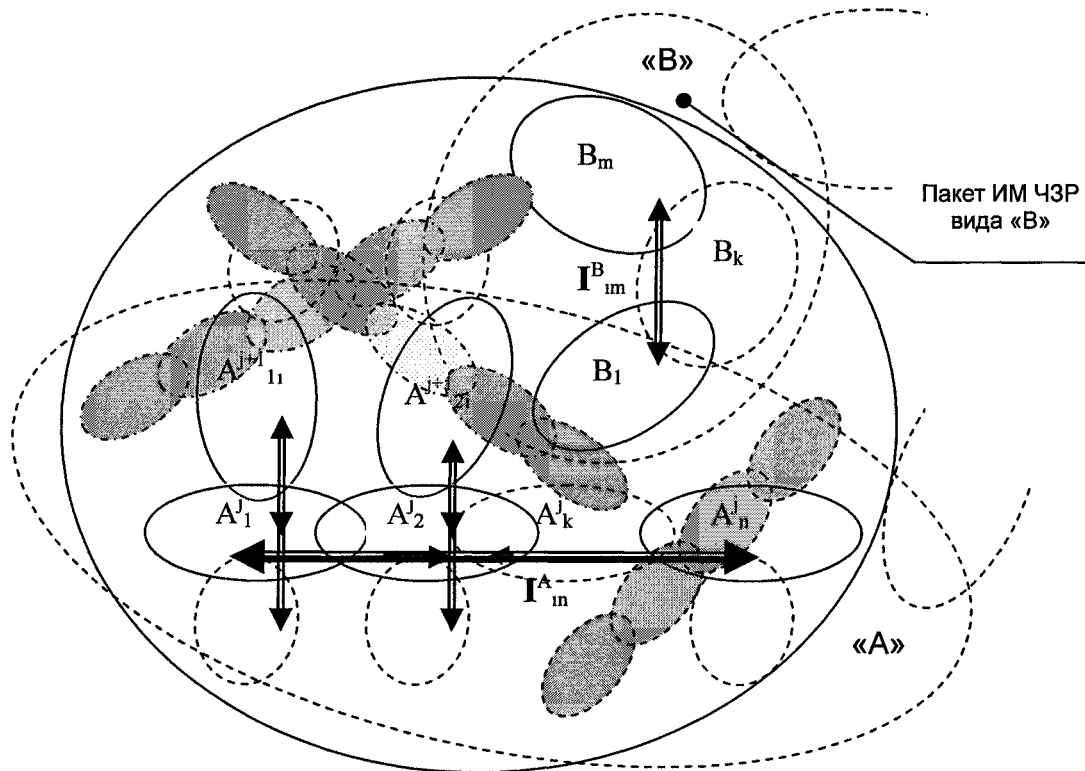


Рис. 4. Схема пакетов ИМ ЧЗР (задачи вида «А» и «В») с информационными связями I^A и I^B

На основании данных ИМ ЧЗР (пакетов ИМ ЧЗР) получают математические или имитационные модели (системы моделей), разрабатывают алгоритмы, программы и конструкторскую документацию на макетные или опытные образцы аппаратуры. Оценку результатов моделирования, макетирования и отработочных испытаний производят на соответствие требованиям, которые содержатся в ТЗ, ИД и в другой исходной документации и являются критериями для анализа результатов решения ЧЗР.

Схема решения ЧЗР полетных режимов СУ на ранних этапах системного проектирования приведена на рис. 5. Решение ЧЗР данного вида представляет собой итерационный процесс и осуществляется, как правило, методом математического моделирования. Система моделей, используемая при разработке требований к математическому обеспечению при проектировании полетных алгоритмов и программ аппаратуры СУ РКН, приведена на рис. 6.

Систему моделей полетных ЧЗР (полную математическую модель – ПММ), разрабатывают на основании ИМ БАСУ, РКН и реализуют на высокопроизводительных ЭВМ, объединенных в единый комплекс локальной вычислительной сетью. ПММ включает цифровую модель СУ (МСУц) и ряд моделей объекта управления (МОц). ПММ позволяет проводить моделирование по схеме замкнутого контура «МСУц–МОц–МСУц».

На ранних этапах проектирования СУ с использованием ПММ проводят весь необходимый комплекс расчётно-теоретических работ. По мере уточнения ПММ, моделирование обеспечивает с достаточно высокой степенью достоверности прогнозирование работы математического обеспечения, поведения СУ и РКН в полете. ПММ обеспечивает также сопровождение полунатурного моделирования в составе цифровых моделирующих комплексов (ЦМК) и комплексных отработочных испытаний комплектов аппаратуры СУ на комплексном стенде предприятия. Система сквозной автоматизированной разработки алгоритмов СУ РКН приведена на рис. 7.

3. Информационная поддержка задач предприятия

Внедрение и развитие современных информационных технологий в НПОА осуществляется на основании стратегии – Концепции создания корпоративной информационно-технологической управляющей системы (КИТУС), утвержденной и принятой к реализации в 2002 году, ежегодных программ развития ИТ (планирование затрат, состава и результатов работ), решений научно-технического совета (НТС) предприятия по результатам коллективного рассмотрения и анализа текущего состояния ИТ-процессов.

КИТУС предназначен для обеспечения создания изделий, управления их жизненным циклом и представляет собой программно-аппаратный комплекс с распределенной обработкой информации, состоящий из систем поддержки жизненных циклов изделий, реализованных на автоматизированных рабочих местах (АРМ) на базе ПЭВМ, соединенных между собой электронными каналами связи.

Основой КИТУС является единое информационное пространство (ЕИП), состоящее из распределённых баз данных с разграниченным доступом и содержащее всю информацию о жизненном цикле изделий. В процессе своего функционирования КИТУС обеспечивает:

- обмен между подразделениями по вычислительной сети (ВСП) предприятия технической и служебной информацией в соответствии с правами пользования;
- разработку в электронном виде конструкторской и технологической документации (КТД) на любое изделие НПОА, учет КТД в отделе технической документации (ОТД) после согласования и утверждения с электронной цифровой подписью. Электронная КТД разрабатывается в соответствии со стандартами предприятия на электронный документооборот и включает:

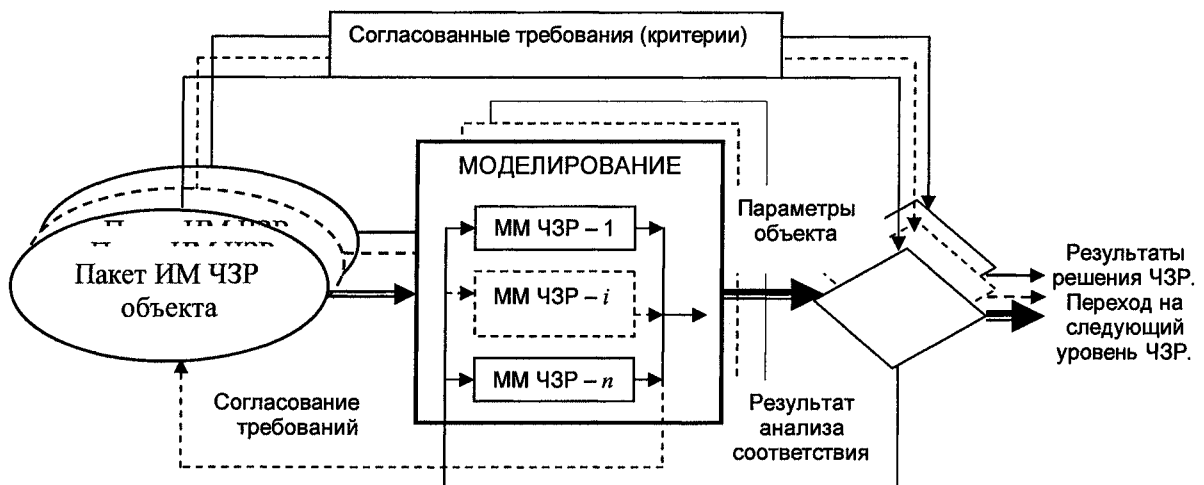


Рис. 5. Схема решения ЧЗР методом математического моделирования (ММ)

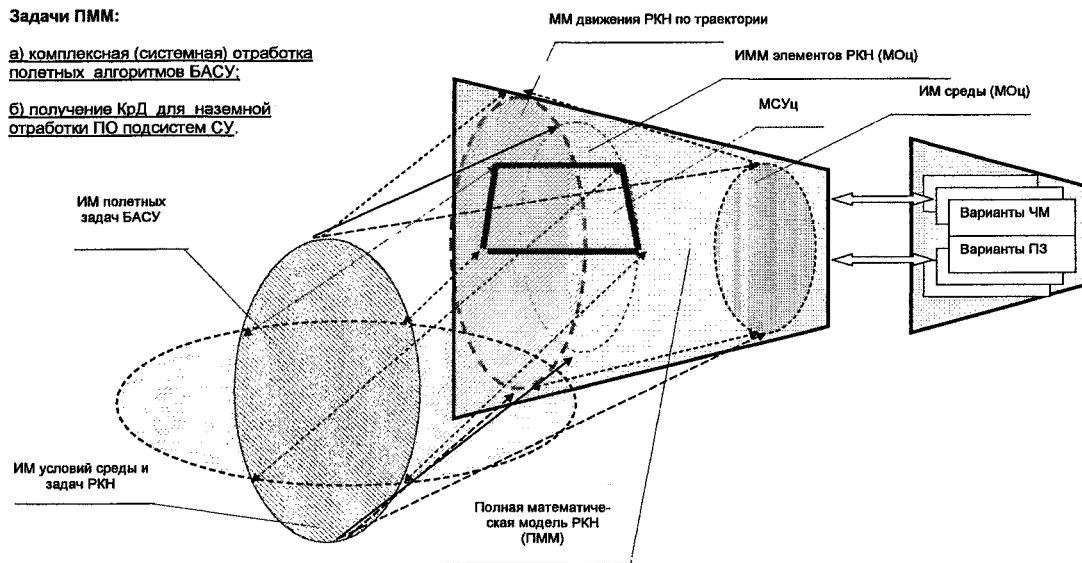


Рис. 6. Система моделей при проектировании полетных алгоритмов СУ

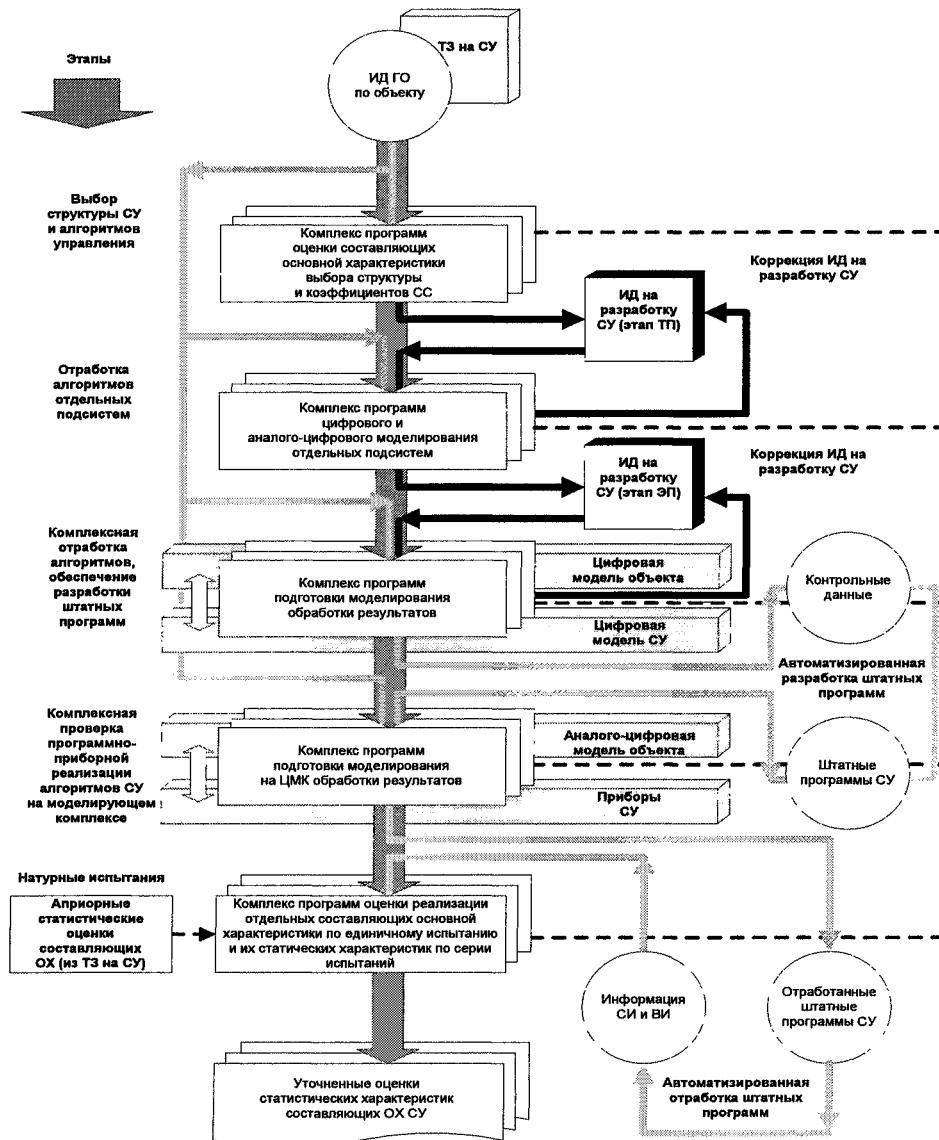


Рис. 7. Сквозная система автоматизированной разработки и отработки алгоритмов СУ

1. Спецификации, схемную, чертежную и текстовую документацию на любое изделие.

2. ПМО средств автоматизации процессов разработки, подготовки производства, изготовления и испытаний изделий.

3. Электронные справочники (перечни разрешенных к применению ЭРИ, материалов и пр.).

4. Электронные библиотеки (ЭРИ, материалов, деталей, сборочных единиц, оснастки и инструмента, техпроцессов и пр.).

5. Интерактивные электронные технические руководства и др.

- управление предприятием (анализ финансово-хозяйственной деятельности, учет и анализ финансовых потоков, трудозатрат, движения товарно-материальных ценностей, управление персоналом, прогноз и принятие решений и пр.);

- управление производством (планирование производственных мощностей и материальных ресурсов; управление производственным заказом, обрабатывающими центрами, поставками – снабжением и сбытом и т.д.);

- управление проектами (управление бизнес-планом и календарными планами реализации проектов; управление конфигурацией; управление ресурсами; управление ходом разработки СУ и изготовления изделий).

Управление проектом, как отмечалось выше, представляется набором процедур планирования, решения и оценки ЧЗР, выполняемых последовательно, параллельно и последовательно-параллельно. Количество таких процедур резко увеличивается при одновременной работе по нескольким проектам, параллельном выполнении портфеля заказов. Соответственно возрастают объемы оперативной информации и сложность принятия своевременных управленческих решений на всех уровнях организационных структур проектов. Поэтому требуемую эффективность управления работами СУ было решено обеспечить путем использования информационной системы управления проектами (ИСУП), наиболее адаптированной к технологическим условиям предприятия.

После детального анализа был сделан выбор в пользу продукта Microsoft Project. Система соответствует основным тенденциям современных информационных технологий и как программный продукт достаточно просто осваивается специалистами различного уровня. Абсолютное большинство пользователей на предприятии работают в среде Microsoft Office, а в интегрированных решениях продукты Microsoft усиливают полезность друг друга и их совместная потребительская ценность значительно возрастает.

Система управления проектами Microsoft Project является одной из самых распространенных и удобных в использовании. Эта система обеспечивает возможность представления любого процесса в виде логической последовательности определенных задач с учетом их взаимосвязей. Это позволяет проводить

наглядный анализ состава работ и обеспечивать оптимальный порядок выполнения предстоящего комплекса задач, а также дает возможность объективно оценить действия исполнителей, ход выполнения работ и выработать дополнительные мероприятия по повышению эффективности производства.

Анализ показал, что Microsoft Project предоставляет информационную технологию для реализации принципов управления НИОКР, соответствующую стандартам НПОА. При этом возможна адаптация и доработка существовавшей на предприятии информационной системы для реализации функций, свойственных Microsoft Project, и обеспечивается, при необходимости, возможность взаимодействия на уровне планирования с внешними организациями. Организация планирования заказов по НИОКР с использованием системы обеспечивает сквозное планирование, включая опытное производство, и доведение планов до уровня рядовых исполнителей.

Для более эффективного применения Microsoft Project в целях управления проектами целесообразна его интеграция с Microsoft SharePoint Team Services. Это дает возможность легко управлять версиями документов и обеспечивает необходимое управление записями по качеству.

Программный продукт – Microsoft SharePoint позволяет создавать виртуальное пространство для совместной работы. Еще больше усиливает синергетический эффект использование средств обеспечения групповой работы на базе Microsoft Outlook (или Microsoft Exchange).

В состав ИСУП входят следующие программные продукты:

- Microsoft Project Server – серверная часть системы, обеспечивающая поддержку управления проектами, оптимизацию загрузки ресурсов, генерацию отчетов по ходу выполнения проектов и т.д.;

- Microsoft SharePoint Portal Server – серверная часть системы, реализующая сегмент ЕИП предприятия – информационное пространство ИСУП и представляющая сервисы управления проектной документацией, поиска информации, совместной работы пользователей, учета проектных рисков, проблем и т.д. (предполагается на втором этапе внедрения);

- Microsoft Project Web Access – АРМ пользователей системы, доступный через веб-браузер;

- Microsoft Project Professional – АРМ руководителей проектов, устанавливаемый на рабочую станцию;

- Microsoft Reporting Services – создание, управление и рассылка отчетов;

- Microsoft SQL Server 2000 – серверная часть системы, обеспечивающая обработку и хранение данных.

Используемые информационные технологии:

- средства групповой работы – Microsoft Outlook 2003;

- средства документирования – Microsoft Office 2003;

- Microsoft Office 2003 и операционная система Microsoft Internet Explorer 6 и выше.

Базой данных системы является Microsoft SQL Server, которая содержит все данные по portalу Microsoft SPS и Microsoft SQL Server. Структура базы данных определена стандартами хранилища Microsoft SPS 2003.

Внедрению Microsoft Project на предприятии предшествовала большая подготовительная работа, проведенная подразделениями управления по системной интеграции с участием пользователей. Была проведена опытная эксплуатация системы на базе одного из заказов, в ходе которой выполнены следующие работы.

1. Сгенерирован сервер с дисковой подсистемой RAID 5 под управлением Windows 2003 Server.

2. Инсталлирована система Project 2003 Server со службами Internet Information Server, Share Point Services, Microsoft Analyses Services и базами данных на основе Microsoft SQL 2000 Server.

3. Изучена структура баз данных Microsoft Project server и на основе полученных знаний разработаны и интегрированы в Microsoft Project Professional 2003 программные модули. Эти программы оптимизированы для сетевой работы системы (получение данных через хранимые процедуры сервера Microsoft SQL) и обеспечивают получение отчетных данных в принятой на предприятии системе отчетности (планы – отчеты номенклатурных подразделений, номенклатурные планы с группировкой работ по подсистемам и по исполнителям, неосвоенные исполнителем объемы работ, печать актов и т.д.).

4. Настроены рабочие места пользователей в количестве более 40 позиций для работы Project в сетевом режиме.

5. Разработан корпоративный шаблон, обеспечивающий унифицированные представления графиков в системе и единый набор корпоративных полей.

6. В базу данных Project Server конвертированы автономные графики заказа с информацией об отслеживании хода выполнения работ за определенный календарный период и по результатам отчетности сформированы сводные сетевые графики на соответствующий календарный период.

7. В систему отчетности введено разграничение прав доступа к отчетной информации в зависимости от категории пользователя.

8. Разработаны и интегрированы в систему Microsoft Project модули электронной подписи на основе шифрования по алгоритму RSA (открытый, закрытый ключ).

9. Проведено обучение пользователей и выпущены инструкции для пользователей системы:

- по работе с системой Microsoft Project Professional 2003 в сетевом режиме и правила разработки сводных сетевых графиков (ССГ) в Microsoft Project;

- по отслеживанию работ и правила отслеживания работ в Microsoft Project.

10. Проведена проверка формирования отчетности по заказу в сетевом режиме работы Microsoft Project за определенный календарный период и пр.

Выполненные работы в ходе опытной эксплуатации, в частности, показали:

- нормальное функционирование системы Microsoft Project в сетевом режиме;

- возможность интегрирования в систему дополнительных программных модулей;

- возможность быстрого освоения системы пользователями.

Заключение

По результатам опытной эксплуатации были проанализированы и реализованы, при необходимости, замечания пользователей, и принято решение руководства предприятия о внедрении Microsoft Project в практику управления заказами.

В ходе реального использования продукта в системе Project Server были, например, разработаны и опубликованы директивные сетевые графики (ДСГ) на год по трем заказам, на основании которых были сформированы и опубликованы календарные планы на год для соответствующих подразделений предприятия и разработано более 50 подсистем сводных сетевых графиков.

Литература

1. Лайкер, Дж. Система разработки продукции в Toyota: люди, процессы, технологии / Дж. Лайкер, Д. Морган. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2007.

2. Друкер, П. Ф. Практика менеджмента / П. Ф. Друкер. – Киев: Вильямс, 2001.

О ПОСТРОЕНИИ МОДЕЛИ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АВИАБОМБЫ С НЕИНВАРИАНТНЫМИ АЛГОРИТМАМИ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

А.А. Кондратов, В.А. Кривоноженков, А.Г. Щипицын

Анализ существующих тенденций развития авиационного вооружения убедительно показывает, что в настоящее время и в ближайшем будущем основное внимание специалистов должно уделяться созданию и совершенствованию высокоточного «интеллектуального» оружия, обеспечивающего эффективное «точечное» поражение целей в любых условиях, независимо от противодействия противника, в том числе с помощью активных или пассивных помех [1].

Таким образом, весь арсенал последних достижений в области решения навигационных задач, таких как GPS/ГЛОНАСС технологии, бесплатформенные инерциальные системы, микромеханика и другие могут и должны быть использованы для создания управляемых и корректируемых авиационных упр.

В работах [1, 2] приводятся различные схемы комплексирования БИНС со спутниковыми навигационными системами (СНС): отдельная, слабо связанная, жестко связанная, глубоко интегрированная схемы. Все они имеют свои преимущества и недостатки, но потенциальная точность выходной навигационной информации в них повышается за счет применения специальных схем комплексирования и алгоритмического обеспечения.

В данной работе ставится задача на исследование метода повышения точности выходных навигационных параметров БИНС за счет использования информации о динамических свойствах объекта.

Идея оптимизации алгоритмов ИНС на основе учета динамических свойств объекта не нова. В работах [3, 4] затронуты вопросы повышения эффективности навигационных алгоритмов для объектов с известной динамикой.

В настоящей работе предлагается методика построения алгоритмов для БИНС с учетом линеаризованных уравнений движения УАБ на основе расширенного фильтра Калмана. Предлагается непосредственное включение оцениваемых навигационных параметров в вектор состояния.

1. Постановка задачи неинвариантной обработки информации в БИНС

В настоящей работе используются следующие правые прямоугольные системы координат (СК) [5]:

- инерциальная $O_0X_IY_IZ_I$ с началом в центре Земли, оси X_I и Z_I которой направлены в точку весеннего равноденствия и по оси мира

(вращения Земли) соответственно, ось Y_I образует правую ортогональную тройку (рис. 1);

- гринвичская $O_I XYZ$, связанная с Землей, ось X которой проходит через пересечение гринвичского меридиана с экватором, ось Z совпадает с Z_I , а ось Y также образует правую ортогональную тройку;

- сопровождающий навигационный трехгранник $OENU$ с началом в центре масс объекта-УАБ, оси E , N и U которого направлены по географической параллели на восток, по меридиану на север и по местной вертикали вверх соответственно;

- связанная с объектом $Oxyz$, оси x , y и z которой совпадают с главными осями инерции УАБ и направлены (относительно конструкции) вперед, вверх, и вправо соответственно.

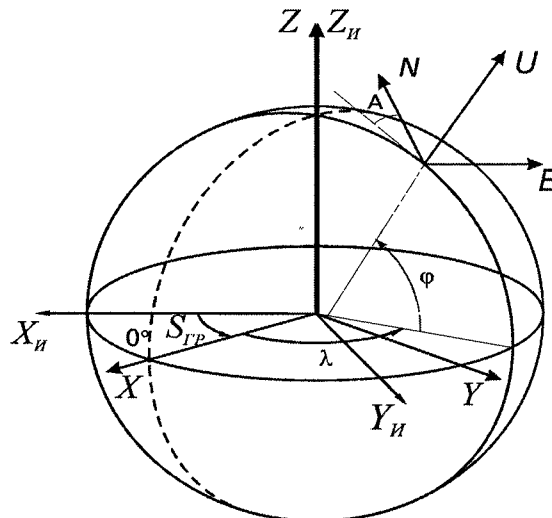


Рис. 1. Системы координат, используемые в БИНС

Задачу неинвариантной обработки информации в БИНС сформулируем следующим образом.

Будем считать, что гироскопы и акселерометры измеряют составляющие абсолютной угловой скорости УАБ и ее кажущиеся ускорения по связанным осям. Датчики положения аэродинамических рулей позволяют измерять управляющее воздействие на бомбу: отклонение руля высоты δ_B , элеронов δ_ϵ и руля направления δ_H . Стохастическая модель движения УАБ известна.

На основе измеряемых сигналов первичной инерциальной информации, а также сигналов управляющего воздействия на объект, используе-

мых совместно с известной стохастической моделью его движения, требуется оценить параметры движения объекта.

2. Модель движения УАБ

Кинематические уравнения для поступательного и вращательного движения имеют вид [3, 5]:

$$\begin{cases} \dot{\lambda} = W_E / ((R+h) \cos \varphi); \\ \dot{\varphi} = W_N / (R+h); \\ \dot{h} = W_U; \end{cases} \quad (1)$$

$$\dot{C} = C \left[\bar{\omega}_{ENU}^{xyz} \times \right] - \left[\bar{\omega}_{ENU}^{X_i Y_i Z_i} \times \right] C. \quad (2)$$

Здесь λ , φ и h – географические координаты УАБ (долгота, широта и высота соответственно); W_E, W_N, W_U – проекции на оси навигационного трехгранника \bar{W}^{ENU} – вектора скорости движения УАБ относительно Земли, которую в целях упрощения принимаем шаром радиуса R ; $\Omega^{ENU} = [0; \Omega \cos \varphi; \Omega \sin \varphi]$ – угловая скорость вращения Земли в проекциях на оси навигационного трехгранника, $\omega_{ENU}^{XYZ} = [-\dot{\varphi}; \dot{\lambda} \cos \varphi; \dot{\lambda} \sin \varphi]$ – угловая скорость навигационного трехгранника относительно гринвичской системы координат; $\bar{\omega}_{ENU}^{X_i Y_i Z_i} = \bar{\Omega}^{ENU} + \bar{\omega}_{ENU}^{XYZ}$ – угловая скорость навигационного трехгранника относительно инерциальной СК, определяемая вращением Земли и движением центра масс УАБ.

Поскольку из девяти элементов матрицы ориентации C независимыми являются только три, то при ее нахождении применяются различные варианты параметризации, например с помощью эйлеровых углов рыскания ψ , тангажа υ и крена γ . Матрица C с элементами c_{ij} , $i, j = 1, 2, 3$ имеет следующий вид:

$$C_{3 \times 3} = \begin{cases} c_{11} = -\sin \psi \cos \upsilon; \\ c_{12} = \sin \psi \sin \upsilon \cos \gamma + \cos \psi \sin \gamma; \\ c_{13} = -\sin \psi \sin \upsilon \sin \gamma + \cos \psi \cos \gamma; \\ c_{21} = \cos \psi \cos \upsilon; \\ c_{22} = -\cos \psi \sin \upsilon \cos \gamma + \sin \psi \sin \gamma; \\ c_{23} = \cos \psi \sin \upsilon \sin \gamma + \sin \psi \cos \gamma; \\ c_{31} = \sin \upsilon; \\ c_{32} = \cos \upsilon \cos \gamma; \\ c_{33} = -\cos \upsilon \sin \gamma. \end{cases} \quad (3)$$

С учетом (3) уравнение (2) может быть записано в виде:

$$\begin{cases} \dot{\psi} = 1/\cos \upsilon (\omega_x \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma); \\ \dot{\upsilon} = \omega_y \sin \gamma + \omega_z \cos \gamma; \\ \dot{\gamma} = \omega_x - \operatorname{tg} \upsilon (\omega_y \cos \gamma - \omega_z \sin \gamma). \end{cases} \quad (4)$$

Вектор относительной угловой скорости вычисляется по измерениям гироскопических датчи-

ков с учетом известной скорости вращения навигационного репера:

$$\begin{aligned} \bar{\omega}_{xyz}^{ENU} &= \bar{\omega}_{xyz}^{X_i Y_i Z_i} - C \bar{\omega}_{ENU}^{X_i Y_i Z_i} = [\omega_x; \omega_y; \omega_z] + \\ &+ \dot{\varphi} [-\sin \psi \cos \upsilon; \cos \psi \cos \upsilon; \sin \upsilon] - (\dot{\lambda} + \Omega) \times \\ &\times [(\cos \varphi \cos \gamma - \sin \varphi \sin \gamma) \times \\ &\times [\sin \psi \sin \upsilon; -\cos \psi \sin \upsilon; \cos \upsilon] + \\ &+ (\cos \varphi \sin \gamma + \sin \varphi \cos \gamma) [\cos \psi; \sin \psi; 0]]. \end{aligned} \quad (5)$$

Поступательное движение УАБ в инерциальной системе координат подчиняется основному закону динамики, который в проекциях векторов на оси навигационного трехгранника имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{W}}^{ENU} &= 1/M \cdot C \bar{F}^{xyz} + \bar{g}^{ENU} - \\ &- (2[\bar{\Omega}^{ENU} \times] + [\bar{\omega}_{ENU}^{XYZ}]) \bar{W}^{ENU}, \end{aligned} \quad (6)$$

где M – масса объекта, \bar{F}^{xyz} – аэродинамическая сила, действующая на объект, в проекциях на оси связанной СК.

Вращательное движение УАБ также описывается дифференциальным уравнением, вытекающим из основного закона динамики вращательного движения. Для УАБ, главные оси инерции которой совпадают с осями связанной СК, наиболее простой вид это уравнение имеет в проекциях на эти оси [3]:

$$\dot{\bar{\omega}}_{ENU}^{xyz} = (\bar{J}^{xyz})^{-1} (\bar{m}^{xyz} - [\bar{\omega}_{ENU}^{xyz} \times] \bar{J}^{xyz} \bar{\omega}_{ENU}^{xyz}), \quad (7)$$

где

$$\bar{J}^{xyz} = \operatorname{diag}_{3 \times 3} (J_x, J_y, J_z) \quad (8)$$

матрица моментов инерции, J_x, J_y, J_z – моменты инерции УАБ относительно осей связанной СК (главные моменты инерции УАБ).

Аэродинамическая сила \bar{F}^{xyz} , действующая на УАБ, определяется конфигурацией бомбы и характером обтекания ее воздушным потоком. В проекциях на оси связанной СК она может быть представлена в виде [3]:

$$\bar{F}^{xyz} = qS[c_x; c_y; c_z] + \bar{w}_f. \quad (9)$$

Здесь $q = \rho V_{\text{возд}}^2 / 2$ – скоростной напор; ρ – плотность воздуха, зависящая от высоты полета; $V_{\text{возд}}$ – величина воздушной скорости; S – характерная площадь УАБ; c_x, c_y, c_z – безразмерные аэродинамические коэффициенты, получаемые в результате испытаний изделия в аэродинамической трубе и аппроксимируемые в соответствии с моделью:

$$\begin{cases} c_x = c_x(\alpha) + c_x^{\delta_B}(\alpha) \delta_B; \\ c_y = c_y(\alpha) + c_y^{\delta_B}(\alpha) \delta_B; \\ c_z = c_z^{\beta}(\alpha) \beta + c_z^{\delta_H}(\alpha) \delta_H. \end{cases} \quad (10)$$

где α и β – углы атаки и скольжения УАБ, δ_B, δ_H – величины, характеризующие управляющее воздействие отклонения руля высоты и руля

направления соответственно, \bar{w}_f – трехмерный вектор взаимно некоррелированных белых шумов, интенсивность которых определяется степенью неточности модели (10).

Таким образом,

$$\bar{F}^{ENU} = C\bar{F}^{xyz}(\rho, V_{возд}, \alpha, \beta, \delta_B, \delta_H, w_{f_x}, w_{f_y}, w_{f_z}). \quad (11)$$

Аэродинамический момент сил, определяющий вращательное движение УАБ, в проекциях на оси связанной СК имеет представление, аналогичное (9):

$$\bar{m}^{xyz} = qSl \text{diag}(1, 1, 1)[m_x; m_y; m_z] + \bar{w}_m, \quad (12)$$

где l – длина корпуса УАБ; m_x, m_y, m_z – безразмерные коэффициенты аэродинамических моментов, аппроксимируемые в соответствии с моделью:

$$\begin{cases} m_x = m_x(\alpha, \beta) + m_x^{\bar{\omega}_x}(\alpha)\bar{\omega}_x + m_x^{\bar{\omega}_y}(\alpha)\bar{\omega}_y + \\ + m_x^{\bar{\beta}}(\alpha)\bar{\beta} + m_x^{\delta_\Delta}(\alpha)\delta_\Delta + m_x^{\delta_H}(\alpha)\delta_H; \\ m_y = m_y(\alpha, \beta) + m_y^{\bar{\omega}_x}(\alpha)\bar{\omega}_x + m_y^{\bar{\omega}_y}(\alpha)\bar{\omega}_y + \\ + m_y^{\bar{\beta}}(\alpha)\bar{\beta} + m_y^{\delta_\Delta}(\alpha)\delta_\Delta + m_y^{\delta_H}(\alpha)\delta_H; \\ m_z = m_z(\alpha) + m_z^{\bar{\omega}_z}(\alpha)\bar{\omega}_z + m_z^{\bar{\alpha}}(\alpha)\bar{\alpha} + \\ + m_z^{\delta_B}(\alpha)\delta_B. \end{cases} \quad (13)$$

где δ_Δ – управляющее воздействие в виде отклонения элеронов; \bar{w}_m – трехмерный вектор взаимно некоррелированных белых шумов, интенсивность которых определяется степенью неточности (13); чертой обозначены безразмерные угловые скорости:

$$\begin{cases} \bar{\omega}_x = l\omega_x / (2V_{возд}); \\ \bar{\omega}_y = l\omega_y / (2V_{возд}); \\ \bar{\omega}_z = l\omega_z / (2V_{возд}); \\ \bar{\alpha} = l\dot{\alpha} / V_{возд}; \\ \bar{\beta} = l\dot{\beta} / V_{возд}. \end{cases} \quad (14)$$

Таким образом,

$$\bar{m}^{xyz} = \bar{m}^{xyz}(\alpha, \beta, \dot{\alpha}, \dot{\beta}, \omega_x, \omega_y, \omega_z, \delta_\Delta, \delta_B, \delta_H, w_{m_x}, w_{m_y}, w_{m_z}). \quad (15)$$

Параметры движения УАБ относительно воздушных масс – воздушная скорость $V_{возд}$, а также углы атаки и скольжения α и β – могут определяться по проекциям вектора воздушной скорости на оси связанной СК:

$$\begin{cases} \bar{V}_{возд}^{xyz} = C(\bar{W}^{ENU} - \bar{U}^{ENU}); \\ V_{возд} = \sqrt{V_{возд_x}^2 + V_{возд_y}^2 + V_{возд_z}^2}; \\ \alpha = \arctg(V_{возд_y} / V_{возд_x}); \\ \beta = \arctg(V_{возд_z} / \sqrt{V_{возд_x}^2 + V_{возд_y}^2}). \end{cases} \quad (16)$$

Скорость нарастания аэродинамических углов может быть определена дифференцированием выражений (16):

$$\begin{cases} \dot{\alpha} = \frac{-\dot{V}_{возд_x} V_{возд_y} + \dot{V}_{возд_y} V_{возд_x}}{V_{возд_x}^2 + V_{возд_y}^2}; \\ \dot{\beta} = \frac{-\dot{V}_{возд_x} V_{возд_z} V_{возд_y}}{(V_{возд_x}^2 + V_{возд_y}^2 + V_{возд_z}^2) \sqrt{V_{возд_x}^2 + V_{возд_y}^2}} - \\ + \frac{\dot{V}_{возд_y} V_{возд_z} V_{возд_x}}{(V_{возд_x}^2 + V_{возд_y}^2 + V_{возд_z}^2) \sqrt{V_{возд_x}^2 + V_{возд_y}^2}} + \\ + \frac{\dot{V}_{возд_z} (V_{возд_x}^2 + V_{возд_y}^2)}{(V_{возд_x}^2 + V_{возд_y}^2 + V_{возд_z}^2) \sqrt{V_{возд_x}^2 + V_{возд_y}^2}}. \end{cases} \quad (17)$$

где

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{возд_x} \\ \dot{V}_{возд_y} \\ \dot{V}_{возд_z} \end{bmatrix} = \bar{V}_{возд}^{xyz} = -[\bar{\omega}_{xyz}^{ENU} \times] C \times \\ \times (\bar{W}^{ENU} - \bar{U}^{ENU}) + C(\bar{W}^{ENU} - \bar{U}^{ENU}). \quad (18)$$

Ветровое возмущение будем описывать как марковский процесс:

$$\begin{aligned} \bar{U}^{ENU} &= -\tau_U^{-1} \bar{U}^{ENU} + \\ &+ \text{diag}(\sigma_{U_E}, \sigma_{U_N}, \sigma_{U_U}) \sqrt{2/\tau_U} \bar{w}_U, \end{aligned} \quad (19)$$

где $\sigma_{U...}$ – среднеквадратическое значение составляющей скорости ветра в соответствующем направлении; τ_U – период корреляции ветрового возмущения; \bar{w}_U – трехмерный вектор взаимно некоррелированных белых шумов единичной интенсивности.

Считаем, что измерение гироскопов и акселерометров искажено смещением нулей, ошибками масштабных коэффициентов и ориентации измерительных осей, а также имеет белую шумную составляющую:

$$\bar{s}_{измер} = \begin{pmatrix} 1 + \kappa_{s_x} & \epsilon_{s_{xy}} & \epsilon_{s_{xz}} \\ \epsilon_{s_{yx}} & 1 + \kappa_{s_y} & \epsilon_{s_{yz}} \\ \epsilon_{s_{zx}} & \epsilon_{s_{zy}} & 1 + \kappa_{s_z} \end{pmatrix} \bar{s} + \Delta \bar{s} + \bar{w}_s. \quad (20)$$

Здесь \bar{s} и s заменяют индексы $\bar{\omega}^{xyz}$ и ω для гироскопов, $\bar{\alpha}^{xyz}$ и a для акселерометров, $\bar{w}_...$ – трехмерные белые шумы. При этом все составляющие инструментальных погрешностей будем считать марковскими:

$$\bar{X}_{Err} = -\tau_{Err}^{-1} \bar{X}_{Err} + \sigma_{Err} 2/\tau_{Err} \bar{w}_{Err}. \quad (21)$$

Здесь Err заменяет необходимые индексы $\Delta \bar{\omega}^{xyz}$, $\Delta \bar{\alpha}^{xyz}$, $\bar{\kappa}_\omega$, $\bar{\kappa}_\alpha$ ($\bar{w}_...$ – трехмерные векторы взаимно некоррелированных белых шумов единичной интенсивности), $\bar{\epsilon}_\omega$, $\bar{\epsilon}_\alpha$ ($\bar{w}_...$ – шестимерные векторы взаимно некоррелированных белых шумов единичной интенсивности).

Особенность измерения ускорения состоит в том, что собственно ускорение в вектор состояния не входит. Однако, в соответствии с (9), (10) величина ускорения связана с параметрами движения УАБ относительно воздушных масс и с управлением. Поэтому для сигналов акселерометров в (20), с учетом (10), подставляем выражение:

$$\bar{\alpha}^{xyz} = 1/M \cdot qS [c_x; c_y; c_x]. \quad (22)$$

3. Вектор состояния

в задаче обработки информации

Вектор состояния в задаче синтеза инвариантного алгоритма для БИНС современной УАБ представим в виде набора векторных компонент, в числе которых:

- вектор $\bar{X}_{\lambda\phi h} = [\lambda; \phi; h]$, включающий географические координаты УАБ;
- вектор $\bar{X}_{\psi\omega\gamma} = [\psi; \omega; \gamma]$ параметров угловой ориентации УАБ;
- вектор $\bar{X}_{\bar{W}ENU} = [W_E; W_N; W_U]$ земной скорости УАБ;
- вектор $\bar{X}_{\bar{\omega}xyz} = [\omega_x; \omega_y; \omega_z]$ скорости углового движения УАБ относительно инерциальной системы координат;
- вектор $\bar{X}_{\bar{U}ENU} = [U_E; U_N; U_U]$ скорости ветра, характеризующий возмущающее воздействие на УАБ;

- векторы, описывающие погрешности гироскопов и акселерометров: смещение сигнала $\bar{X}_{\Delta\omega^{xyz}} = [\Delta\omega_x; \Delta\omega_y; \Delta\omega_z]$ и $\bar{X}_{\Delta\alpha^{xyz}} = [\Delta\alpha_x; \Delta\alpha_y; \Delta\alpha_z]$, ошибки масштабных коэффициентов $\bar{X}_{\bar{\kappa}_\omega} = [\kappa_{\omega_x}; \kappa_{\omega_y}; \kappa_{\omega_z}]$ и $\bar{X}_{\bar{\kappa}_\alpha} = [\kappa_{\alpha_x}; \kappa_{\alpha_y}; \kappa_{\alpha_z}]$, ориентации измерительных осей $\bar{X}_{\bar{\varepsilon}_\omega} = [\varepsilon_{\omega_{xy}}; \varepsilon_{\omega_{xz}}; \varepsilon_{\omega_{yx}}; \varepsilon_{\omega_{yz}}; \varepsilon_{\omega_{zx}}; \varepsilon_{\omega_{zy}}]$, $\bar{X}_{\bar{\varepsilon}_\alpha} = [\varepsilon_{\alpha_{xy}}; \varepsilon_{\alpha_{xz}}; \varepsilon_{\alpha_{yx}}; \varepsilon_{\alpha_{yz}}; \varepsilon_{\alpha_{zx}}; \varepsilon_{\alpha_{zy}}]$.

Таким образом, имеем 39-мерный вектор состояния:

$$\bar{X} = \left(\bar{X}_{\lambda\phi h}^T; \bar{X}_{\psi\omega\gamma}^T; \bar{X}_{\bar{W}ENU}^T; \bar{X}_{\bar{\omega}xyz}^T; \bar{X}_{\bar{U}ENU}^T; \bar{X}_{\Delta\omega^{xyz}}^T; \bar{X}_{\Delta\alpha^{xyz}}^T; \bar{X}_{\bar{\kappa}_\omega}^T; \bar{X}_{\bar{\kappa}_\alpha}^T; \bar{X}_{\bar{\varepsilon}_\omega}^T; \bar{X}_{\bar{\varepsilon}_\alpha}^T \right). \quad (23)$$

Вектор состояния (23) определяет погрешности БИНС и не поддается непосредственному измерению. Однако имеется косвенная возможность его наблюдения при получении информации от спутникового приемника. Считая его измерения достаточно точными, предполагаем, что разница между параметрами, измеренными приемником и вычисленными БИНС определяет погрешности инерциальной системы.

Далее синтезируем оптимальный дискретный фильтр Калмана, на выходе которого получаем оценку вектора состояния \hat{X} [6]. На основании оценки вектора состояния \hat{X} осуществляется коррекция выходных параметров БИНС. Следует подчеркнуть, что коррекции подвергаются только выходные параметры, поступающие потребителям.

Заключение

С переносом акцентов при построении БИНС в сторону более дешевых датчиков образуется ситуация, когда погрешности инерциального измерителя становятся сопоставимыми с достижимой точностью описания динамических свойств объекта навигации. Эффективным путем оптимизации алгоритмов инерциальной системы становится учет динамики объекта [3, 4].

В ходе работы на основе калмановской фильтрации необходимо разработать алгоритм обработки сигналов акселерометров и гироскопов для оценки навигационных параметров УАБ.

Для оценки возможностей по повышению точности выходных параметров БИНС необходимо провести численное исследование.

В целях сопоставительной оценки точности алгоритмов, получаемых при инвариантном и неинвариантном подходах необходимо выполнить решение соответствующих уравнений для дисперсионных матриц вектора состояния.

Литература

1. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / под ред. М. Н. Красильщикова, Г. Г. Себрякова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 279 с.
2. Плаксин, П. Л. Построение системы навигации авиационной бомбы с коррекцией ее движения от орбитальных спутников Земли / П. Л. Плаксин // Авиакосмическое приборостроение. – 2006. – № 9. – С. 34–48.
3. Федоскин, О. И. Неинвариантные алгоритмы обработки информации для БИНС летательного аппарата / О. И. Федоскин // Гироскопия и навигация. – 2003. – № 4. – С. 15–28.
4. Дмитриев, С. П. Неинвариантные алгоритмы обработки информации инерциальных навигационных систем / С. П. Дмитриев, О. А. Степанов // Гироскопия и навигация. – 2000. – № 1. – С. 12–23.
5. Бабич, О. А. Обработка информации в навигационных комплексах / О. А. Бабич. – М.: Машиностроение, 1991. – 512 с.
6. Ривкин, С. С. Статическая оптимизация навигационных систем / С. С. Ривкин, Р. И. Ивановский, А. В. Костров. – Л.: Судостроение, 1976. – 280 с.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ БЮДЖЕТА ПРОДАЖ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦЕНОВОЙ ДИВЕРСИФИКАЦИИ

А.В. Панюков, А.Т. Латипова

В настоящее время в России повсеместно внедряются международные стандарты финансовой отчетности и учета (МСФО). Правительство России со своей стороны предпринимает различные меры для ускорения этого процесса, так как это является необходимым условием для привлечения иностранного капитала.

Важнейшей частью МСФО является бюджетирование – процесс разработки и формирования плановых бюджетов, объединяющих планы руководства предприятий и в первую очередь производственные, маркетинговые и финансовые планы.

Сущность бюджетирования заключается в составлении специальных отчетных форм – бюджетов. Согласно современным концепциям развития бизнеса большое внимание должно уделяться спросу. Следовательно, планирование деятельности предприятия должно основываться на данных о спросе, поэтому среди методик бюджетирования наиболее популярной является нормативный подход. Нормативный подход базируется на бюджете продаж, т.е. данных об объемах и ценах продажи на различные виды продукции предприятия; а все остальные бюджеты рассчитываются на основе бюджета продаж и различных норм. Данный подход позволяет прогнозировать практически все аспекты детальности фирмы.

Решение проблемы обоснованности бюджета продаж, адекватная математическую модель его оптимизации и соответствующие алгоритмы представлены в работах [1–6]. В данной статье предложена архитектура системы оптимизации бюджетирования с использованием ценовой диверсификации. Приведено описание и функции отдельных блоков системы, рассмотрены связи между ними. Очерчены перспективы развития системы и возможности интеграции с существующими.

1. Общие требования к программному обеспечению системы оптимизации бюджета

Очевидно, что результаты, полученные в ходе оптимизации ценовой стратегии, имеют рекомендательный характер, поэтому соответствующее программное обеспечение должно иметь механизм импорта/экспорта информации с используемой корпоративной системой. В настоящее время наиболее распространенными форматами файлов для импорта–экспорта являются таблицы MS Excel и xml-файлы. Разработанный модуль должен иметь дружественный интерфейс и формировать отчеты с интерпретацией полученных результатов, так как модуль предназначен для пользователей–

менеджеров. Модуль может применяться на различных уровнях управления, поэтому он должен быть тиражируемым и прост в установке.

2. Анализ функциональных требований

Проектирование прикладной программной системы начинается с анализа требований, которым она должна будет удовлетворять. Такой анализ проводится с целью понять назначение и условия эксплуатации системы настолько, чтобы суметь составить ее предварительный проект.

Требования – это описание необходимых и желаемых свойств программного продукта. Требования определяют, что должно быть сделано, что будет проектироваться, и что должно быть протестировано. Изменения в требованиях, как правило, затрагивают практически все элементы, являющиеся результатами процесса разработки. Значит, точная модель требований важна именно потому, что она соединяет вместе все остальные элементы проекта.

Проведем анализ функциональных требований к разрабатываемой системе, с помощью выделения основных целей и задач создания системы, ограничения круга потребителей и формулировки функций, реализуемых ею, и перечисления ее атрибутов.

2.1. Цели и задачи

Главной задачей проекта является создание модуля оптимизации ценовой стратегии с возможностью импорта–экспорта данных и формирования отчетов в формате Excel и xml.

Потребителями информации будут финансовые менеджеры, руководители маркетинговых служб и других подразделений, занимающихся бюджетированием.

Основная цель разработки системы – это создание системы оптимизации бюджетирования, предназначенной для определения эффективной интенсивности применения ценовой стратегии и оценки внутренней рентабельности для бюджета продаж. Вторичными целями разработки являются:

1. Повышение уровня автоматизации сбора данных для бюджетирования.
2. Предоставление доступа пользователям как к оперативной информации о бюджетах, так и к архивной.
3. Оценка продуктивности бюджетов.
4. Ведение баз данных о проектах бюджетов.

2.2. Функции системы

Функции системы – это ее основное назначение. Функции должны быть точно определены и

систематизированы в смысловые группы. Кроме групп функции делятся на следующие категории:

- очевидные – их выполнение очевидно для пользователя;
- скрытые – необходимы, но пользователю не видны;
- дополнительные – необязательны.

В результате проведенного анализа предметной области был сформирован следующий список необходимых функций системы (по умолчанию функция является скрытой), сгруппированных по смысловому назначению.

1. Оптимизация ценовой стратегии.

1.1. Импорт данных о проекте бюджетирования в базу данных из файлов в формате Excel и xml.

1.2. Оптимизация ценовой стратегии и расчет параметров продуктивности.

1.3. Сохранение результатов оптимизации и расчетов в подсистеме хранения данных.

1.4. При поступлении новых данных обновление соответствующей информации и перерасчет с учетом новых данных.

2. Хранение результатов оптимизации.

2.1. Хранение исходных данных для каждого проекта бюджетов в базе данных.

2.2. Хранение результатов оптимизации и анализа продуктивности.

2.3. Резервное копирование базы данных на съемные носители (дополнительная).

2.4. Проведение работ по переиндексации и контролю целостности базы данных (дополнительная).

3. Предоставление пользователю информации о проектах бюджетирования.

3.1. Определение прав пользователя на доступ к необходимой информации (очевидная).

3.2. Получение от пользователя критериев для выборки данных (очевидная).

3.3. Запрос к подсистеме хранения данных в соответствии с критериями пользователя.

3.4. Получение результатов запроса от подсистемы хранения данных.

3.5. Запрос расчета к подсистеме оптимизации и анализа продуктивности.

3.6. Предоставление результатов работы пользователю (очевидная).

4. Тестирование и поддержание работоспособности системы (дополнительная).

4.1. Проверка составляющих частей системы по требованию администратора системы.

4.2. Настройка конфигурации системы.

4.3. Запуск и остановка работы системы.

5. Импорт–экспорт в формате Excel и xml

5.1. Импорт данных в формате Excel: настройка импорта и загрузка данных.

5.2. Импорт данных в формате xml: настройка импорта и загрузка данных.

5.3. Экспорт данных в формате Excel: настройка экспорта и выгрузка данных.

5.4. Экспорт данных в формате xml: настройка экспорта и выгрузка данных.

2.3. Атрибуты системы

Атрибуты системы – это ее нефункциональные характеристики, описанные набором значений и налагаемых ограничений, в том числе и нечетких. Атрибуты системы описываются в связи с функциями и делятся в зависимости от значимости для работоспособности системы на две категории: обязательные и желательные. Атрибуты могут относиться к какой-либо конкретной функции системы или ко всем одновременно, поэтому удобно описывать атрибуты явно связанными с соответствующими им функциями. Результаты сопоставления необходимых атрибутов системы оптимизации бюджета продаж с набором ее функций приведены в табл. 1.

2.4. Словарь предметной области

В процессе разработки программной системы чрезвычайно важной оказывается согласованная трактовка терминов, применяемых для описания объектов процесса разработки, особенно, когда в него вовлечена большая группа специалистов. Для поддержания такой согласованности обычно используется словарь терминов предметной области. В этом словаре определяются и содержатся все требуемые термины, которые повышают степень понимания предметной области и исключают риск возникновения разногласий при ее обсуждении.

В процессе создания разрабатываемой системы был составлен следующий словарь терминов.

Администратор – лицо, имеющее полномочия на конфигурирование, старт–останов, и проверку работоспособности системы.

Архив проектов – информация базы данных о проектах бюджетов.

База данных (БД) – файл с данными о проектах бюджетов.

Блок оптимизации – основной модуль программы, используется для расчета оптимальных ценовых стратегий и анализа продуктивности.

Блок управления – блок, используемый администратором системы и предназначенный для конфигурирования и других управляющих функций.

Журнал работы системы – хранит сообщения об обнаруженных ошибках, записи о включение/выключении и т.п.

Запрос пользователя – запрос от пользователя к системе управления БД для получения данных о проектах бюджетов или расчета оптимизации ценовой стратегии и анализа продуктивности.

Интерфейс пользователя – программа визуализации, представления полученных результатов в виде отчетов для конечного пользователя.

Модуль импорта–экспорта – программа, реализующая механизм загрузки данных из Excel и xml файлов в базу данных (БД) и выгрузку полученных результатов в Excel и xml файлы для последующей закички в корпоративную систему.

Пользователь архивной информации – пользователь системы, получающий данные о проектах бюджетирования из архива в соответствии с заданными им ограничениями по времени и другими параметрами.

Пользователь оперативной информации – пользователь системы, получающий от системы информацию о текущем проекте бюджетирования и результатов оптимизации.

Права пользователя – набор разрешенных пользователю действий.

Результаты работы программы – вычисленные оптимальные интенсивности ценовых стратегий, нормы рентабельности и параметры продуктивности.

СУБД – система управления базой данных, осуществляющая контроль и поддержание целостности базы данных, а также резервное копирование.

Съемные носители – носители информации, предназначенные для хранения резервной копии базы данных.

3. Анализ предметной области

Дальнейший анализ составленных требований к системе проводится с помощью построения таблицы вариантов использования, которая иллюстрирует набор исполнителей и вариантов использования системы, а также взаимосвязи между ними. Назначение таблицы – представить некоторую структуру, позволяющую быстро определить набор внешних исполнителей и ключевые методы их использования.

3.1. Исполнители системы

Исполнитель (Актёр) системы является внешним по отношению к системе понятием, которой каким-либо образом взаимодействует с системой. Обычно с помощью каких-то действий исполнитель стимулирует систему к выполнению определенной работы и получает от нее некоторую информацию. В разрабатываемом модуле оптимизации ценовой стратегии можно выделить следующих исполнителей.

- Пользователь текущей информации.

Это пользователь, получающий от системы информацию о текущем проекте бюджетирования. Обладает основными навыками работы в ОС Windows и финансового планирования. Пользователями текущей информации могут быть менеджеры различного уровня управления.

- Пользователь архивной информации.

Это пользователь, получающий архивную информацию о предыдущих проектах бюджетирования. Основная обязанность данного пользователя – проводить ретроспективный анализ и делать соответствующие выводы. К данной группе пользователей можно отнести менеджеров и программистов.

- Администратор.

Это лицо, имеющее полномочия на конфигурирование системы. Администратор осуществляет начальное и текущее конфигурирование системы

(настройка прав пользователей, параметров импорта–экспорта и других параметров системы). Обладает знаниями в области администрирования операционных и программных систем. В частности, администратор должен обладать навыками в области конфигурирования КИС своего предприятия (настройки отчетов для выгрузки и операций загрузки) и работы с xml-документами.

- Модуль оптимизации ценовой стратегии (МОЦС).

МОЦС – это программный комплекс, позволяющий рассчитывать оптимальную структуру интенсивностей и параметры продуктивности для заданного проекта бюджетирования. Неотъемлемой частью МОЦС является блок оптимизации. Тем не менее, его функционирование невозможно без блока загрузки–выгрузки, обеспечивающего блок оптимизации входными данными и позволяющего выгружать выходные данные в КИС (корпоративные информационные системы). Т.е. блок загрузки–выгрузки связывает блок оптимизации с внешней средой.

3.2. Варианты использования системы

Вариант использования (Use Case или прецедент) – это описание последовательности действий, которые может осуществлять система в ответ на внешние воздействия пользователей или других программных систем.

Во время анализа и проектирования варианты использования позволяют понять как результаты, которые хочет получить пользователь, влияют на архитектуру системы и как должны себя вести компоненты системы, для того чтобы реализовать нужную для пользователя функциональность. Каждый вариант использования показывает, как конкретный актер использует систему и в дальнейшем расширяется диаграммами состояний и последовательности действий. Цель варианта использования заключается в том, чтобы определить законченный аспект или фрагмент поведения некоторой сущности без раскрытия внутренней структуры этой сущности.

Разработанные варианты использования высокого уровня (т.е. с низкой степенью детализации) приведены в табл. 2–4. Все разработанные варианты использования ранжируются по их приоритету и важности для достижения целей разработки:

- основные (главные) – представляют собой процессы необходимые для функционирования системы;
- второстепенные – представляют собой менее значительные или более редкие процессы;
- дополнительные – представляют собой процессы, которые могут быть не реализованы в системе.

Заключение

Представленные в работе требования к программному обеспечению, разработанные авторами

Таблица 1

Атрибуты системы			
№	Функция	Атрибут	Категория
1	Общее	Интуитивно-понятный интерфейс: основными пользователями системы являются финансовые менеджеры с относительно небольшими знаниями в области программирования и информационных систем	обязательная
2	Стиль интерфейса: графический, цветной, основанный на формах клиентского приложения. Отчетные формы формируются в формате Excel и xml. Возможность настройки форматов вывода.	Интегрируемость: должен быть предусмотрен механизм импорта данных из файлов в формате Excel и xml, формируемых корпоративными системами, а также реализован метод экспорта из МОЦС в Excel- и xml-файлы для последующей загрузки результатов в корпоративные системы	обязательная
3	Резервное копирование базы данных на съемные носители	Восстановление: резервное копирование и восстановление должно быть автоматизировано (разработан интерфейс страхового копирования/восстановления), информация о характеристиках резервной копии должна храниться в специальном файле вместе с копией.	желательная
4	Проведение работ по переиндексации и контролю целостности базы данных	Непрерывность работы: технологические, настроечные и тестовые работы не должны прерывать работу системы. Интерфейс: пользователь должен получать перед расчетом предупреждения о некорректности данных и способах устранения этих ошибок.	желательная
5	Предоставление пользователю информации о расчетах	Стиль интерфейса: графический, цветной, основанный на формах клиентского приложения. Отчетные формы формируются в формате Excel и xml. Возможность настройки форматов вывода.	желательная

Таблица 2

Прецедент «Получение текущей информации»

Исполнители	Пользователь текущей информации
Цель	Получение пользователем информации о текущем проекте бюджетирования
Описание	Регистрация. Формирование отчетов о текущем проекте бюджетирования.
Тип	Главный
Функции	3.1–3.6
Поток событий	Поток событий инициализируется пользователем текущей информации. Прецедент запускается, при запуске программы. Пользователь регистрируется, при этом программа проверяет права пользователя на доступ. В случае успешной проверки пользователь получает необходимую информацию. Передача информации прекращается по запросу пользователя или при возникновении ошибки передачи данных.

Таблица 3

Прецедент «Импорт данных»

Исполнители	Пользователи текущей и архивной информации, администратор
Цель	Импорт входных данных
Краткое описание	Зарегистрированный пользователь импортирует данные с помощью блока загрузки-выгрузки
Тип	Главный
Функции	5.1–5.2
Поток событий	Пользователь настраивает импорт входных данных. Если импорт входных данных настроен или используется импорт по умолчанию, пользователь указывает программе расположение файлов в формате Excel или xml. Блок загрузки-выгрузки обрабатывает данные файла для импорта. Информация о текущем состоянии импорта записывается в лог-файл (включая данные об ошибках). В конце пользователю выдается сообщение о количестве принятых записей.

Прецедент «Экспорт данных»

Исполнители	Пользователь текущей и архивной информации, администратор
Цель	Экспорт входных данных
Краткое описание	Зарегистрированный пользователь экспортирует данные с помощью блока загрузки-выгрузки
Тип	Главный
Функции	5.3–5.4
Поток событий	Пользователь настраивает параметры экспорта выходных данных. Если экспорт входных данных настроен или используется экспорт по умолчанию, пользователь указывает программе будущее расположение файлов в формате Excel или xml. Блок загрузки-выгрузки запрашивает из БД информацию для экспорта и в соответствии с настроенным форматом экспортирует данные в файлы Excel или xml. Информация о текущем состоянии экспорта записывается в лог-файл (включая данные об ошибках). В конце пользователю выдается сообщение о выгруженных записях.

численные методы и алгоритмы реализованы в комплексе программ [7], который позволяет:

- вести базу данных проекта бюджетирования с обеспечением её целостности;
- обеспечивать связь (импорт–экспорт данных) с внешними программами в частности с программами Microsoft Office и парсерами XML;
- находить оптимальные параметры проекта бюджетирования;
- формировать отчетные формы с интерпретацией результатов.

Литература

1. Латипова, А. Т. Оптимизация бюджета продаж / А. Т. Латипова, А. В. Панюков // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Рынок: Теория и практика»*. – 2006. – Вып. 4, № 15(170). – С. 116–120.

2. Латипова, А. Т. Анализ проблемы продуктивности модели бюджетирования / А. Т. Латипова // *Проблемы теоретической и прикладной математики: Труды 38-й Региональной молодежной конференции*. – Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – С. 335–339.

3. Латипова, А. Т. Оптимизация бюджета продаж в условиях ценовой диверсификации / А. Т. Латипова, А. В. Панюков, под ред. д.э.н.

проф. А. В. Бабкина // *Управление изменениями и инновации в экономических системах: Межвуз. сб. науч. тр.* – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – С. 647–654.

4. Латипова, А. Т. Ценовая диверсификация в бюджетировании / А. Т. Латипова // *Экономика и менеджмент: проблемы и перспективы: Труды Международной научно-практической конференции, 6–11 июня 2005*. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. – С. 562–566.

5. Латипова, А. Т. Модель оптимизации бюджетирования для предприятий минерально-сырьевого комплекса / А. Т. Латипова // *Стратегия развития минерально-сырьевого комплекса в XXI веке. Материалы международной конференции, Москва–Бишкек*. – М.: РУДН, 2004. – С. 206–208.

6. Латипова, А. Т. Модель оптимизации ценовой стратегии для задач бюджетирования / А. Т. Латипова // *Дискретный анализ и исследование операций. Материалы конференции, Новосибирск, 28 июня – 2 июля 2004*. – Новосибирск: Изд-во ин-та математики, 2004. – С. 206.

7. Свидетельство РосАПО № 2007612433 «Программа оптимизации бюджета продаж при ценовой диверсификации» / А. Т. Латипова, А. В. Панюков.

АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕДУРЫ КАЛИБРОВКИ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

М.А. Щипицына

В работе [1] выполнено математическое описание для процедуры калибровки инерциальной навигационной системы (ИНС) на движущемся объекте относительно вращающейся Земли. Следуя методу этой работы и использованным в ней обозначениям, но принимая основное допущение о том, что ИНС-А и ИНС-В функционально можно разделить на три подсистемы, каждая из которых представляет собой одноосную стабилизированную в инерциальном пространстве площадку и установленные на этой площадке два взаимно ортогональных акселерометра, расположенных в плоскости, перпендикулярной оси площадки, найдем решение задачи для одной такой подсистемы, т.е. частной задачи. Изменяя ориентацию оси площадки путем циклической перестановки, получим решение общей задачи для платформенных ИНС-А, ИНС-В.

1. Постановка задач

Платформенные эталонная ИНС-А и калибруемая ИНС-В установлены на объекте так, что начала связанных с ними системы координат (СК) совпадают с заданными точками O_A, O_B объекта (рис. 1).

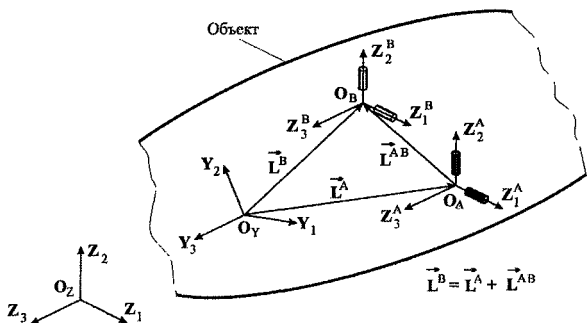


Рис. 1. Расположение на объекте ИНС-А и ИНС-В

Модели погрешностей площадки и акселерометров ИНС-В имеют вид:

$$\Delta \dot{Q} = P_0^Q + P_1^Q a_1^B + P_2^Q a_2^B; \quad (1)$$

$$\Delta A_i = P_{i0}^A + P_{i1}^A a_1^B + P_{i2}^A a_2^B, \quad (2)$$

где a_i^B – проекции вектора кажущегося ускорения в СК Z^B связанной с площадкой ИНС-В; $P_j^Q, P_{ij}^A, i = 1, 2; j = \overline{0, 2}$ – подлежащие определению калибровочные коэффициенты (КК), являющиеся постоянными.

Движение объекта в плоскости $O_Z Z_1 Z_2$, связанной с Землей СК, задано функциями:

$$q(t) = \alpha^Q \sin \omega t, \quad t \in [t_0, T]; \quad (3)$$

$$W_i(t) = \alpha_{i2} t^2 + \alpha_{i1} t, \quad i = 1, 2; \quad t \in [t_0, T], \quad (4)$$

где q – угол поворота вокруг оси Z_3 , перпендикулярной плоскости движения, W_i – проекции вектора ускорения точки O_Y – объекта на оси СК Z .

Задача заключается в разработке:

- имитационной модели (ИМ) для процедуры определения КК площадки и акселерометров ИНС-В и составлении алгоритма функционирования этой ИМ;
- алгоритма определения КК для ИНС-В на основе заданной априорной информации о величине гравитационного ускорения, измерений: сигналов датчиков углов ИНС-А $Q^A \equiv q$, ИНС-В Q^B , сигналов акселерометров ИНС-А $A_i^A \equiv a_i$, сигналов акселерометров ИНС-В A_i^B .

Поставленные задачи будем решать при допущениях:

- не учитываем вращение Земли;
- гравитационное поле в объеме объекта является одинаковым во всех его точках.

2. Математическое описание для решения поставленных задач

Модель погрешности площадки (1) представляет собой дрейф (уход) площадки от идеальной стабилизации в горизонтальной плоскости, определяемой площадкой ИНС-А, а поэтому на основе ΔQ необходимо определить $\Delta \dot{Q}$. А так как количество неизвестных КК площадки ИНС-В равно трем, то нужно иметь величины $\Delta \dot{Q}$, определенные для трех разных моментов времени, и для определения КК площадки следует использовать систему уравнений

$$\begin{cases} P_0^Q + P_1^Q a_1^B + P_2^Q a_2^B = \Delta \dot{Q}_1; \\ P_0^Q + P_1^Q a_1^B + P_2^Q a_2^B = \Delta \dot{Q}_2; \\ P_0^Q + P_1^Q a_1^B + P_2^Q a_2^B = \Delta \dot{Q}_3. \end{cases} \quad (5)$$

В рассматриваемой задаче принято $\Delta Q = (\sin Q^B - \sin q) / \cos q$, где $q = Q^A$.

Найдем решение системы (19) в виде:

$$P_j^Q = D_j^Q / D^Q, \quad j = \overline{0, 2}, \quad (6)$$

где D^Q – определитель системы; D_j^Q – определитель, получаемый из D^Q заменой элементов j -го столбца свободными членами системы.

Для решения задачи по определению КК акселерометров ИНС-В в качестве исходной информации используем известные векторные равенства, выражающие зависимости векторов ускорений точек O_A, O_B твердого тела от ускорения точки O_Y этого тела (в нашем случае – объекта):

$$\vec{W}^A = \vec{W} + \vec{\varepsilon} \times \vec{L}^A + \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{L}^A), \quad (7)$$

$$\vec{W}^B = \vec{W} + \vec{\varepsilon} \times \vec{L}^B + \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{L}^B), \quad (8)$$

где \vec{W} – вектор ускорения точки O_Y объекта; $\vec{\Omega}, \vec{\varepsilon}$ – векторы угловой скорости и углового ускорения объекта соответственно; $\vec{L}^A = \vec{O}_Y O_A, \vec{L}^B = \vec{O}_Y O_B$ – радиус-векторы положения точек O_A, O_B относительно точки O_Y (рис. 1).

$$\vec{W}^A = \vec{A}^A + \vec{g}; \quad (9)$$

$$\vec{W}^B = \vec{A}^B + \vec{g}, \quad (10)$$

где, согласно допущению, \vec{g} – вектор гравитационного ускорения любой точки объекта; \vec{A}^A, \vec{A}^B – векторы кажущихся ускорений точек O_A, O_B объекта.

Обозначим символами \vec{W}^A, \vec{W}^B вектор \vec{W} , входящий соответственно в первое и второе полученные равенства, фиксируя этими обозначениями факт «определения» этого вектора на основе информации соответственно с ИНС-А, ИНС-В. Критерием неидеальности является вектор

$$\Delta \vec{W} = \vec{W}^B - \vec{W}^A. \quad (11)$$

С учетом (9), (10) перепишем (7), (8):

$$\vec{W}^A = \vec{A}^A + \vec{g} - \vec{\varepsilon} \times \vec{L}^A - \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{L}^A), \quad (12)$$

$$\vec{W}^B = \vec{A}^B + \vec{g} - \vec{\varepsilon} \times \vec{L}^B - \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{L}^B). \quad (13)$$

После записи векторных равенств (12), (13) в скалярной форме, получим ($i = 1, 2$):

$$\Delta W_i = \sum_{j=1}^2 H_{ij}^{AB} A_j^B - a_i - W_i^L = W_i^B - W_i^A, \quad (14)$$

где

$$W_i^L = L_1^{AB} (H_{i2}^A \varepsilon - H_{i1}^A \Omega^2) - L_2^{AB} (H_{i2}^A \Omega^2 + H_{i1}^A \varepsilon), \quad (15)$$

L_i^A, L_i^B, g_i – заданные величины, Ω, ε – вычисляемые величины на основе измерений угла $Q^A = q$ датчиком угла ИНС-А путем дифференцирования по времени:

$$\Omega = \dot{q}; \quad (16)$$

$$\varepsilon = \ddot{q}. \quad (17)$$

На основе сравнения этих величин можно определить выражения для ΔA_j^B , после чего можно определить КК акселерометров ИНС-В.

Сигналы A_j^B акселерометров ИНС-В имеют

погрешности ΔA_j^B , что можно записать в виде:

$$A_j^B = a_j^B + \Delta A_j^B, \quad (18)$$

где a_j^B – точные значения проекции вектора кажущегося ускорения точки O_B объекта в СК Z^B , входящие в выражения моделей (1), (2).

Тогда из (14) получим:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^2 H_{ij}^{AB} \Delta A_j^B &= \\ &= a_i - \sum_{j=1}^2 H_{ij}^{AB} a_j^B + \Delta W_i + W_i^L, \quad i = 1, 2. \end{aligned} \quad (19)$$

Уравнения (19) запишем в виде:

$$\begin{cases} H_{11}^{AB} \Delta A_1^B + H_{12}^{AB} \Delta A_2^B = F_1; \\ H_{21}^{AB} \Delta A_1^B + H_{22}^{AB} \Delta A_2^B = F_2, \end{cases}$$

где $F_i = \Delta Q_i \cos q_i$.

Решив эту систему, найдем:

$$\begin{cases} \Delta A_1^B = H_{22}^{AB} F_1 - H_{12}^{AB} F_2; \\ \Delta A_2^B = H_{11}^{AB} F_2 - H_{21}^{AB} F_1, \end{cases} \quad (20)$$

где

$$F_i = a_i + \Delta W_i + W_i^L - (H_{i1}^{AB} a_1^B + H_{i2}^{AB} a_2^B), \quad i = 1, 2. \quad (21)$$

Имеет место векторное равенство:

$$\vec{a}^B = \vec{a}^A - \vec{\varepsilon} \times \vec{L}^{AB} - \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{L}^{AB}), \quad (22)$$

которое в скалярной форме есть:

$$a_i^B = \sum_{j=1}^2 H_{ji}^{AB} a_j^A + W_i^L, \quad i = 1, 2. \quad (23)$$

Таким образом, правые части уравнений (2) известны.

Найдем КК акселерометров ИНС-В, используя переобозначение:

$$\Delta A_i \equiv \Delta A_i^B, \quad i = 1, 2. \quad (24)$$

Используем уравнения (2), где величины ΔA_i определены для трех разных моментов времени $t_k, k = \overline{1, 3}$.

$$\begin{cases} P_{i0}^A + P_{i1}^A a_{11}^B + P_{i2}^A a_{21}^B = \Delta A_{i1}; \\ P_{i0}^A + P_{i1}^A a_{12}^B + P_{i2}^A a_{22}^B = \Delta A_{i2}; \\ P_{i0}^A + P_{i1}^A a_{13}^B + P_{i2}^A a_{23}^B = \Delta A_{i3}, \quad i = 1, 2. \end{cases} \quad (25)$$

Найдем решение систем (25) в виде:

$$P_{ij}^A = D_{ij}^A / D^A, \quad i = 1, 2, j = \overline{0, 2}. \quad (26)$$

где D^A – определитель системы; D_j^A – определитель, получаемый из D^A заменой элементов j -го столбца свободными членами системы.

3. К решению задачи разработки имитационной модели процедуры определения КК ИНС-В

Для решения задачи разработки ИМ определения КК необходимо задать:

- модели (имитаторы) измеренных величин: сигналов датчиков углов и сигналов акселерометров ИНС-А, ИНС-В;

- модели (имитаторы) определяемых КК площадки и акселерометров ИНС-В;

- критерии точности определения КК.

Модели сигналов датчика угла площадки и акселерометров ИНС-А зададим в виде:

$$\tilde{Q}^A \equiv q = \alpha^Q \sin \omega t; \quad (27)$$

$$a_i = \alpha_{i2} t^2 + \alpha_{i1} t - g_i, \quad i = 1, 2. \quad (28)$$

Для задания сигналов датчика угла площадки и акселерометров ИНС-В необходимо вначале задать соответствующие модели погрешностей дрейфа площадки

$$\Delta \tilde{Q}^B = \tilde{P}_0^Q + \tilde{P}_1^Q a_1^B + \tilde{P}_2^Q a_2^B, \quad (29)$$

где $\tilde{P}_j^Q, j = \overline{0, 2}$ – модели (имитаторы) КК площадки ИНС-В, и акселерометров:

$$\Delta \tilde{A}_i \equiv \Delta \tilde{A}_i^B = \tilde{P}_{i0}^A + \tilde{P}_{i1}^A a_1 + \tilde{P}_{i2}^A a_2, \quad i = 1, 2, \quad (30)$$

где $\tilde{P}_{ij}^A, i = 1, 2, j = \overline{0, 2}$ – модели (имитаторы) КК акселерометров ИНС-В.

Модель погрешности для угла площадки ИНС-В имеет вид:

$$\Delta \tilde{Q}^B = \Delta \tilde{Q}^B(t_0) + \int_{t_0}^t \Delta \tilde{Q}^B(t) dt, \quad (31)$$

а значит, модель сигнала датчика угла площадки ИНС-В:

$$Q^B = q + \Delta \tilde{Q}^B. \quad (32)$$

Имея (30), можно определить модели сигналов акселерометров ИНС-В

$$A_i^B = a_i^B + \Delta \tilde{A}_i, \quad i = \overline{1, 2}. \quad (33)$$

В качестве критериев точности определения КК введем величины относительных погрешностей КК:

$$S_j^Q = \left| P_j^Q - \tilde{P}_j^Q \right| / \tilde{P}_j^Q, \quad j = \overline{0, 2}; \quad (34)$$

$$S_{ij}^A = \left| P_{ij}^A - \tilde{P}_{ij}^A \right| / \tilde{P}_{ij}^A, \quad i = 1, 2, j = \overline{0, 2}, \quad (35)$$

где в качестве эталонных значений выступают заданные модели (имитаторы) КК: $\tilde{P}_j^Q, \tilde{P}_{ij}^A$.

Введем величины вида:

$$S^Q = \frac{1}{3} \sum_{j=0}^2 S_j^Q; \quad (36)$$

$$S^A = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=0}^2 S_{ij}^A, \quad (37)$$

представляющие собой средние арифметические величины относительных погрешностей всех КК площадки (S^Q) и относительных погрешностей всех КК акселерометров (S^A) и принимаемые в качестве обобщенных критериев точности алгоритма функционирования имитационной модели (ИМ) процедуры калибровки.

4. Решение задачи разработки алгоритма функционирования ИМ процедуры определения КК

Предполагаем, что:

- процедура калибровки ИНС-В начинается сразу после окончания процедуры выставки ИНС-В на основе информации с ИНС-А;

- в первую очередь осуществляется калибровка акселерометров ИНС-В, а затем – калибровка площадки ИНС-В;

- калибровка акселерометров осуществляется за малое время. В этом случае можно допустить, что в течение всего интервала времени калибровки акселерометров ориентация площадки ИНС-В совпадает с ориентацией площадки ИНС-А, а значит, в этом случае $\Delta Q = 0$.

Определим значения исходных параметров.

Значения моделей КК площадки ИНС-В зададим такими, чтобы выполнялись условия:

$$\left| \tilde{P}_0^Q + \tilde{P}_1^Q g + \tilde{P}_2^Q g \right| \leq \Delta \dot{Q}_*, \quad (38)$$

где $\Delta \dot{Q}_*$ – заданная модельная величина дрейфа (ухода) площадки ИНС В. Из (38):

$$\begin{cases} \tilde{P}_0^Q \cong 1/3 \Delta \dot{Q}_*, \quad (\text{с}^{-1}); \\ \tilde{P}_1^Q \cong 1/3 \cdot \Delta \dot{Q}_* / g, \quad (\text{с}/\text{м}); \\ \tilde{P}_2^Q \cong 1/3 \cdot \Delta \dot{Q}_* / g, \quad (\text{с}/\text{м}). \end{cases} \quad (39)$$

Значения моделей КК акселерометров ИНС-В зададим из условий

$$\left| \tilde{P}_{i0}^A + \tilde{P}_{i1}^A g + \tilde{P}_{i2}^A g \right| \leq \Delta A_*, \quad (40)$$

где ΔA_* – заданная модельная величина абсолютной погрешности измерения ускорения. Из (40)

$$\begin{cases} \tilde{P}_{i0}^A \cong 1/3 \Delta A_*, \quad (\text{м}/\text{с}^2); \\ \tilde{P}_{i1}^A \cong 1/3 \cdot \Delta A_* / g, \quad (\text{безразмерная}); \\ \tilde{P}_{i2}^A \cong 1/3 \cdot \Delta A_* / g, \quad (\text{безразмерная}). \end{cases} \quad (41)$$

В качестве исходных параметров о проекциях вектора кажущегося ускорения целесообразно иметь средние значения соответствующих проекций на интервалах времени $[0; t_2], [0; t_3]$, т.е. величины вида

$$a_{ik}^c = \frac{1}{t_k} \int_0^{t_k} a_i(t) dt, \quad i = 1, 2, \quad k = 2, 3. \quad (42)$$

Подставив (28) в (42), получим:

$$a_{ik}^c = \frac{1}{t_k} \int_0^{t_k} (\alpha_{i2} t^2 + \alpha_{i1} t - g_i) dt,$$

или

$$a_{ik}^c = 1/t_k \left(1/3 \alpha_{i2} t_k^3 + 1/2 \alpha_{i1} t_k^2 - g_i t_k \right),$$

или

$$a_{ik}^c = 1/3 \alpha_{i2} t_k^2 + 1/2 \alpha_{i1} t_k - g_i, \quad i = 1, 2, \quad k = 2, 3. \quad (43)$$

Полагая $k = 2, 3$, запишем (43):

$$\begin{cases} (1/3 t_2^2) \alpha_{i2} + (1/2 t_2) \alpha_{i1} = a_{i2}^c + g_i; \\ (1/3 t_3^2) \alpha_{i2} + (1/2 t_3) \alpha_{i1} = a_{i3}^c + g_i. \end{cases} \quad (44)$$

Решая систему (44) относительно α_{i1}, α_{i2} , получаем

$$\alpha_{ij} = D_{ij}^{ca} / D_{00}^{ca}, \quad (45)$$

где обозначено:

$$D_{00}^{ca} = -1/6(t_3 - t_2)t_2t_3; \quad (46)$$

$$D_{i1}^{ca} = 1/2t_2^2(a_{i3}^c + g_i) - 1/2t_3^2(a_{i2}^c + g_i); \quad (47)$$

$$D_{i2}^{ca} = 1/2t_3(a_{i2}^c + g_i) - 1/2t_2(a_{i3}^c + g_i). \quad (48)$$

Если ввести коэффициенты кратности g , то

$$a_{ik}^c = K_{ik}^{ca} g, \quad i = 1, 2, \quad k = 2, 3. \quad (49)$$

Задавая K_{ik}^{ca} , вычисляем a_{ik}^c по формулам (49), затем вычисляем D_{00}^{ca}, D_{ij}^{ca} по формулам (46)–(48) и находим коэффициенты α_{ij} , необходимые для получения модели сигналов акселерометров ИНС-А.

Алгоритм функционирования ИМ процедуры определения КК представляет собой последовательность действий:

1. Задать: g – модуль \vec{g} (м/с²); $t_0 = 0$ – начальный момент времени (с); t_1, t_2, t_3 – первый, второй, третий моменты времени (с); T – конечный момент времени; N_B, N_L – количество точек решения, вывода; α^Q – амплитуда угловых колебаний (рад); ω – частота угловых колебаний (с⁻¹); $K_{12}^{ca}, K_{13}^{ca}, K_{22}^{ca}, K_{23}^{ca}$ (–); $L_1^A, L_2^A, L_1^B, L_2^B$ (м); $\tilde{P}_0^Q, (\text{с}^{-1}); \tilde{P}_1^Q, \tilde{P}_2^Q$ (м/с); $\tilde{P}_{10}^A, \tilde{P}_{20}^A$ (м/с²); $\tilde{P}_{11}^A, \tilde{P}_{21}^A, \tilde{P}_{12}^A, \tilde{P}_{22}^A$ (–).

2. $\Delta t = (T - t_0) / N_B$; a_{ik}^c по (49); $D_{00}^{ca}, D_{i1}^{ca}, D_{i2}^{ca}$ по (46)–(48); α_{ij} по (45); $L_i^{AB} = L_i^B - L_i^A$, $i = 1, 2$; $t = t_0$.

3. $\Delta \tilde{Q}^B = 0, \Delta Q = 0$.

4. $t_p = t + \Delta t, t_{pp} = t + 2\Delta t$.

5. $q = \alpha^Q \sin \omega t, q_p = \alpha^Q \sin \omega t_p, q_{pp} = \alpha^Q \sin \omega t_{pp}$ по (27); a_i по (28).

6. $\Omega = (q_p - q) / \Delta t; \quad \varepsilon = (q_{pp} - 2q_p + q) / (\Delta t)^2$ (численное дифференцирование (ЧД)), $H_{11}^A = \cos q, H_{12}^A = -\sin q, H_{21}^A = \sin q, H_{22}^A = \cos q, H_{11}^{AB} = \cos(\Delta Q), H_{12}^{AB} = -\sin(\Delta Q), H_{21}^{AB} = \sin(\Delta Q), H_{22}^{AB} = \cos(\Delta Q)$.

7. $H_{ij}^B = \sum_{m=1}^2 H_{mi}^{AB} H_{mj}^A, i, j = 1, 2; W_i^L$ по (15).

8. a_i^B по (23).

9. $\Delta \tilde{Q}^B, \Delta \tilde{A}_i$ по (29), (30).

10. $\Delta \tilde{Q}^B = \Delta \tilde{Q}^B + \Delta \tilde{Q}^B \Delta t$ (ЧД).

11. $Q^B = q + \Delta \tilde{Q}^B; A_i^B = a_i^B + \Delta \tilde{A}_i, i = 1, 2$ по (32), (33).

12. $\Delta Q = (\sin Q^B - \sin q) / \cos q; W_i^A, W_i^B, \Delta W_i$ по (14).

13. $\Delta W_i = W_i^B - W_i^A, i = 1, 2; F_i$ по (21).

14. ΔA_i по (20).

15. $t = t + \Delta t, t_p = t + \Delta t, t_{pp} = t + 2\Delta t$.

16. $q = \alpha^Q \sin \omega t, q_p = \alpha^Q \sin \omega t_p, q_{pp} = \alpha^Q \sin \omega t_{pp}$ по (27).

17. $\Omega = (q_p - q) / \Delta t; \quad \varepsilon = (q_{pp} - 2q_p + q) / (\Delta t)^2; H_{11}^A = \cos q, H_{12}^A = -\sin q, H_{21}^A = \sin q, H_{22}^A = \cos q; H_{11}^{AB} = \cos(\Delta Q), H_{12}^{AB} = -\sin(\Delta Q), H_{21}^{AB} = \sin(\Delta Q), H_{22}^{AB} = \cos(\Delta Q)$.

18. $H_{ij}^B = \sum_{m=1}^2 H_{mi}^{AB} H_{mj}^A, i, j = 1, 2; W_i^L, a_i$ по (15), (28).

19. a_i^B по (23).

20. $\Delta \tilde{Q}^B$ по (29).

21. $\Delta \tilde{Q}^B = \Delta \tilde{Q}^B + \Delta \tilde{Q}^B \Delta t$ по п. 10.

22. $Q^B = q + \Delta \tilde{Q}^B$ по п. 11.

23. $\Delta Q_p = (\sin Q^B - \sin q) / \cos q$.

24. $\Delta \dot{Q} = (\Delta Q_p - \Delta Q) / \Delta t$ (ЧД).

25. Если $(t > t_1 - 0,5\Delta t)$ и $(t < t_1 + 0,5\Delta t)$, то $\Delta \dot{Q}_1 = \Delta \dot{Q}; \Delta A_{i1} = \Delta A_i; a_{i1}^B = a_i^B, i = 1, 2$.

26. Если $(t > t_2 - 0,5\Delta t)$ и $(t < t_2 + 0,5\Delta t)$, то $\Delta \dot{Q}_2 = \Delta \dot{Q}; \Delta A_{i2} = \Delta A_i; a_{i2}^B = a_i^B, i = 1, 2$.

27. Если $(t > t_3 - 0,5\Delta t)$ и $(t < t_3 + 0,5\Delta t)$, то $\Delta \dot{Q}_3 = \Delta \dot{Q}; \Delta A_{i3} = \Delta A_i; a_{i3}^B = a_i^B, i = 1, 2$.

28. $t = t + \Delta t$.

29. Если $t \leq T$, то п. 4.

30. P_j^Q, P_{ij}^A по (6), (26).

31. S_j^Q, S_{ij}^A по (34), (35).

32. S^Q, S^A по (36), (37).

33. Вывести: $P_j^Q, S_j^Q, S^Q, P_{ij}^A, S_{ij}^A, S^A$.

34. Закончить.

Заключение

На основе этого алгоритма разработана программа, реализующая имитационную модель процедуры определения КК для трехосной стабилизированной платформы (ТСП) и трех акселерометров ИНС-В (рис. 2), на вход которой подается информация о номерах акселерометров (i), а значит, и об ориентации оси площадки, о проекциях вектора гравитационного ускорения (G_i) и проекциях радиус-векторов начал связанных с ИНС-А, ИНС-В систем координат (L_i), моделях сигналов датчиков углов

ИНС-А, ИНС-В (q_i, Q_i) и моделях сигналов акселерометров ИНС-А, ИНС-В (a_i, A_i), а выход которой – величины КК платформы и акселерометров (рис. 3).

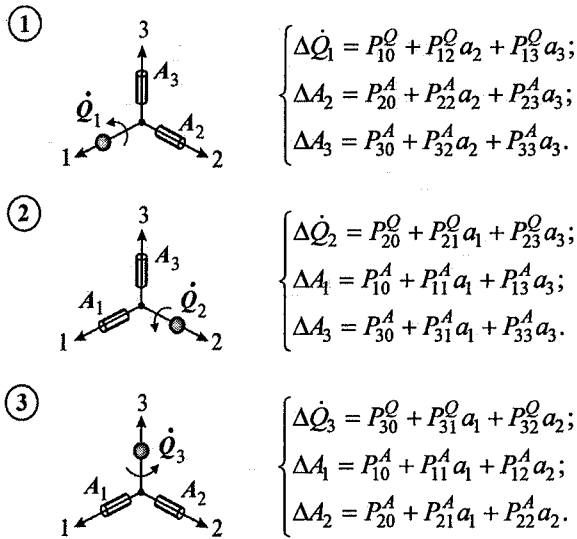


Рис. 2. Варианты установки датчиков и математические описания для подсистем 1, 2 и 3

Литература

1. Щипицын, А. Г. Математическое описание для процедуры калибровки инерциальной навигационной системы / А. Г. Щипицын // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2007. – Вып. 5, № 7(79). – С. 52–61.
 2. Лурье, А. И. Аналитическая механика / А. И. Лурье. – М.: ГИФМЛ, 1961. – 824 с.

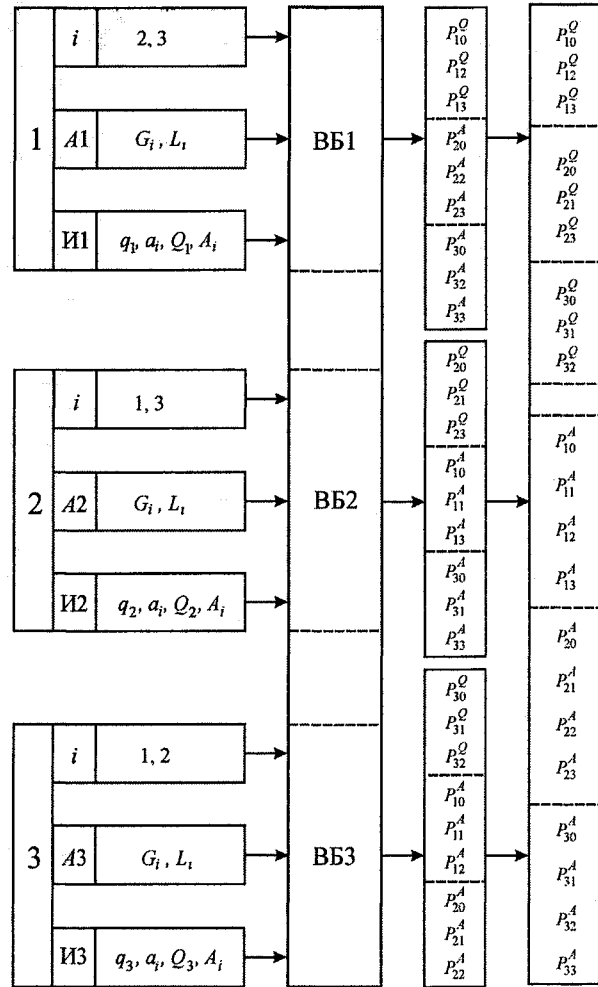


Рис. 3. Блок-схема определения КК ТСП

ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНОГО ФИЛЬТРА В СИСТЕМЕ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕСА

А.А. Лебедев, К.О. Разнополов, О.А. Разнополов

Тензометрические датчики широко используются в качестве чувствительных элементов весов промышленного назначения: крановых весов, весов-дозаторов и автомобильных весов.

Динамические свойства измерительных систем, в которых используются тензометрические датчики, характеризуются колебательными переходными процессами. Точное значение веса груза определяется по истечении некоторого промежутка времени, необходимого для затухания переходного процесса на выходе системы измерения.

Современные интеллектуальные датчики позволяют обеспечить работу измерительной системы в режиме динамического измерения, когда значение веса груза определяется задолго до затухания колебаний сигнала на выходе датчика. Такой режим работы системы позволяет существенно ускорить процесс измерения.

В настоящее время существует ряд методов, применяющихся для обеспечения режима динамического измерения в измерительной системе. Использование нейронных сетей для динамических измерений описано в [1]. Кроме данных методов используются фильтр Калмана [2] и оценка с помощью рекурсивного метода наименьших квадратов [3]. Указанные методы предполагают цифровую реализацию устройства, корректирующего выходной сигнал тензодатчика. Метод, использующий аналоговый адаптивный фильтр, представлен в [4]. В данной статье исследуется возможность применения цифрового адаптивного фильтра, позволяющего организовать работу измерительной системы в режиме динамического измерения и сократить время взвешивания.

1. Модель измерительной системы

Динамика измерительной системы с тензометрическим датчиком в качестве чувствительного элемента описывается, согласно [4], следующим дифференциальным уравнением:

$$(m + m_0) \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + c \frac{dy(t)}{dt} + ky(t) = mg \cdot 1(t),$$

где m – масса груза, $y(t)$ – выход измерительной системы, m_0 – эффективная масса датчика, c – коэффициент затухания, k – свободный коэффициент, g – ускорение свободного падения, $1(t)$ – единичная ступенчатая функция.

Если входным сигналом считать массу, воздействующую на датчик (т.е. величину $m \cdot 1(t)$), а выходным сигналом – падение напряжения на тензодатчике, то передаточная функция измеритель-

ной системы $T(s)$, записанная на основании данного уравнения, будет иметь вид

$$T(s) = \frac{Y(s)}{M(s)} = \frac{g}{m + m_0} \left/ \left(s^2 + \frac{c}{m + m_0} s + \frac{k}{m + m_0} \right) \right.$$

Для получения единичного коэффициента передачи в статике необходимо в измерительную систему включить последовательно звено усиления с коэффициентом k/g . Тогда передаточная функция измерительной системы со звеном усиления $G(s)$ примет вид

$$G(s) = T(s) \frac{k}{g} = \frac{k}{m + m_0} \left/ \left(s^2 + \frac{c}{m + m_0} s + \frac{k}{m + m_0} \right) \right.$$

или

$$G(s) = \frac{P_2}{s^2 + p_1 s + p_2}. \quad (1)$$

При малом значении параметра p_1 переходный процесс будет носить колебательный характер и иметь значительное время установления.

2. Синтез адаптивного фильтра

Применение идеального фильтра с передаточной функцией $H(s) = 1/G(s)$ позволило бы придать переходной характеристике $z(t)$ желаемый вид и обеспечить работу измерительной системы в режиме динамического взвешивания (см. рис. 1).

Фильтр с передаточной функцией $H(s) = 1/G(s)$ физически нереализуем, поэтому можно использовать передаточную функцию вида

$$H(s) = \frac{B}{p_2} \cdot \frac{s^2 + p_1 s + p_2}{s^2 + A s + B}, \quad (2)$$

где A и B задают вид переходного процесса.

Однако, в соотношении (1) параметры p_1 и p_2 передаточной функции $G(s)$ зависят от массы груза, воздействующего на тензодатчик, поэтому применимость фильтра с постоянной структурой и постоянными параметрами ограничена узким диапазоном масс взвешиваемых грузов.

Фильтр, описываемый передаточной функцией (2), имеет структуру, представленную на рис. 2.

Передаточная функция такого фильтра, полученная по структурной схеме, имеет вид

$$H(s) = b/k \cdot \left(s^2 + \frac{c}{n} s + \frac{k}{n} \right) \left/ \left(s^2 + \frac{a}{n} s + \frac{b}{n} \right) \right.$$

Для идеального фильтра $n = m + m_0$, передаточная функция измерительной системы с идеальным фильтром будет иметь вид

$$W(s) = G(s)H(s) = \frac{b}{m + m_0} \left/ \left(s^2 + \frac{a}{m + m_0} s + \frac{b}{m + m_0} \right) \right.$$

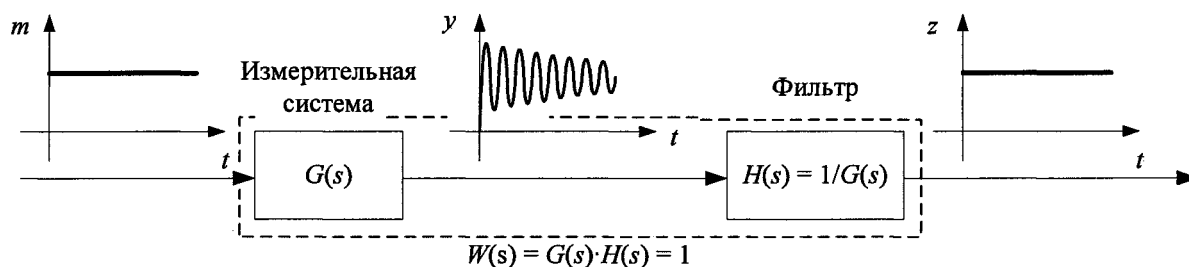


Рис. 1. Схема измерительной системы с идеальным фильтром

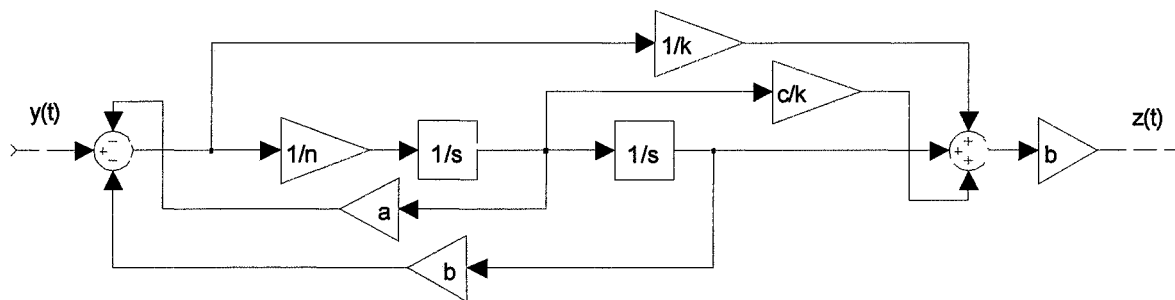


Рис. 2. Структурная схема неадаптивного фильтра

Выбирая коэффициенты a и b , можно задавать вид переходного процесса на выходе измерительной системы. Если выполняются условия $a \gg m_{\max}$, $b \gg m_{\max}$, то масса взвешиваемого груза влияет на характер переходного процесса незначительно (здесь m_{\max} – верхний предел измерений).

Однако масса m подлежит измерению и становится известной только по окончании переходного процесса на выходе, поэтому для реализации условия $n = m + m_0$ предлагается использовать выходной сигнал фильтра $z(t)$ в качестве оценки параметра m . В структуру фильтра вводится нелинейный элемент с характеристикой вида $f(z) = 1/(z + m_0)$, в результате получаем адаптивный фильтр, структурная схема которого приведена на рис. 3.

Схема измерительной системы с адаптивным фильтром изображена на рис. 4.

3. Результаты моделирования

Для проверки применимости предложенного метода было проведено моделирование измерительной системы с адаптивным фильтром в MathWorks Simulink 6.5. В качестве модели датчика использовалась передаточная функция (1) с добавлением на выходе белого шума с дисперсией 0,001. Использовались следующие значения параметров передаточной функции датчика: $m_0 = 0,5$ кг; $c = 3,5$; $k = 2,7$ кПа [4].

В качестве модели адаптивного фильтра использовалась структурная схема, представленная на рис. 3. Параметры фильтра a и b выбраны равными 600 и 100000 соответственно. Для подавления шума на выходе датчика использовался фильтр нижних частот Баттерворта второго порядка с полосой пропускания 50 рад/с.

Схема моделирования приведена на рис. 5. В качестве входного воздействия задавались массы 1 кг и 10 кг. Результаты моделирования представлены на рис. 6.

Заключение

Результаты моделирования показывают уменьшение времени измерения более чем на порядок при неизменной точности измерений, что свидетельствует о применимости предложенного метода динамической компенсации колебательной составляющей переходного процесса в измерительной системе для обеспечения режима динамического измерения. При этом массы взвешиваемых грузов могут находиться в достаточно широком диапазоне.

Структура предложенного фильтра достаточно проста и легко может быть реализована в цифровом виде.

Литература

1. Alhoseyni, S. M. T. The application of artificial neural network to intelligent weighing systems / S. M. T. Alhoseyni, A. Yasin, N. M. White // Proc. IEE Sci. Meas. Technol. – 1999. – Vol. 146. – P. 265–269.
2. Halimic, M. Kalman filter for dynamic weighing system / M. Halimic, W. Balachandran // Proc. IEEE Int. Symp. Industrial Electron. – 1995. – P. 787–791.
3. Shu, W.-Q. Dynamic weighing under nonzero initial condition / W.-Q. Shu // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1993. – Vol. 42. – P. 806–811.
4. Jafaripanah, M. Application of Analog Adaptive Filters for Dynamic Sensor Compensation / M. Jafaripanah, B. M. Al-Hashimi, N. M. White // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2005. – Vol. 54, № 1. – P. 245–251.

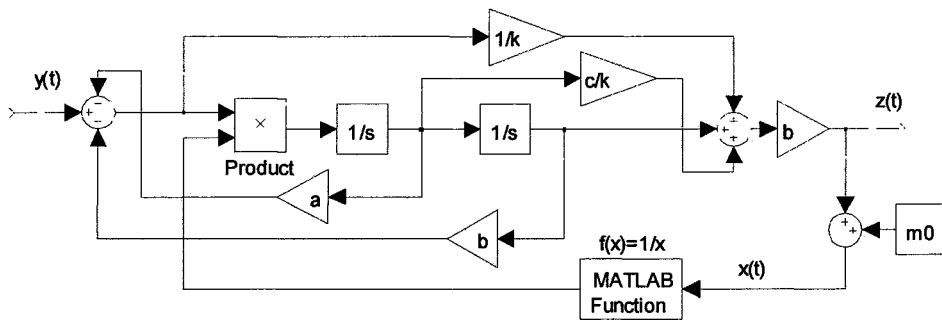


Рис. 3. Структурная схема адаптивного фильтра

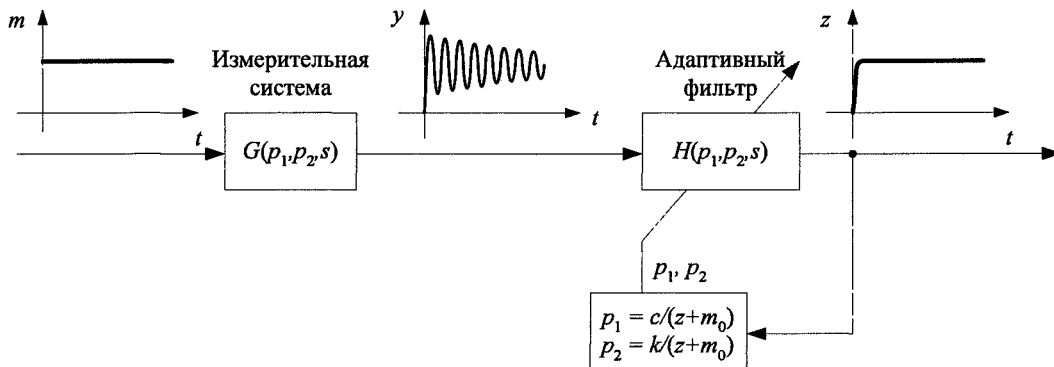


Рис. 4. Схема измерительной системы с адаптивным фильтром

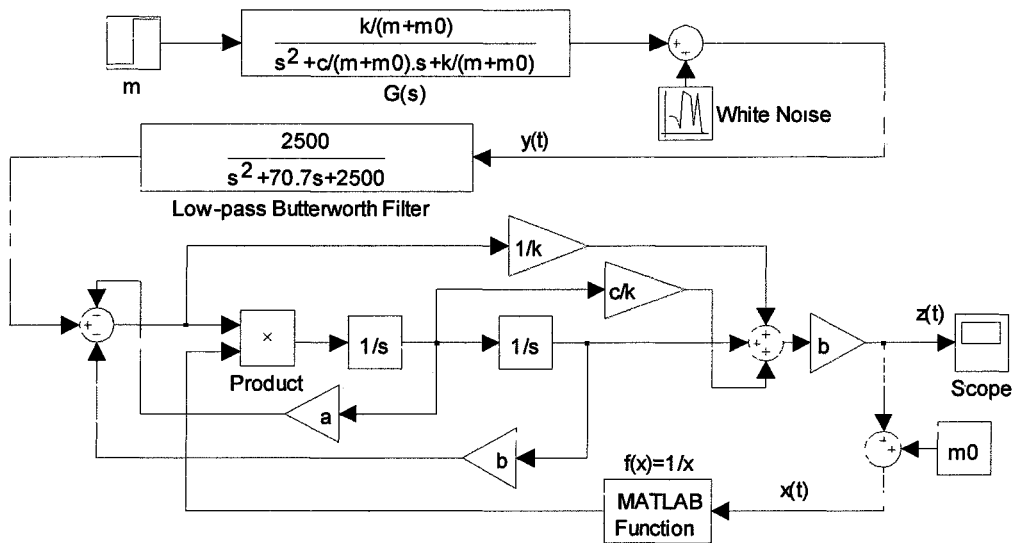


Рис. 5. Схема моделирования

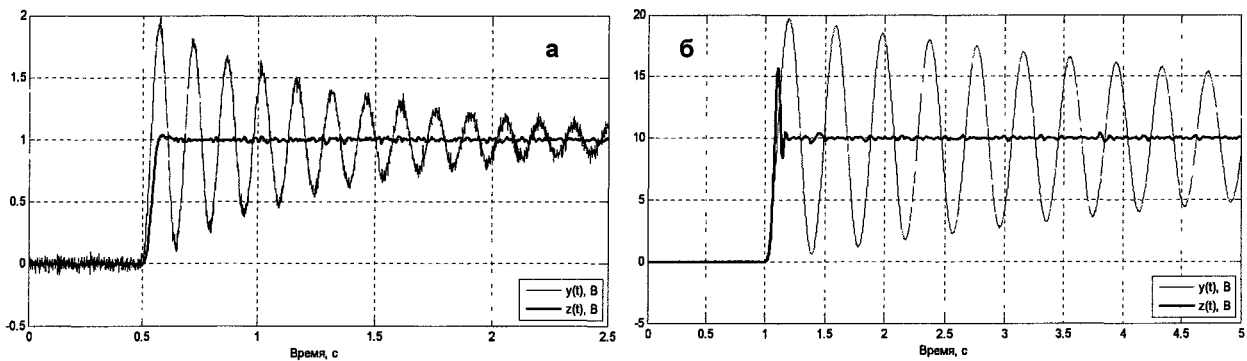


Рис. 6. Результаты моделирования при дисперсии шума 0,001:
а – при массе 1 кг; б – при массе 10 кг

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ БЕЗ ОПОРНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

М.Д. Белоусов, А.Л. Шестаков

Преобразователи температуры на базе термосопротивления (преобразователи термосопротивления) широко применяются для измерения температуры благодаря высокой точности измерения. Типичная схема термопреобразователя приведена в книгах [1, 2]. Для измерения используется зависимость металлического сопротивления от температуры. Базовая схема измерения состоит из последовательно включенных источника опорного напряжения, резистора термосопротивления, подверженного действию измеряемой температуры и опорного сопротивления, значение которого известно заранее. В данной работе рассматривается преобразователь термосопротивлений с более простой схемой без опорного сопротивления и алгоритм обработки результатов измерений.

1. Схема измерения

Структурная схема типичного преобразователя температуры, собранного на современных электронных компонентах изображена на рис. 1. Здесь МК – микроконтроллер, ИН – источник напряжения, АЦП – аналогово-цифровой преобразователь, $R_{оп}$ – опорное сопротивление, $R_{Тч1}$ – термочувствительное сопротивление (находится в щупе), $R_{Тч2}$ – термочувствительное сопротивление 2 (находится в блоке электроники).

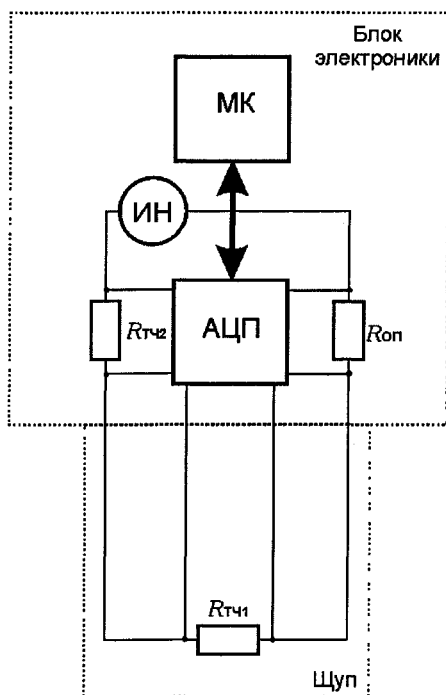


Рис. 1. Структурная схема преобразователя термосопротивления

ИН генерирует опорное напряжение U , которое вызывает ток i через контур ИН, $R_{оп}$, $R_{Тч1}$, $R_{Тч2}$. Токи, протекающие через АЦП не учитываются, поскольку входное сопротивление АЦП на несколько порядков больше сопротивления резисторов в измеряемой цепи. В качестве $R_{оп}$ используется высокоточный резистор, в качестве $R_{Тч1}$, $R_{Тч2}$ используются платиновые термосопротивления, $R_{Тч1}$ измеряет искомую температуру технологического процесса. Как показывает практика, невозможно не учитывать зависимость значений $R_{оп}$ от температуры самого $R_{оп}$. Поэтому приходится либо отдельно термостабилизировать $R_{оп}$, что и делается в прецизионных термопреобразователях, либо измерять температуру $R_{оп}$ и учитывать ее в дальнейших расчетах. $R_{Тч2}$ измеряет температуру модуля электроники для корректировки показаний, вызванных ее изменением.

Зная напряжение $U_{Rоп}$ на $R_{оп}$, $U_{RТч1}$, $U_{RТч2}$, можно найти $R_{Тч1}$, $R_{Тч2}$:

$$i = \frac{U_{Rоп}}{R_{оп}} = \frac{U_{RТч1}}{R_{Тч1}} = \frac{U_{RТч2}}{R_{Тч2}}, \quad (1)$$

а затем, используя индивидуальные или серийные коэффициенты калибровки, рассчитать искомые температуры.

Перед эксплуатацией электроника термопреобразователя нуждается в отдельной калибровке в зависимости от собственной температуры, что дополнительно удорожает стоимость изделия.

Целью данной работы является исследование предлагаемой более простой схемы реализации термопреобразователя и алгоритм обработки данных, позволяющих удешевить средство измерения без ухудшения базовых характеристик.

2. Предлагаемая реализация схемы измерения

2.1. Функциональная схема преобразователя термосопротивления

Предлагаемый вариант структурной схемы преобразователя температуры приведен на рис. 2. В данном варианте в схеме отсутствует резистор $R_{оп}$, а резистор $R_{Тч2}$ помещен, так же, как и $R_{Тч1}$ в щуп термометра. Температуры обоих термосопротивлений совпадают и равны измеряемой температуре. В такой схеме роль опорного сопротивления выполняет одно из термосопротивлений, а изменения «опорного» сопротивления от температуры уже учтены в калибровке. Очевидно, что характеристики зависимости сопротивления от температуры у обоих термосопротивлений должны быть отличны друг от друга.

2.2. Алгоритм обработки информации

В качестве функции, от которой зависит температура, предлагается взять отношение значений напряжений на термосопротивлениях:

$$X(t) = \frac{U_{R_{TЧ1}}(t)}{U_{R_{TЧ2}}(t)}, \quad (2)$$

где t – измеряемая температура, $X(t)$ – некоторая функция. Пренебрегая значениями входного тока АЦП, можно записать:

$$X(t) = \frac{R_{TЧ1}(t)}{R_{TЧ2}(t)}. \quad (3)$$

При этом $X(t)$ не является функцией тока i , протекающего через резисторы. Из выражения (3) следует, что для максимальной чувствительности термометра необходимо выполнение неравенства (4):

$$R_{TЧ1} \neq kR_{TЧ2}, \quad (4)$$

где k – некоторая константа.

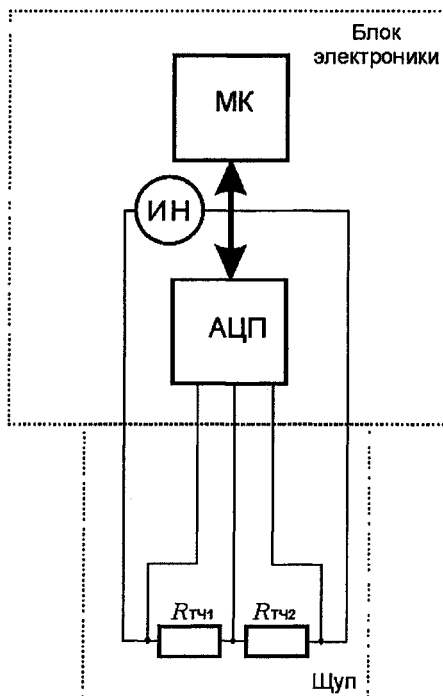


Рис. 2. Структурная схема преобразователя термосопротивления

Типичными параметрами платинового элемента согласно [3], [4] являются: для класса А: $-200...+650$ °С,

$$\Delta t = \pm(0,15 \text{ °С} + 0,002|t|), \quad (5)$$

для класса В: $-200...+850$ °С

$$\Delta t = \pm(0,3 \text{ °С} + 0,005|t|), \quad (6)$$

где t – значение измеряемой температуры, °С; Δt – значение допускаемой погрешности при температуре t , °С.

Рассмотрим варианты термозависимых элементов для выбора наиболее подходящей пары

Температурные зависимости различных термосопротивлений из статьи [5] приведены на рис. 3.

Можно видеть, что максимально различный вид функции зависимости сопротивления от тем-

пературы от платины имеет термистор. Но термистор имеет гораздо меньший по сравнению с платиной температурный диапазон, это исключает его применение в поставленной задаче. Приведенные на рис. 3 зависимости показывают, что наиболее отличающиеся друг от друга характеристики имеют платина и никель. Поэтому именно они используются для решения данной задачи.

Характеристики для терморезисторов из платины и никеля, производства фирмы Advanced Thermal Products [3], приведены ниже.

Для платины в температурном диапазоне $-200...+600$ °С зависимость сопротивления от температуры определяется выражением:

$$\begin{cases} R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3(t-100)), & t < 0 \text{ °С}; \\ R_t = R_0(1 + At + Bt^2), & t > 0 \text{ °С}, \end{cases} \quad (7)$$

где $A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ °С}^{-1}$, $B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ °С}^{-2}$, $C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ °С}^{-3}$.

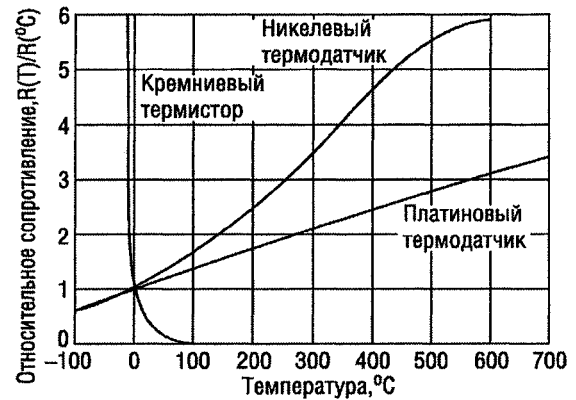


Рис. 3. Зависимости сопротивления различных чувствительных элементов от температуры

Для никеля, в температурном диапазоне $-100...+250$ °С зависимость сопротивления от температуры определяется выражением:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3 + Dt^4 + Et^5 + Ft^6), \quad (8)$$

где $A = 5,485 \cdot 10^{-3} \text{ °С}^{-1}$, $B = 6,65 \cdot 10^{-6} \text{ °С}^{-2}$, $C = 0 \text{ °С}^{-3}$, $D = 2,805 \cdot 10^{-11} \text{ °С}^{-4}$, $E = 0 \text{ °С}^{-5}$, $F = -2 \cdot 10^{-17} \text{ °С}^{-6}$.

Погрешности этих термосопротивлений для платины определяются выражениями (5), (6).

Погрешности терморезисторов [4] для никеля: класс 1/2 DIN:

$$\Delta t = \begin{cases} \pm 0,2 + 0,0140|t|, & t < 0 \text{ °С}; \\ \pm 0,2 + 0,0035|t|, & t > 0 \text{ °С}; \end{cases} \quad (9)$$

класс DIN 43760:

$$\Delta t = \begin{cases} \pm 0,4 + 0,028|t|, & t < 0 \text{ °С}; \\ \pm 0,2 + 0,007|t|, & t > 0 \text{ °С}; \end{cases} \quad (10)$$

класс 2 DIN:

$$\Delta t = \begin{cases} \pm 0,8 + 0,028|t|, & t < 0 \text{ °С}; \\ \pm 0,8 + 0,007|t|, & t > 0 \text{ °С}, \end{cases} \quad (11)$$

где t – значение измеряемой температуры, °С; Δt – значение допускаемой погрешности при температуре t , °С.

Основой построения математической модели являются зависимости выражений (7), (8). Примем, что в дальнейшем к коэффициентам уравнения (7) добавляем индекс «п» (платина), а к коэффициентам уравнения (8) добавляем индекс «н» (никель).

Выражение (3), используя (7), (8), запишем в виде:

$$X(t) = \left(\frac{R_{0н}}{R_{0п}} \right) \frac{1 + A_н t + B_н t^2 + D_н t^4 + F_н t^6}{1 + A_п t + B_п t^2 - 100 C_п t^3 + C_п t^4}. \quad (12)$$

График функции $X(t)$ представлен на рис. 4.

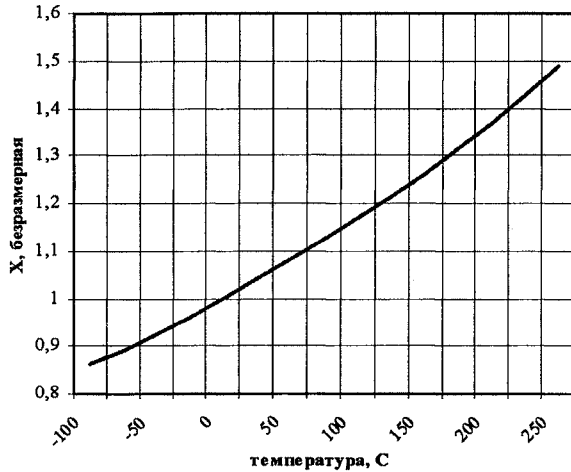


Рис. 4. Зависимость отношений сопротивлений никель/платина от температуры

Поскольку функции (7), (8) (в заданном диапазоне температур никелевого сопротивления $-100 \dots +250$ °С определены, непрерывны, ограничены и не равны нулю, то функция отношения этих полиномов $X = X(t)$ в заданном диапазоне температур также определена, непрерывна и ограничена. Согласно рис. 3 эта функция монотонна, следовательно (по теореме о существовании обратной функции) для X в диапазоне $0,864 - 1,490$ существует обратная функция $t = T(X)$, которая определена во всем диапазоне X , определена, непрерывна, ограничена и монотонна.

Аналитического решения функции $t = T(X)$, обратной к функции (12), не существует, но для решения прикладной задачи требуемое вычисление температуры в зависимости от параметра X достаточно представить в виде алгоритма для программирования.

Левую и правую части уравнения (12) умножим на знаменатель дроби и перенесем все в левую часть. После преобразований получим следующее уравнение:

$$\begin{aligned} & \left(1 - \frac{R_{0н}}{R_{0п}} X \right) + \left(A_н - \frac{R_{0н}}{R_{0п}} X A_п \right) t + \\ & + \left(B_н - \frac{R_{0н}}{R_{0п}} X B_п \right) t^2 + \left(100 \frac{R_{0н}}{R_{0п}} X C_п \right) t^3 + \\ & + \left(D_н - \frac{R_{0н}}{R_{0п}} X C_п \right) t^4 + F_н t^6 = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Введем функцию $Z(t, X)$:

$$Z(t, X) = z_0 + z_1 t + z_2 t^2 + z_3 t^3 + z_4 t^4 + z_6 t^6,$$

где:

$$\begin{cases} z_0 = \left(1 - \frac{R_{0н}}{R_{0п}} X \right) \\ z_1 = \left(A_н - \frac{R_{0н}}{R_{0п}} X A_п \right) \\ z_2 = \left(B_н - \frac{R_{0н}}{R_{0п}} X B_п \right) \\ z_3 = \left(100 \frac{R_{0н}}{R_{0п}} X C_п \right) \\ z_4 = \left(D_н - \frac{R_{0н}}{R_{0п}} X C_п \right) \\ z_6 = F_н. \end{cases} \quad (14)$$

По условиям задачи аргумент X известен, следовательно функция $Z(t, x)$ превращается в степенной полином от одного аргумента t .

Математическое моделирование показало достаточную эффективность простого решения данного нелинейного алгебраического уравнения: методом половинного деления. Решение уравнения (13) с использованием функции (14) методом половинного деления удобно производить по следующему алгоритму, приведенному на рис. 5.

Здесь следует отметить, что можно также по заданному алгоритму рассчитать температуру сразу из выражения (12), заменив $Z(t, X)$ на $X(t)$, а условие $Z(t, X) > 0$ в модуле «если» на условие $X(t) - X > 0$. Однако программа, написанная на основании формулы (14) будет несколько проще и короче, займет меньше памяти микроконтроллера и, поэтому, возможно, позволит использовать более дешевый микроконтроллер.

2.3. Калибровка

Используя стандартные степенные коэффициенты, можно калибровать конкретное изделие по одной или нескольким точкам диапазона, зная стандартные степенные коэффициенты при старших степенях, можно рассчитать по результатам калибровки степенные коэффициенты при более младших степенях полинома.

При одной точке калибровки известно истинное значение температуры в некоторой точке $t_{ист}$ и измеренное в этой точке значение $X_{изм}$. Подставляя $t_{ист}$ в формулу (12), получаем $X_{ист}$. Вычисляем поправочное значение $X_{попр}$ по формуле:

$$X_{попр} = X_{ист} - X_{изм}, \quad (15)$$

а выражение (12) в этом случае приобретает вид:

$$X(t) = \left(\frac{R_{0н}}{R_{0п}} \right) \frac{1 + A_н t + B_н t^2 + D_н t^4 + F_н t^6}{1 + A_п t + B_п t^2 - 100 C_п t^3 + C_п t^4} + X_{попр}. \quad (16)$$

Аналогично будет обстоять дело и при большем количестве точек калибровки – в этом случае при n точках калибровки $X_{попр}$ будет представлять

из себя некоторый полином, степени $n - 1$, от температуры. Имея n значений $(t_i, X_{\text{попр}_i})$, необходимо построить по этим точкам удобный аппроксимирующий полином.

Можно также производить полную индивидуальную калибровку изделия, например при его изготовлении. В этом случае достаточно построить любой удобный полином $t = T(X)$ из множества измеренных точек калибровки (t_i, X_i) . Полное количество точек калибровки требует дополнительного исследования. Если же требуется калибровка по неполному множеству точек калибровки (t_i, X_i) , например при подстройке одной, или нескольких точек в процессе эксплуатации изделия, то на базе этих данных можно пересчитать коэффициенты при младших степенях полинома, оставив коэффициенты при старших степенях неизменными.

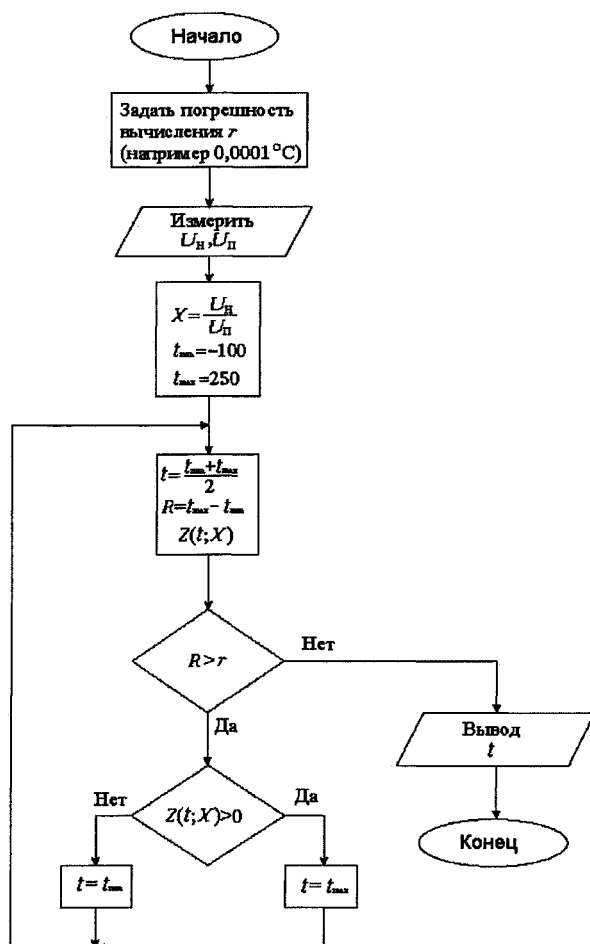


Рис. 5. Алгоритм решения уравнения (14) методом половинного деления

2.4. Анализ погрешностей предлагаемой реализации в сравнении с исходной

Наиболее существенными погрешностями в исходной схеме термопреобразователя сопротивления являются погрешности долговременного ухода опорного сопротивления и термосопротивления. В предлагаемой реализации термопреобразователя наиболее существенными погрешностями будет

погрешность отношения сопротивлений, вызванная погрешностями платиновых и никелевых термосопротивлений. Анализ причин долговременных необратимых погрешностей меры и термосопротивлений, сделанных из чистых металлов, указывает на следующие главные причины этого явления: химическое (главным образом окисление) и физическое (растрескивание, пластические деформации) разрушение металлического слоя сопротивлений. При всех этих воздействиях может происходить только увеличение значения сопротивления. Опорное сопротивление, если оно изготовлено из сплавов, может иметь и отрицательное долговременное изменение сопротивления, но знак изменения его сопротивления качественно не меняет характер графика суммарной погрешности для общепринятой реализации. Зависимости погрешностей термосопротивлений и термопреобразователей приведены на рис. 6. Рассмотрим рис. 6.

Общая допустимая погрешность для платинового термосопротивления класса В из статей [3], [4] приведена на графике «Платиновое ТС», общая допустимая погрешность для никелевого термосопротивления класса 1/2 DIN по одноименному стандарту из статьи [4] приведена на графике «Никелевое ТС». В исходной реализации в качестве опорного сопротивления рассматривается резистор P1-37 100 Ом, его данные взяты из статьи [6]: максимальная допустимая погрешность опорного сопротивления из P1-37 при наработке 10000 ч в температуре 40 °C составила 0,05 % от номинала.

Изменения номинала опорного сопротивления вызовут дополнительную погрешность измерения температуры. Дополнительная погрешность измерения температуры, вызванная изменением номинала опорного сопротивления для термопреобразователя с платиновым термосопротивлением приведена на графике «Мера на платиновом ТС», для никелевого термосопротивления аналогичным образом рассчитан график «Мера на никелевом ТС». Суммарные погрешности для общепринятых реализаций для никеля и платины приведены соответственно на графиках «Общепринятая реализация никель» и «Общепринятая реализация платина». Подразумевается, что погрешности опорного сопротивления и термочувствительного сопротивления являются независимыми случайными величинами, суммарная погрешность находится по формуле

$$\delta_{\text{сумм}} = \sqrt{\delta_{\text{ОС}}^2 + \delta_{\text{ТС}}^2}, \quad (17)$$

где $\delta_{\text{сумм}}$ – суммарная погрешность преобразователя термосопротивления, $\delta_{\text{ОС}}$ – погрешность опорного сопротивления, $\delta_{\text{ТС}}$ – погрешность термочувствительного сопротивления

Погрешность предлагаемой реализации представлена на графике «предлагаемая реализация». Изменения термочувствительных сопротивлений в этом случае будет являться причиной погрешности величины X , что, в свою очередь, вызовет погрешность измерения температуры.

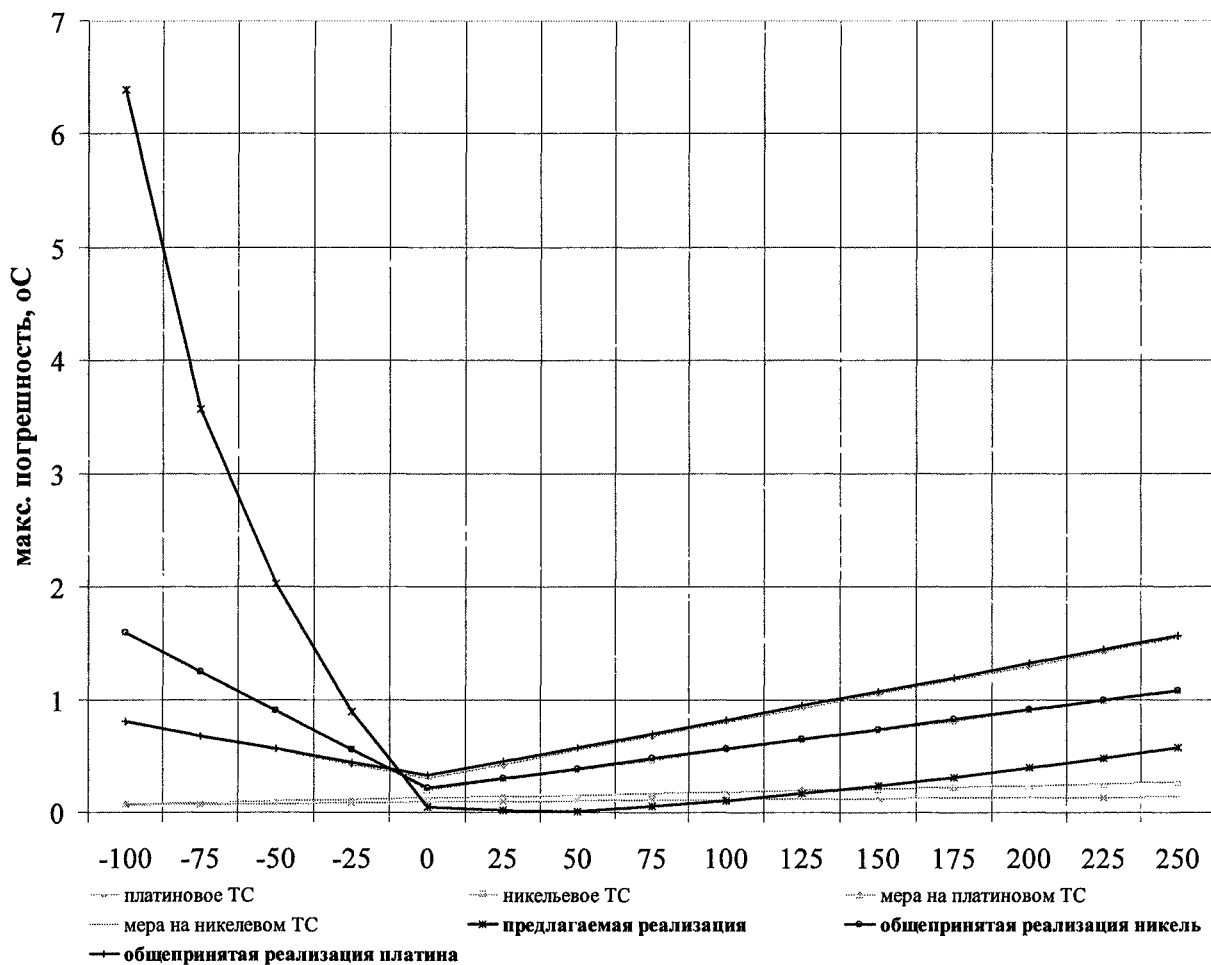


Рис. 6. Наиболее существенные погрешности термопреобразователя сопротивлений

Заключение

1. Предложенная схема реализации термопреобразователя сопротивления по сравнению с общепринятой схемой не содержит опорного сопротивления, которое является прецизионным и недешевым элементом. Такая схема не требует калибровки блока электроники от температуры, что также снижает стоимость серийно выпускаемого изделия.

2. Алгоритм обработки информации предложенной реализации существенно отличаются от общепринятого, – так как в процессе вычисления не используются величина тока в цепи термочувствительных сопротивлений и значение температуры блока электроники термопреобразователя.

3. Рассчитанные значения погрешностей предлагаемой реализации при максимальных отклонениях сопротивления термопреобразователя в диапазоне температур 0...+250 °С существенно ниже погрешностей преобразователя температур в общепринятой схеме реализации. В расчетах погрешности использовались суммарные значения разброса параметров для термочувствительных сопротивлений, включающие в себя как разброс параметров при изготовлении индивидуального сопротивления, так и долговременную стабильность.

Литература

1. Блинов, О. М. *Теплотехнические измерения и приборы* / О. М. Блинов, А. М. Беленький, В. Ф. Бердышев. – М.: Металлургия, 1993. – 288 с.
2. Олейник, Б. Н. *Приборы и методы температурных измерений* / Б. Н. Олейник, С. И. Лаздрин, В. П. Лаздрин. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 296 с.
3. *Resistance Temperature Detectors (RTD'S)*. – Access mode: <http://www.atpsensor.com/pdfs/rtd.pdf>, free.
4. ГОСТ 8.624-2006. *Термометры сопротивления из платины, меди и никеля*. – М.: Изд-во стандартов, 2006.
5. Маргелов, А. *Новые платиновые датчики температуры* / А. Маргелов // *Новости электроники*. – 2007. – № 1. – С. 12–15. – Режим доступа: <http://www.compeljournal.ru/enews/2007/1/6>, свободный.
6. *Технические характеристики резистора постоянного непровольного прецизионного P1-37, Элимком ТВС*. – Режим доступа: http://www.elmicom.ru/r1_37.shtml, свободный.

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ ТИПА «МЕТРАН»

А.П. Лапин, Ю.Н. Цыпина, Е.А. Лапина

Для разработчиков датчиков давления одной из наиболее важных проблем, является задача выбора функции преобразования (ФП) измерительного преобразователя [1]. От правильности выбора математической модели, принятой в качестве ФП, зависят метрологические характеристики датчика, а, следовательно, и его класс точности. Проведенные в этом направлении исследования [2], позволили сформулировать ряд рекомендаций по выбору ФП датчиков давления [3]. Однако, разработка новых моделей датчиков давления, с более высокими классами точности, чем у исследованных нами ранее, требует поиска иных вариантов выбора функции преобразования для таких датчиков.

Предлагаемый нами подход к решению изложенной выше задачи рассмотрим на примере построения двухфакторной ФП датчиков давления, где в качестве входных факторов выступают: давление, поступающее на вход датчика, и температура окружающей среды, в которой находится датчик. Функция преобразования строится в виде «обратной» градуировочной характеристики [4] на основе полинома пятой степени следующего вида:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \beta_3 t^3 + \beta_4 t^4 + \beta_5 t^5 + \beta_6 p + \beta_7 t + \beta_8 p t^2 + \beta_9 p t^3 + \beta_{10} p t^4 + \beta_{11} p^2 + \beta_{12} p^2 t + \beta_{13} p^2 t^2 + \beta_{14} p^2 t^3 + \beta_{15} p^3 + \beta_{16} p^3 t + \beta_{17} p^3 t^2 + \beta_{18} p^4 + \beta_{19} p^4 t + \beta_{20} p^5, \quad (1)$$

где Y – рассчитанное значение измеренного давления; p – выходной код АЦП сенсора (преобразователя) датчика по давлению; t – выходной код АЦП сенсора датчика по температуре; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{20}$ – коэффициенты функции преобразования (ФП), определяемые по методу наименьших квадратов.

Существующий опыт исследований показывает [5], что разным моделям датчиков давления, имеющим конструктивно различное исполнение, могут быть приписаны различные по сложности ФП, как частные случаи выражения (1). Используем методы регрессионного анализа [6] для построения функций преобразования датчиков давления разных конструкций.

1. Методы выбора «наилучшей» функции преобразования

Для выбора «наилучшей» функции преобразования предлагается использовать следующие методы регрессионного анализа:

1. Метод всех возможных регрессий. Это самая громоздкая процедура. Требует построения каждого из всех возможных регрессионных уравнений (функций преобразования).

2. Метод исключения. Состоит в последовательном уменьшении числа переменных в полном

уравнении до тех пор, пока не принимается решение об использовании уравнения с оставшимися членами.

3. Состоит в последовательном включении переменных по очереди в уравнение до тех пор, пока уравнение не станет удовлетворительным.

4. Является улучшенным вариантом метода включения. Улучшение состоит в дополнительном исследовании на каждой стадии переменных, включенных в уравнение на предшествующих стадиях. Переменная сохраняется в уравнении или исключается из него в зависимости от результатов проверки [6].

На основании предложенных методов разработаны четыре алгоритма статистического моделирования функций преобразования датчиков давления типа «Метран» для расчета, так называемых, «индивидуальных» функций преобразования для датчиков давления.

2. Алгоритм построения функций преобразования по методу всех возможных регрессий

1. Рассчитываются коэффициенты ФП (1) по методу наименьших квадратов [6].

2. Строятся все возможные ФП. Каждая переменная функции преобразования (1) может войти или не войти в них. Полагая, что коэффициент β_0 всегда содержится в ФП, будем иметь 2^{20} или 1 048 576 уравнений [7].

3. Определяется давление по каждой ФП – \hat{Y}_i , подставляя в каждую ФП рассчитанные коэффициенты, код давления, код температуры.

4. Каждая ФП оценивается с помощью критериев. Используется два критерия: остаточный средний квадрат s^2 и C_p -статистика. Эти критерии фактически связаны друг с другом. Выбор «наилучшей» ФП в таком случае делается на основе оценки наблюдаемой картины.

По первому критерию для каждой ФП вычисляется остаточный средний квадрат s^2 :

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{(n - p)}, \quad (2)$$

где n – число наблюдений; p – число оцениваемых параметров в уравнении регрессии (ФП); Y_i – давление на входе датчика; \hat{Y}_i – давление, рассчитанное по ФП.

Из всех ФП выбираем несколько (четыре) ФП с минимальным значением остаточного среднего квадрата.

По второму критерию для каждой ФП вычисляется C_p -статистика:

$$C_p = \frac{SS_e}{s^2} - (n - 2p), \quad (3)$$

где SS_e – остаточная сумма квадратов для ФП, содержащей p параметров:

$$SS_e = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2; \quad (4)$$

s^2 – остаточный средний квадрат для ФП, содержащей все параметры: $p = 21$.

Для адекватной функции преобразования график зависимости $C_p = f(p)$, где $p = 0 \dots 21$ – число оцениваемых параметров в ФП, будет иметь вид кривой, точки которой достаточно близко примыкают к прямой $C_p = p$. То есть «наилучшей» следует считать ФП, для которой разность $|p - C_p|$ должна иметь минимальное значение.

Схема алгоритма построения функции преобразования по методу всех возможных регрессий представлена на рис. 1.

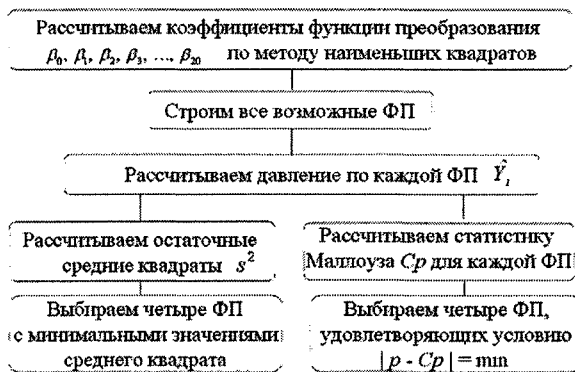


Рис. 1. Схема алгоритма построения ФП по методу всех возможных регрессий

3. Алгоритм построения функций преобразования по методу исключения

1. Рассчитываются коэффициенты ФП (1) по методу наименьших квадратов [6].

2. Строится ФП, включающая все параметры.

3. Рассчитывается величина частного F -критерия для каждого из параметров, как будто он был последним введен в ФП:

$$F = \frac{(R_{+j} - R_{-j})(n - p - 1)}{(1 - R_{+j})}, \quad (5)$$

где R_{+j} – коэффициент детерминации ФП с оцениваемым параметром; R_{-j} – коэффициент детерминации ФП без оцениваемого параметра.

Коэффициент детерминации ФП с оцениваемым параметром:

$$R_{+j} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2},$$

где Y_i – давление на входе датчика; \hat{Y}_i – давление, рассчитанное по ФП с оцениваемым параметром; \bar{Y} – общее среднее.

Коэффициент детерминации ФП без оцениваемого параметра:

$$R_{-j} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2},$$

где Y_i – давление на входе датчика; \hat{Y}_i – давление, рассчитанное по ФП без оцениваемого параметра; \bar{Y} – общее среднее.

4. Величина F -статистики сравнивается с критическим значением:

$$F_{кр}(1, (n - p - 1), 100 \cdot (1 - \alpha)), \quad (6)$$

где n – число наблюдений; p – число параметров в ФП; α – уровень значимости, %.

Если $F < F_{кр}$, то параметр, связанный с F , исключается из рассмотрения и производится перерасчет ФП с учетом оставшихся параметров. Если $F > F_{кр}$, то ФП остается без изменения.

Схема алгоритма построения функции преобразования по методу исключения представлена на рис. 2.

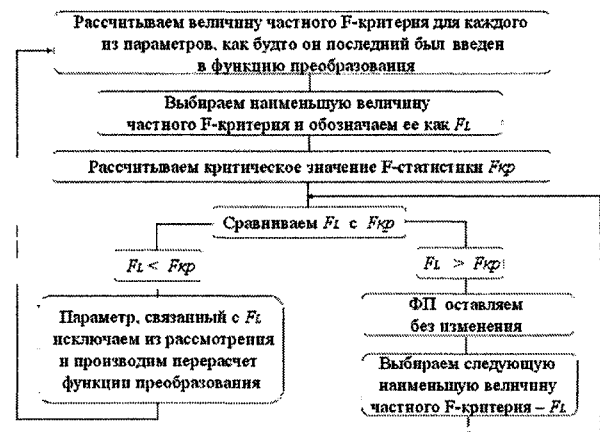


Рис. 2. Схема алгоритма построения ФП по методу исключения

4. Алгоритм построения функций преобразования по методу включения

1. Рассчитываются коэффициенты ФП (1) по методу наименьших квадратов [6].

2. Определяются частные коэффициенты корреляции для всех параметров r_{km} [8]:

$$r_{km} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{ki} - \bar{X}_k)(X_{mi} - \bar{X}_m)}{\left(\sum_{i=1}^n (X_{ki} - \bar{X}_k)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{i=1}^n (X_{mi} - \bar{X}_m)^2 \right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (7)$$

где X_{ki} , $X_{mi} = t_i, t_i^2, t_i^3, \dots, p_i t_i, \dots, p_i^5$; $k = 1 \dots 20$, $m = 1 \dots 20$, $i = 1 \dots n$.

3. Выбирается параметр с наибольшим значением частного коэффициента корреляции и находим ФП порядка.

4. Проверяется значимость ФП с помощью полного F -критерия.

Определяется значение F -статистики:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{s^2}, \quad (8)$$

где \hat{Y}_i – давление, рассчитанное по ФП; \bar{Y} – общее среднее; s^2 – остаточный средний квадрат для ФП (2).

Величина F -статистики (8) сравнивается с критическим значением (6). Если $F < F_{кр}$, то параметр, связанный с F , исключается из рассмотрения и производится перерасчет ФП. Если $F > F_{кр}$, то рассматриваемый параметр, включается в ФП.

5. Определяем коэффициенты корреляции для всех параметров, ранее не включенных в ФП, с откликом $r_{X_i Y}$:

$$r_{X_i Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{ji} - \bar{X}_j)(Y_i - \bar{Y})}{\left(\sum_{i=1}^n (X_{ji} - \bar{X}_j)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (9)$$

где $X_{ji} = t_i, t_i^2, t_i^3, \dots, p_i t_i, \dots, p_i^5$; $j = 0 \dots 20$ – порядковый номер параметра в ФП (1), $i = 1 \dots n$ – номер наблюдения.

6. Выбираем параметр с наибольшим значением коэффициента корреляции с откликом и включаем в ФП.

7. Рассчитывается величина частного F -критерия для каждого из параметров, как будто он был последним введен в ФП (5). Величина F -статистики (5) сравнивается с критическим значением (6). Если $F < F_{кр}$, то параметр, связанный с F , исключается из рассмотрения и производится перерасчет ФП. Если $F > F_{кр}$, то рассматриваемый параметр, включается в ФП.

Схема алгоритма построения функции преобразования по методу включения представлена на рис. 3.

5. Алгоритм построения функций преобразования по шаговому методу

Несмотря на другое название, этот метод, по существу, есть улучшенный вариант метода включения. Улучшение состоит в дополнительном исследовании на каждой стадии параметров, включенных в ФП на предшествующих стадиях. Соответствующий параметр сохраняется в ФП или исключается из нее в зависимости от результатов проверки. Такая проверка «наименее полезного параметра в ФП на данном этапе» проводится на каждом шаге этого метода. Может оказаться, что параметр, который на предыдущем шаге был наилучшим кандидатом для включения в ФП, на бо-

лее позднем шаге оказывается ненужным. Это может быть вызвано теми связями, которые существуют между этой и другими параметрами, содержащимися теперь в ФП. Чтобы проверить это, на



Рис. 3. Схема алгоритма построения ФП по методу включения

каждом шаге, для каждого параметра, содержащегося в ФП, вычисляется частный F -критерий (5) и находится наименьший из них (он может быть связан с любым параметром, включенной в ФП только что или ранее), который затем сравнивается с заранее выбранной процентной точкой соответствующего F -распределения (6). Это позволяет судить о вкладе наименее ценного параметра в регрессию на данном шаге в предположении, что она только что была введена в ФП безотносительно к тому, как это было на самом деле. Если проверяемый параметр показывает незначимый вклад в регрессию, она исключается из ФП. После этого ФП пересчитывается с учетом всех оставшихся в ней параметров. Наилучшие параметры из тех, которые не вошли на данном шаге в ФП (т.е., для которых коэффициент частной корреляции с откликом Y при наличии параметров в уравнении получился наибольшим), затем проверяются, чтобы убедиться, удовлетворяют ли они частному F -критерию для включения. Если удовлетворяют, их включают в ФП и снова возвращаются к проверке всех частных F -критериев для параметров ФП. Если же они не выдерживают этой проверки, переходят к следующей операции исключения. В конечном счете (если только уровень значимости α не выбран плохо, что приводит к закликиванию) процесс прекращается, если никакие из параметров, содержащихся в текущей ФП, не удастся исключить из него, а ближайший наилучший параметр-претендент не в состоянии занять место в ФП. Обычно лучше выбирать одинаковые уровни значимости α для включения и исключения.

Схема алгоритма построения функции преобразования по шаговому методу представлена на рис. 4.

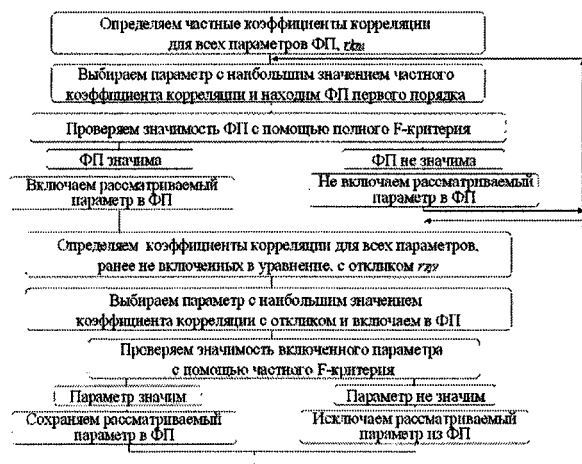


Рис. 4. Схема алгоритма построения ФП по шаговому методу

6. Методика формирования функции преобразования

1. Составляется партия из датчиков давления одной модели.

2. Рассчитываются ФП вида (1) для каждого датчика из партии.

3. Рассчитываются, так называемые, «индивидуальные» ФП по методам всех возможных регрессий, исключения, включения и по шаговому методу для каждого датчика.

4. На основе полученных «индивидуальных» ФП формируется, так называемая, «общая» ФП исследуемой модели датчика.

5. Проверяется пригодность «общей» ФП для каждого датчика из партии (определяются приведенная погрешность, дисперсия адекватности, погрешность от нелинейности, температурная погрешность).

6. Проверяется «общая» ФП для датчиков исследуемой модели из других партий (определяются приведенная погрешность, дисперсия адекватности, погрешность от нелинейности, температурная погрешность).

Заключение

Предложенный выше подход к выбору функции преобразования датчиков давления проверен на данных ряда стендовых испытаний. Полученные результаты подтвердили выдвинутые нами предположения о различных функциях преобразования датчиков давления, имеющих конструктивно различное исполнение.

Литература

- ГОСТ 8.009-84. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. Государственная система обеспечения единства измерений. Межгосударственный стандарт. Группа Т 80. – М.: Изд. стандартов, 1988. – 38 с.
- Латин, А. П. Концепция комплексного исследования метрологических характеристик датчиков давления «Метран» / А. П. Латин, Д. В. Мысляева, Е. Е. Филиппова и др. // Практика приборостроения. – 2002. – № 1. – С. 38–41.
- Латин, А. П. Статистическое исследование функции преобразование датчиков давления ПГ «Метран» / А. П. Латин, Л. Ф. Нигамова, Е. Е. Чипеева // Информационные, измерительные и управляющие системы и устройства. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. – С. 188.
- Семенов, Л. А. Методы построения градуировочных характеристик средств измерений / Л. А. Семенов, Т. Н. Сирая. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 128 с.
- Латин, А. П. Исследование многофакторной функции преобразования датчиков давления ПГ «Метран» / А. П. Латин, Е. Е. Филиппова // Приборостроение: Тематический сборник научных трудов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – С. 176.
- Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ: В 2-х т.: Т. 1. – 2-е изд. / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 366 с.
- Сборник задач по математике для вузов. Специальные курсы. – М.: Наука, 1984. – 608 с.
- Дрейпер, Н., Прикладной регрессионный анализ: В 2-х т.: Т. 2. – 2-е изд. / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 351 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ФУНКЦИЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ

А.Е. Попов, А.В. Лазуков

Спрос на высокоточные приборы контроля и измерения давления растет в связи с развитием промышленного производства и расширением сферы услуг в нашей стране. Область применения датчиков давления достаточно широка – системы автоматического контроля, регулирования и управления технологическими процессами, где необходимо обеспечение непрерывного измерения различных величин – избыточного давления, абсолютного давления, разности давлений, гидростатического давления нейтральных и агрессивных сред.

В последние годы уделяется большое внимание производству датчиков с повышенными точностными характеристиками. В ряде случаев очень точное измерение давления позволяет сократить убытки при исчислении сырья в нефтегазовой промышленности, повысить качество продукции металлургической и химической промышленности за счет применения высокоточного дозирования. Выпуск фирмой-производителем высокоточного датчика является очень хорошим маркетинговым ходом. В силу этих и ряда других причин актуальной является задача повышения точности измерителя давления.

1. Принцип действия датчика давления

В интеллектуальных измерительных приборах используется микропроцессор, который содержит информацию об определенных характеристиках сенсора, соответствующих входному давлению и температуре. Электронный блок датчика компенсирует отклонения этих параметров сенсора. Процесс определения совокупности параметров сенсора называется заводской характеристикой.

Преобразование данных в любом интеллектуальном измерителе давления может быть представлено следующими четырьмя этапами:

1. Изменение давления отслеживается посредством изменения выхода сенсора (сигнал сенсора давления).

2. Поскольку измеряемое давление существенно зависит от температуры, то параллельно происходит съём информации с температурного сенсора (сигнал сенсора температуры).

3. Сенсорные сигналы преобразуются в цифровой формат, понятный микропроцессору (аналого-цифровое преобразование сигналов).

4. Микропроцессор, оперируя полученными кодами давления и температуры, выполняет коррекцию сигнала, чтобы получить цифровое представление давления в требуемых единицах измерения (цифровой ТП).

2. Линеаризация характеристики

Необходимость процедуры линеаризации статической характеристики сенсора возникает в силу того, что применяемые в приборах измерения давления тензопреобразователи характеризуются нелинейностью функций преобразования. Линеаризация заключается в решении обратной задачи определения преобразуемого давления по значению выходного сигнала сенсора в виде кода давления и кода температуры. В настоящее время имеют широкое распространение методы линеаризации, основанные на применении аппроксимирующих функций (АФ). Содержательная сущность задачи линеаризации экспериментальных данных заключается в том, чтобы, используя ту или иную известную вещественную функцию, описать зависимость переменных и сделать это таким образом, чтобы точность полученного описания удовлетворяла предъявляемым к ней требованиям.

3. Проведение эксперимента

Исходными данными для исследования являлись экспериментально установленные зависимости кода температуры и кода давления от задаваемого при различных температурах давления. При проведении эксперимента использовалось следующее метрологическое оборудование: калибратор давления пневматический «Воздух 504», класса точности 0,02; термокамера «Low Temperature Chamber Model MC71W», с точностью задания температуры 1 °С.

4. Алгоритм аппроксимации

В данном случае для решения задачи аппроксимации необходимо найти аналитическое выражение поверхности, проходящей как можно ближе к экспериментальным точкам. Решая данную задачу можно руководствоваться различными подходами.

Известны равномерный Q_1 и среднеквадратический Q_2 критерии оптимизации:

$$Q_1 = \max |r(t, a)|; \quad (1)$$

$$Q_2 = \int_{t_0}^T (r(t, a))^2 dt. \quad (2)$$

Критерий (1) соответствует максимальному значению погрешности аппроксимации, называемому обычно погрешностью воспроизведения.

Вследствие интегрального характера критерия (2) погрешность аппроксимации в отдельных точках может достигать значительной величины [1].

Однако в целом данный критерий хорошо подходит для решения поставленной задачи. Из-за простоты реализации этот критерий получил наибольшее распространение [2].

В качестве аппроксимирующей функции был выбран алгебраический полином. Данный полином имеет следующий вид:

$$P(U) = a_0 + a_1U + \dots + a_nU^n.$$

Достоинством алгебраических полиномов является их предельная простота. Исходя из положений первой теоремы Вейерштрасса, известно, что выбирая полином достаточно большого порядка, можно аппроксимировать экспериментальную кривую со сколь угодно высокой точностью.

Недостатком является то, что при увеличении порядка полиномов задача определения их коэффициентов становится некорректной задачей в силу того, что матрица коэффициентов СЛАУ становится плохо обусловленной, а её решение оказывается чрезмерно чувствительным к ошибкам задания элементов матрицы и ошибкам вычислений.

При переходе к двухпараметрической аппроксимации математическая модель сенсора (третий порядок по температуре и второй порядок по давлению) принимает вид:

$$P(U) = A_0 + A_1U_1 + A_2U_1^2 + A_3U_1^3;$$

$$A_i = a_{0i} + a_{1i}U_2 + a_{2i}U_2^2,$$

где U_1 – код давления, U_2 – код температуры.

Перейдем к рассмотрению алгоритма реализации метода наименьших квадратов, позволяющего вычислить коэффициенты аппроксимирующего полинома:

1. На основе экспериментальных данных формируется матрица

$$V = \begin{bmatrix} x_1^n & x_1^{n-1} & \dots & x_1 & 1 \\ x_2^n & x_2^{n-1} & \dots & x_2 & 1 \\ \dots & \dots & \ddots & \dots & 1 \\ x_{N-1}^n & x_{N-1}^{n-1} & \dots & x_{N-1} & 1 \\ x_N^n & x_N^{n-1} & \dots & x_{N-1} & 1 \end{bmatrix}.$$

где N – число экспериментальных точек, n – порядок аппроксимирующего полинома.

2. Матрица системы линейных алгебраических уравнений рассчитывается по формуле:

$$A = V^T V.$$

3. Вектор правой части системы линейных уравнений вычисляется следующим образом:

$$z = V^T y,$$

где y – вектор-столбец задаваемого давления.

4. Решается система линейных алгебраических уравнений

$$Ap = z.$$

Вектор корней СЛАУ p является набором искомых коэффициентов.

Описанный алгоритм решает одномерную задачу аппроксимации, но после небольшой доработки, связанной с формированием элементов матрицы V , может быть применен к двумерному случаю.

В качестве математической модели сенсора можно брать алгебраические полиномы различных порядков. Наиболее употребительной в настоящее время комбинацией является третий порядок по давлению и второй порядок по температуре. Находит применение также пятый порядок по давлению и четвертый порядок по температуре. Однако в силу индивидуальных особенностей сенсора эффективными могут оказаться и другие варианты.

5. Выбор порядка полинома

Поставим задачу нахождения оптимальных степеней для сенсора со снятыми экспериментальными зависимостями. Для этого методом наименьших квадратов решим задачу аппроксимации с различными комбинациями порядков полиномов. Будем рассматривать третий, четвертый, пятый порядок по давлению и второй, третий, четвертый порядок по температуре. Затем для каждого варианта найдем числовые оценки качества линеаризации. Для оценки качества традиционно используют два значения: максимальная абсолютная ошибка и среднеквадратическое отклонение.

Представленный выше алгоритм нахождения коэффициентов легко реализуется с использованием любого современного языка программирования. Воспользуемся молодым, но уверенно набирающим популярность языком C# от компании Microsoft.

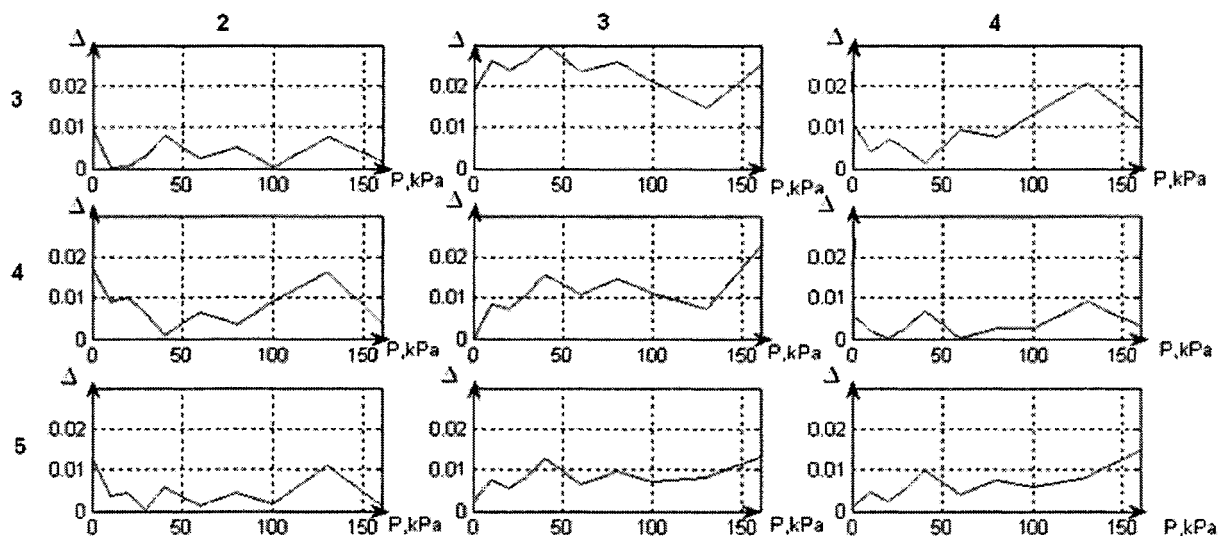
Наглядная иллюстрация полученных результатов даётся с помощью графической зависимости величины абсолютной ошибки от задаваемого давления при 20 °С, представленная на рисунке. Три графика в первой строке построены при аппроксимации третьей степенью по давлению, во второй строке – четвертой степенью по давлению, в третьей – пятой степенью по давлению.

Для более точного выбора степеней полиномов обратимся к числовым характеристикам, оценивающим качество аппроксимации. Рассчитаем величину максимальной абсолютной ошибки, среднеквадратическое отклонение и представим полученные данные в табличной форме (см. таблицу).

Заключение

Из приведенной серии графиков видно, что при использовании различных порядков полиномов получают математические модели, описывающие экспериментальные данные с различным качеством. Видно, что хорошие результаты получены при использовании второго порядка по температуре в совокупности с третьим и пятым по-

порядок по температуре:



Абсолютная ошибка при различных порядках полиномов

Числовые оценки качества аппроксимации

Порядок по температуре	Порядок по давлению	Число коэффициентов модели	Максимальная абсолютная ошибка	СКО
2	3	12	0,009455	0,003984
	4	15	0,017626	0,009242
	5	18	0,012733	0,004863
3	3	16	0,030310	0,023911
	4	20	0,022607	0,011661
	5	24	0,013098	0,008581
4	3	20	0,020620	0,009839
	4	25	0,008825	0,003731
	5	30	0,015141	0,007190

рядком по давлению. Так же хорошее качество аппроксимации достигается при использовании четвертых порядков.

Из анализа таблицы видно, что в данном конкретном случае наиболее целесообразно использовать четвертый порядок по давлению и четвертый порядок по температуре. Однако применение данной комбинации сопряжено с использованием 25 коэффициентов, что в ряде случаев может оказаться недопустимым.

Литература

1. Зоркальцев, В. И. Метод наименьших квадратов / В. И. Зоркальцев. – Новосибирск: ВО «Наука», 1995. – 220 с.
2. Попов, Б. А. Приближение функций для технических приложений / Б. А. Попов, Г. С. Теслер. – Киев: Наукова Думка, 1980.
3. ГОСТ 8.207-76. ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения. – М.: Издательство стандартов, 1976. – 9 с.

МЕТОДИКА АССОЦИАТИВНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ОНТОЛОГИЙ КОРПОРАТИВНОГО ЗНАНИЯ

И.Л. Кафтаников, Н.В. Пименова

Вопросы компьютерного получения, интеграции, сохранения и воспроизведения корпоративных (общественных) знаний и адекватной, согласованной их интерпретации и субъектами формирующими и использующими корпоративные знания, а также вопросы организации взаимодействия в системе человек–компьютер становятся все более актуальными.

Опираясь на [1], можно описать передачу одним человеком другому представления некоторой ситуации S_i как

$$T_{j,i} = q_j(f_j(m_j(S_i))),$$

где m_j – некоторый оператор отображения ситуации в сознании человека; f_j – оператор репрезентации ситуации в сознании; q_j – оператор отображения репрезентации в символьной коммуникативной системе, например текстовой.

Естественно, что операторы q , f , m – индивидуальны, причем в настоящее время нет каких-либо формальных моделей, описывающих эти операторы.

Преобразования в искусственных нейронных структурах нельзя считать моделями данных операторов в силу существенных различий в функционировании биологических и искусственных систем.

Поэтому закономерен вопрос исследования способов получения некоторого приближения указанных операторов. Это приближение можно попытаться получить в рамках двух направлений:

- используя методы внешнего исследования различных интерпретаций предъявляемых ситуаций с точки зрения информационных преобразований, формировать алгоритмические модели таких преобразований и исследовать их свойства;

- используя полученные алгоритмические модели разрабатывать нейронные структуры, с одной стороны более приближенные к реальным биологическим структурам (например, с дендрит-дендритными, аксон-аксонными или смешанными связями), с другой – адекватные по преобразованиям полученным алгоритмическим моделям.

При корпоративном подходе к формализации знаний и автоматизации работы с ними определение некоторой предметной области (ПО) в настоящее время решается посредством, например, онтологий. Тезаурус понятий и отношений в конкретной онтологии определяется постоянной или переменной группой экспертов. При этом также возникает вопрос о степени восприятия полученной онтологии конкретным экспертом или пользователем, поскольку онтологии и языки над ними предназначены в первую очередь для семиотической формализации автоматизации обработки знаний.

В рамках первого из указанных направлений на кафедре ЭВМ ЮУрГУ проводился ряд экспериментов по анализу соотношений индивидуального $T_j = \{t_{jk}\}$ и группового $T_D = \{T_j\}$ знания (терминологического состава какой-либо предметной области T_D). При этом анализ проводился раздельно по объектам (понятиям) и взаимосвязи между объектами (отношения, действия).

Первый набор экспериментов показал, что терминологический объем ПО экспертов существенно различен, также

$$|\cap T_j| < |T_j| < |\cup T_j|,$$

и $|\cap T_j|$ отличается от $|\cup T_j|$ более чем на два порядка для групп (по 15–25 человек) экспертов (студенты различных курсов) в каждой. Также существенно отличаются и T_j от T_D . Вследствие этого авторами разработана методика ассоциирования термина с ПО и применения мажоритарного принципа включения терминов в тезаурус онтологии. Методика реализует некоторый компромисс между уровнем объективности и вероятностью успешности процесса построения T_D^E группой экспертов E .

Данная методика представляет собой последовательность ряда этапов, в частности:

1. Построение функции принадлежности терминов временной обобщенной терминологии T_{Dim}^E предметной области D группы E терминологии $T_D^{e_i}$ предметной области D эксперта e_i :

$$f_{e_i}^{e_i} : T_{Dim}^E \rightarrow B,$$

где $B = \{0, 1\}$, а $f_{e_i}^{e_i}$ – полная функция, определяемая как

$$f_{e_i}^{e_i}(t_{Dimk}^E) = \begin{cases} 1, & \text{если } t_{Dimk}^E \in T_D^{e_i}; \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где $t_{Dimk}^E \in T_{Dim}^E$, $k = 1, \dots, |T_{Dim}^E|$.

2. Определение весового коэффициента включенности терминов в результирующее множество T_D^E :

$$f_w : T_{Dim}^E \rightarrow W,$$

где $W = \{0, 1, \dots, n\}$, $n = |E|$.

Здесь W – множество возможных значений весовых коэффициентов, f_w – полная функция, заданная в виде:

$$f_w(t_{Dimk}^E) = \sum_{i=1}^n f_{\epsilon}^{e_i}(t_{Dimk}^E),$$

где $t_{Dimk}^E \in T_{Dim}^E, k = 1, \overline{|T_{Dim}^E|}$.

3. Построение результирующей терминологии T_D^E предметной области D группы экспертов E :

$$T_D^E = \left\{ t_{Dimk}^E : f_{thr}(f_w(t_{Dimk}^E)) = 1, t_{Dimk}^E \in T_{Dim}^E, k = 1, \overline{|T_{Dim}^E|} \right\}.$$

При этом варьирование порогового значения функции thr позволяет добиться соотношения между уровнем объективности и вероятностью успешности процесса построения T_D^E , оптимального с точки зрения поставленной задачи.

Эта методика также позволяет оценить субъективность терминологического представления D экспертом. На рис. 1 представлены графики, отражающие субъективность терминологии отдельно взятого эксперта и общей терминологии D (при значениях порога до 60 %).

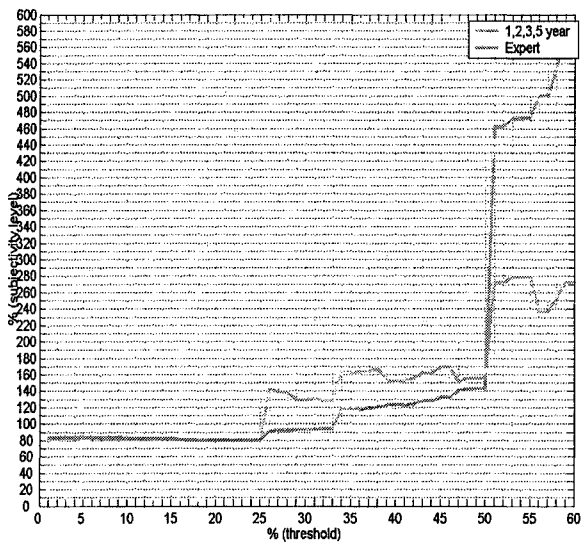


Рис. 1. Уровни субъективности

Из графиков видно, что субъективность терминологии конкретного эксперта определяемая относительно общей терминологии имеет существенную нелинейную зависимость от значения порога. В тоже время анализ множества графиков показывает определенную схожесть зависимостей индивидуальных субъективностей, а это позволяет получить определенные критерии оптимизации при кластеризации совокупного действия операторов m_j, f_j, q_j .

Интересно, что сравнение частотного распределения наборов терминов полученного экспертами по запросам поисковых машин (Яндекс, Рамблер, Google) показало:

- значительный разброс частот включения одного термина для разных поисковиков (как не-

который машинный аналог комплексного оператора $\langle m_j, f_j, q_j \rangle$, рис. 2;

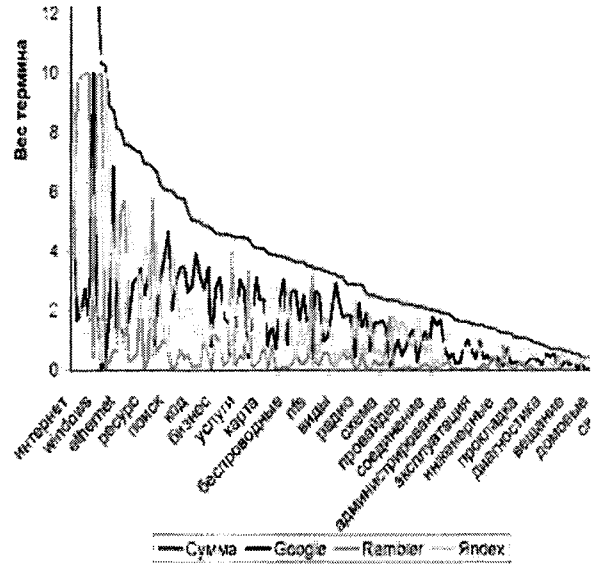


Рис. 2. Частоты включения терминов

- отсутствие корреляции между частотами включения терминов при экспертном и машинном формировании терминологической базы – рис. 3.

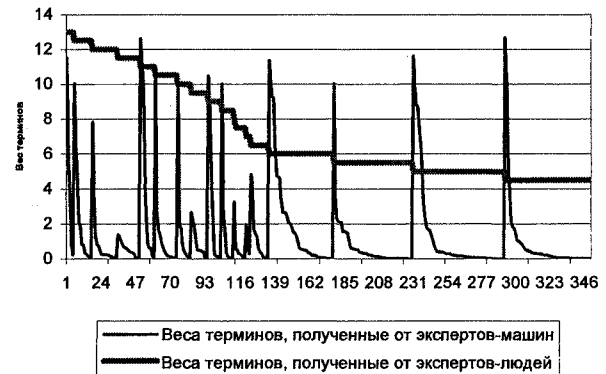


Рис. 3. Частотное распределение терминологических баз одной ПО

Во второй группе экспериментов определялась взаимосвязь терминов на квадратной матрице отношений, аналогичной матрице принадлежности.

Тип взаимосвязи – бинарный. Результаты также показали существенное различие между представлениями экспертов о некоторой ПО, причем ПО имела непосредственное отношение к их профессиональной деятельности.

На рис. 4 представлены матрицы взаимосвязи двух разных, произвольно выбранных экспертов.

Анализ результатов показывает, что основной проблемой является не оценка тезауруса субъекта по отношению к групповому, – здесь можно использовать предложенный авторами мажоритарный принцип на метрике \mathcal{R}^+ – а определение метрики оценки взаимосвязи понятий.

Авторы предлагают использовать для оценки взаимосвязи двухкомпонентную оценку:

	понятие	информатика	история	развитие	место	фундаментальный	наука	технология	аспект	измерение
понятие	1									
информатика		1								
история			1	1						
развитие				1	1					
место					1					
фундаментальный						1	1		1	
наука							1	1	1	1
технология								1	1	1
аспект									1	
измерение										1
понятие	1	1	1				1	1		
информатика	1	1				1	1	1		
история	1		1	1	1	1	1			
развитие			1	1		1	1	1		
место				1	1					1
фундаментальный		1	1	1		1	1	1		
наука	1	1	1	1		1	1	1	1	
технология	1	1		1		1	1	1		
аспект					1		1		1	
измерение										1

Рис. 4. Матрицы взаимосвязи

Во-первых, через среднее значение весовых коэффициентов включенности терминов в результирующее множество $T_D^E : f_w^E = 1/2(f_w^i + f_w^j)$.

Во-вторых, через частотные коэффициенты f_v ассоциированной включенности взаимосвязи, аналогично получаемые на представленных бинарных матрицах по описанному мажоритарному принципу.

Конечно, можно вводить индивидуальные коэффициенты «важности» терминов и взаимосвязей, однако это будет мешать непосредственному ассоциированию терминов и взаимосвязей.

Окончательно, оценка взаимосвязи определяется как $O_{v,w} = f_v f_w^{i,j}$.

При данных условиях можно установить не только наличие связей в онтологии но оценить их существенность, то есть существенность приобретает числовое значение.

Применяя описанный подход можно далее определять пересечение, объединение онтологий, а также изучать субъективность восприятия ПО конкретными субъектами.

Литература

1. Гаврилова, Т. А. Извлечение и структурирование знаний для экспертных систем / Т. А. Гаврилова, К. Р. Червинская. – М.: Радио и связь, 1992.

О РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ С ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКОЙ

*И.В. Гришин, Е.И. Манкевич, К.В. Телегина,
А.С. Шелудько, В.И. Ширяев*

Задача построения математических моделей и прогнозирования процессов различной природы является давней, но актуальной до сих пор. До недавнего времени она решалась построением стохастических регрессионных моделей с помощью методов математической статистики. При этом источником неточных прогнозов считалось влияние случайных факторов. Однако, наблюдаемые статистические характеристики таких случайностей, отличающиеся от теоретических, («толстые хвосты» распределений, острые пики) стали причиной изучения данных факторов, как следствия функционирования детерминированной динамической системы. В этой связи, одними из самых активно развивающихся и широко обсуждаемых стали методы нелинейной динамики [7, 12, 18, 20–22, 28, 37]. Моделирование в них осуществляется нелинейными (в том числе многомерными) разностными уравнениями (отображениями)

$$x_{n+1} = F(x_n, c) \quad (1)$$

и дифференциальными уравнениями

$$dx/dt = F(x, c), \quad (2)$$

где x – D -мерный вектор состояния, F – вектор-функция, c – P -мерный вектор параметров, n – дискретное время, t – непрерывное время. Примеры успешного их использования известны в радиотехнике и криптографии [4, 29, 35], медицине [23, 27, 41], экономике [2, 9, 22, 25, 28, 39, 40] и других областях науки и техники [32, 42–45, 47, 48].

Традиционная модель создается с учетом всех наиболее существенных факторов, влияющих на поведение системы. Структура модели, в этом случае, определяется причинно-следственными связями исследуемых факторов. Источником такой информации могут быть фундаментальные законы природы, априорные знания об объекте моделирования.

Если о структуре модели заранее ничего не известно, остается надеяться на универсальные конструкции, которые, как правило, содержат очень много параметров. Трудности со скрытыми переменными в таком случае непреодолимы, поэтому временные ряды всех динамических переменных модели должны быть измерены или получены по наблюдаемым. Далее приходится строить многомерную модель вида (1) или (2), где в качестве функции многих переменных F выбрана одна из универсальных конструкций с множеством неизвестных параметров. Оценку множества параметров реально проводить обычным МНК или фильтром Калмана, при этом для упрощения желательно, чтобы функция F зависела от параметров

линейно. Очень много усилий исследователей ушло на поиск универсальных подходов к решению такой задачи. Задача моделирования существенно усложняется, если наблюдения за системой ограничиваются одномерной реализацией одной из ее координат, как правило, в присутствии шумов.

1. Диагностика хаотических процессов

Одним из достаточно простых и эффективных методов анализа временных рядов является так называемый R/S -анализ. Этим методом анализируются ряды метеорологических и геофизических наблюдений – колебания температуры, давления, количества выпавших осадков, вариации магнитного поля Земли и др. Метод устойчив, содержит минимальные предположения о системе, продуцирующей ряд, и его с успехом можно использовать для классификации временных рядов. Характеристикой хаотичности ряда выступает показатель Херста H , который может быть выражен через размах R изменений значений исследуемого сигнала на отрезке времени Δt и рассчитанное для этого отрезка стандартное отклонение S : $H = \ln(R/S) / \ln(\Delta t)$ [28].

Значения $H \geq 2/3$ определяют собой черный цвет шума. Чем больше значение $H \in [2/3; 1]$, тем большая трендоустойчивость присуща соответствующему отрезку временного ряда. Значения H в окрестности $\sim 0,5 \pm 0,1$ определяют собой область белого шума, который соответствует «максимальной хаотичности» и, следовательно, наименьшей прогнозируемости. Значения H в окрестности $\sim 0,3 \pm 0,1$ определяют собой область розового шума. Розовый шум говорит о присущему рассматриваемому отрезку временного ряда свойству антиперсистентности [28], которое означает, что ряд реверсирует чаще, чем ряд случайный (частый возврат к среднему). Значения H в окрестности меньше 0,1 определяют собой область коричневого шума, который соответствует максимальной фрактальной размерности и полной неопределенности в отношении прогнозируемости. Рассматриваемые в настоящей работе временные ряды отличаются черным шумом.

2. Методы восстановления динамических систем из временных рядов

Если аппроксимирующая функция F задается с помощью единой формулы во всем диапазоне изменений аргумента, как в случае многочлена, то аппроксимацию (и модель) называют глобальной.

Альтернативным и часто не менее эффективным является локальный (кусочный) подход, когда аппроксимирующая функция задается некоторой (чаще простой) формулой, но со своим набором параметров для каждой небольшой области значений аргумента. Наиболее популярные примеры – кусочно-постоянные и кусочно-линейные аппроксимации и кубические сплайны. Локальные модели лучше описывают менее гладкие зависимости с изломами и разрывами. Но они более чувствительны к действию шума, чем глобальные с не очень большим числом параметров. Поэтому локальные модели лучше при большом объеме данных и низком уровне шумов для сколь угодно сложной нелинейности, а глобальные модели имеют преимущества при меньшем объеме данных и более высоком уровне шума для систем с не очень сложной нелинейностью.

2.1. Выбор вектора состояния

Предположим, что наблюдаемая величина y порождается некоторой динамической системой и является либо одной из ее переменных состояний, либо скалярной функцией от них. Задача состоит в том [1], чтобы, во-первых, по одномерному временному ряду восстановить фазовый портрет (аттрактор) изучаемой системы, во-вторых, восстановить динамические уравнения, в каком-то приближении описывающие поведение исходной системы.

Для решения первой задачи в [46] был предложен метод задержки, согласно которому вектор состояния восстанавливался по формуле

$$Y = \{y(t), y(t + \Delta'), y(t + 2\Delta'), \dots, y(t + (N-1)\Delta')\}, \quad (3)$$

где N – размерность вложения, Δ' – задержка вложения. Для дискретного векторного ряда задержка вложения выражается через целое число k шагов дискретизации $\Delta' = k\Delta$, а вектор состояния записывается следующим образом:

$$Y_j = \{y_j, y_{j+k}, y_{j+2k}, \dots, y_{j+(N-1)k}\}. \quad (4)$$

Такенс [49] углубил этот результат, показав, что в отсутствие шумов и при размерности вложения $N \geq 2d + 1$, где d – фрактальная размерность исследуемой хаотической системы, множество (3) топологически эквивалентно аттрактору системы. Теорема Такенса подготовила почву для построения алгоритмов предсказания хаотических процессов с использованием сведений о динамической природе наблюдаемого ряда.

Вектор состояния (3) имеет преимущество при построении конечно-разностных уравнений (1), описывающих исследуемую систему. Для большинства физических систем, которые описываются не разностными, а дифференциальными уравнениями, в качестве вектора состояния вместо (3) удобнее брать совокупность производных исследуемого процесса

$$Y' = \{y^{(0)}, y^{(1)}, \dots, y^{(N)}\}. \quad (5)$$

Фактически производные $y^{(n)}$ наблюдаемого процесса y вычисляются через конечные разности, скажем при отсутствии шумов

$$y^{(n+1)}(t) = [y^n(t + \Delta) - y^{(n)}(t)] / \Delta. \quad (6)$$

Погрешность вычисления производной для данной схемы составляет $O(\Delta)$. Точность можно увеличить, если перейти к схеме

$$y^{(n+1)}(t) = [y^n(t + \Delta) - y^{(n)}(t - \Delta)] / 2\Delta. \quad (7)$$

Для нее погрешность составляет $O(\Delta^2)$. Однако в обоих упомянутых случаях предполагается, что шумы в системе отсутствуют.

При наличии шумов погрешности дифференцирования с помощью формул (6) или (7) будут очень велики. Поэтому на практике используют другие методы расчета производных, которые связаны с усреднением шума.

Например, будем использовать следующий подход. Для расчета производной в момент времени t_j используется m значений наблюдаемой величины в окрестности t_j . Предпочтительнее использовать нечетное значение m , так как тогда используется равное количество значений слева и справа от рассматриваемой точки:

$\{y(t_{j-(m-1)/2}), \dots, y(t_{j-1}), y(t_j), y(t_{j+1}), \dots, y(t_{j+(m-1)/2})\}$ (центрированная схема). Этот «короткий ряд» из m значений (наблюдаемая реализация в окрестности точки t_j) на основании разложения в ряд Тейлора аппроксимируется полиномом определенной степени. Значение производной $y^{(n+1)}(t_0)$ определяется как значение $(n+1)$ производной полинома данной точке.

Чем выше уровень шума, тем большее значение m следует выбирать. Отметим, что точность вычисления производной зависит также от такого параметра, как количество измеренных значений на характерном периоде колебаний. Опыт показывает, что если на один период приходится менее 30–40 точек, то точность вычисления производной не велика; желательно, чтобы было не менее 100 точек на периоде.

2.2. Оценка размерности системы

Важным элементом восстановления уравнений динамики по экспериментальным данным является оценка размерности исследуемого процесса, то есть оценка числа степеней свободы вовлеченных в динамический процесс. Хаотические аттракторы характеризуются фрактальной размерностью d , вычисление через показатель Херста которой возможно с помощью следующим образом:

$$d = 2 - H. \quad (8)$$

Обе величины характеризуют независимую случайную систему. Величина $0,5 < H < 1$ будет соответствовать фрактальной размерности, более

близкой к кривой линии. Это персистентный временной ряд, дающий более гладкую, менее зазубренную линию, нежели случайное блуждание. Антиперсистентная величина H ($0 < H < 0,5$) дает соответственно более высокую фрактальную размерность и более прерывистую линию, чем случайное блуждание, и, следовательно, характеризует систему, более подверженную переменам.

Располагая фрактальной размерностью d , можно оценить размерность вложения N по формуле Такенса $N \geq 2d + 1$, хотя эта оценка часто оказывается завышенной и можно ограничиться пространством меньшей размерности. В этих условиях часто прибегают к упрощенным оценкам размерности вложения, используя, например, метод ложных ближайших соседей, корреляционную размерность, метод главных компонент. Во всех случаях оценка размерности выступает как экспериментальная величина. Обычно приходится перебирать разные значения размерности, начиная с малых и постепенно их увеличивая, пока не будет достигнута удовлетворительная модель или насыщение результатов.

2.3. Вид уравнений системы

Оценив размерность системы можно приступить к подгонке модельного уравнения к временным рядам. В рамках процедуры реконструкции вектор-функция F из уравнения (1) представляется в виде разложения по некоторому базису, ограничиваясь конечным числом членов разложения. В простейшем случае задание F может осуществляться полиномами степени ν

$$F_j(x_i) = \sum_{l_1, l_2, \dots, l_n=0}^{\nu} C_{j, l_1, l_2, \dots, l_n} \prod_{k=1}^n x_{k,i}^{l_k}, \quad \sum_{k=1}^n l_k \leq \nu, \quad (9)$$

где $C_{j, l_1, l_2, \dots, l_n}$ – неизвестные коэффициенты, которые требуется найти. Для нахождения коэффициентов (9) необходимо решить систему N линейных алгебраических уравнений

$$x_{j,i+1} = \sum_{l_1, l_2, \dots, l_n=0}^{\nu} C_{j, l_1, l_2, \dots, l_n} \prod_{k=1}^n x_{k,i}^{l_k}, \quad i = 1, \dots, N \quad (10)$$

с неизвестными $C_{j, l_1, l_2, \dots, l_n}$, в которой N – число точек скалярного временного ряда, используемых для аппроксимации правых частей.

При заданных n и ν число коэффициентов K полиномов (9) в общем случае может быть определено по формуле $K = (n + \nu)! / (n! \nu!)$. Как правило, $N \gg K$, поэтому для оценивания параметров может применяться метод наименьших квадратов, однако. Однако при воздействии шумов получающаяся математическая модель является громоздкой, но при условии удачного выбора общего вида нелинейных функций ее решение воспроизводит сигнал.

Аналогичным образом можно реконструировать не только отображения (1), но и математиче-

ские модели в виде системы ОДУ 1-го порядка (2). Так как на предыдущих этапах осуществлялась реконструкция фазовой траектории, то все x_i известны; следовательно, можно определить производные от них (с оговорками, касающимися процедуры численного дифференцирования).

Если в качестве способа задания вектора состояния в фазовом пространстве используется метод последовательного дифференцирования, то математическую модель можно восстановить в более простом виде

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2, \quad \frac{dx_2}{dt} = x_3, \dots, \quad \frac{dx_n}{dt} = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (11)$$

в силу того, что взаимосвязь между координатами однозначно задается равенством (5)

Несмотря на относительную новизну методов хаотической динамики, идентификация систем (1), (2), с правыми частями вида (9), (11) осуществляется традиционными методами [3, 11, 14–17, 31, 34, 38]

2.4. Другие подходы

В рамках нелинейного анализа данных и моделирования активно применяются нейронные сети [5, 8, 20, 21, 36, 37, 39]. При изучении нелинейных явлений нейронные сети могут выступать в двух различных качествах. Они могут использоваться для анализа, диагностики, прогноза, поиска закономерностей, которые в дальнейшем могут быть использованы при построении традиционных моделей. В самом деле, прогнозирующая сеть сама по себе тоже представляет своеобразную имитационную модель изучаемого процесса. Нейронные сети также могут быть использованы как инструмент для моделирования различных нелинейных систем. На сегодняшний день они представляют собой один из немногих прообразов организованной сложности, характерной для ряда физических, многих биологических, технических и социальных систем [21].

В [24] предлагается оригинальный подход для моделирования сложных систем, допускающих группы симметрий. В результате применения метода к экспериментальным данным могут быть получены регулярные параметрически идентифицируемые модели, имеющие адекватное исходному процессу поведение. При этом качественное исследование поведения системы в локальной области сводится к системе, редуцированной на центральное многообразие.

3. Примеры

В качестве примера рассматривается идентификация временных рядов цен на металл и трафика в абонентов сотовой связи. Оценка параметров осуществляется фильтром Калмана. Для локальной аппроксимации использовалась система вида:

$$\begin{cases} x_{1,k+1} = x_{1,k} + x_{2,k} + \xi_{1,k}; \\ x_{2,k+1} = x_{2,k} + x_{3,k} + \xi_{2,k}; \\ x_{3,k+1} = \alpha_1 + \alpha_2 x_{1,k} + \alpha_3 x_{2,k} + \alpha_4 x_{3,k} + \\ + \alpha_5 x_{1,k} x_{2,k} + \alpha_6 x_{1,k} x_{3,k} + \alpha_7 x_{2,k} x_{3,k} + \\ + \alpha_8 x_{1,k}^2 + \alpha_9 x_{2,k}^2 + \alpha_{10} x_{3,k}^2 + \xi_{3,k}; \\ k = 1, 2, \dots; \end{cases} \quad (12)$$

где $x_{1,k}$ – исходный ряд, $x_{2,k}$ и $x_{3,k}$ – первая и вторая производные $x_{1,k}$, α_i ($i = \overline{1,10}$) – неизвестные параметры, $\xi_{j,k}$ ($j = \overline{1,3}$) – гауссовские шумы. Все координаты вектора состояния x_k измеряемые. Такая же система использовалась в [8] в задаче передачи информации.

Для идентификации параметров системы с помощью фильтра Калмана [3, 15, 17, 31, 37, 38] вектор состояния расширяется за счет неизвестных параметров, модель приводится к линейному виду

$$\begin{cases} x_k = A_k x_k + C_k \xi_k; \\ y_k = H_k x_k + \eta_k; \\ k = 1, 2, \dots, \end{cases} \quad (13)$$

где $x_k \in \mathcal{R}^{13}$ – вектор состояния системы, $y_k \in \mathcal{R}^3$ – вектор измерений, $\xi_k \in \mathcal{R}^{13}$ и $\eta_k \in \mathcal{R}^3$ – независимые гауссовские случайные последовательности с известным математическим ожиданием $M\xi_k \in \bar{\xi}$, $M\eta_k \in \bar{\eta}$ и известными ковариационными матрицами Q_k и R_k , размерности 13×13 и 3×3 , A_k и C_k – матрицы размерности 13×13 , H_k – матрица размерности 3×13 . Начальное состояние системы x_0 – случайный гауссовский вектор с известной положительно определенной матрицей ковариации P_0 и математическим ожиданием $Mx_0 \in \bar{x}_0$.

3.1. Котировки цен на металл

Исследуются ряд котировок цинка на Лондонской сырьевой бирже, содержащий 200 отсчетов. Показатель Херста для данного ряда равен 0,92, что свидетельствует о наличии детерминированной составляющей. Фазовый портрет (рис. 1) демонстрирует определенную цикличность в поведении ряда в ограниченной области фазового пространства.

В результате оценивания параметров системы (3) с помощью фильтра Калмана точность аппроксимации составила 98,5%. Точность прогноза (рис. 2) на 10 дней в среднем составила 94,8%.

3.2. Трафик абонентов сотовой связи

Особенностью исходных данных по трафику абонентов сотовой связи является наличие в них недельных колебаний с достаточно большой амплитудой колебаний. Главные пики на графике спек-

тра частотных мощностей (рис. 3) соответствуют кратным частотам $1/7 \approx 0,1429$, $2/7 \approx 0,2857$, $3/7 \approx 0,4286$.

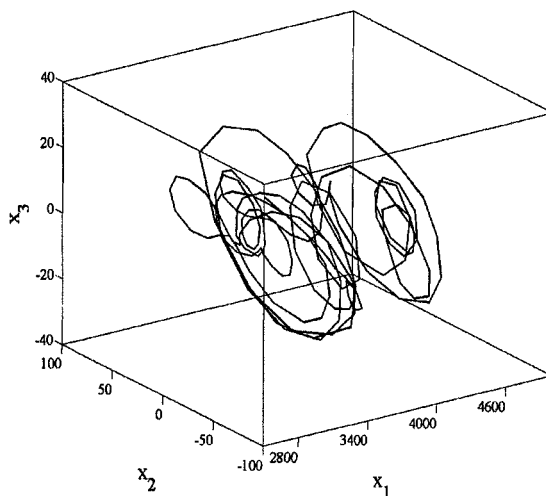


Рис. 1. Фазовый портрет для котировок цинка

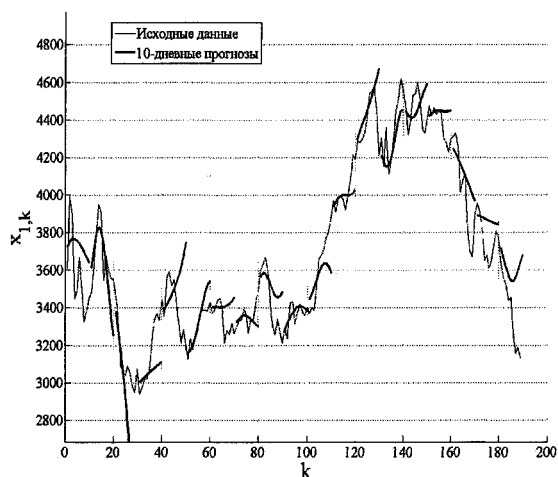


Рис. 2. Десятидневные дневные прогнозы котировок цинка

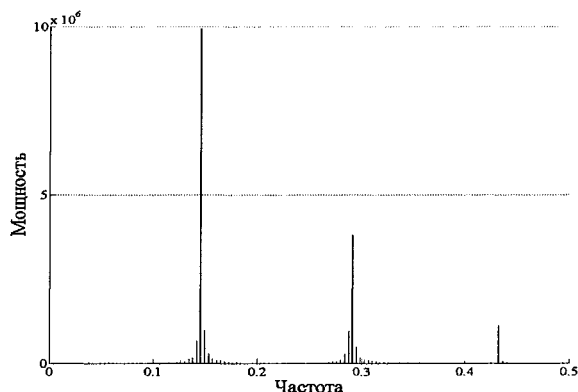


Рис. 3. Спектр для временного ряда трафика абонентов сотовой связи

После удаления недельной составляющей (рис. 4) из исходного ряда с помощью численного дифференцирования были получены его первая и

вторая производные (координаты x_2 и x_3 вектора состояния) и построен фазовый портрет наблюдаемой системы (рис. 5).

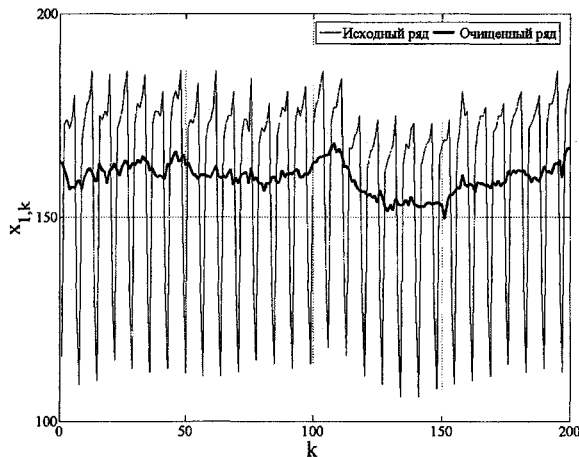


Рис. 4. Исходный и очищенный от периодических составляющих временной ряд трафика абонентов сотовой связи

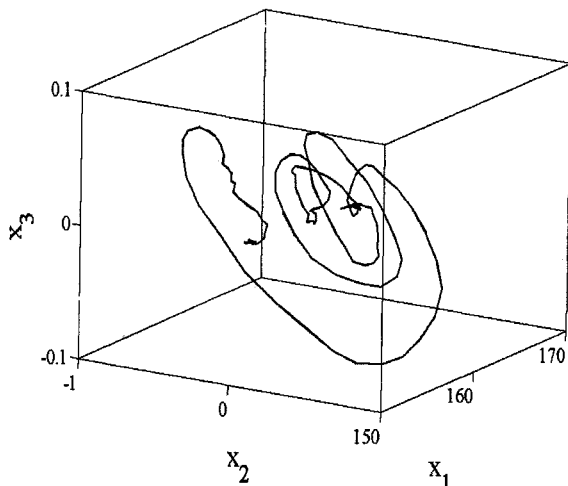


Рис. 5. Фазовый портрет для трафика абонентов сотовой связи

Показатель Херста для ряда очищенного от периодических составляющих равен 0,96.

Первоначально для прогнозов использовалась расширенная модель (12). Однако в ходе идентификации параметров модели с помощью фильтра Калмана оказалось, что некоторые из слагаемых суммы в правой части 3-го уравнения системы (12) не вносят существенный вклад в значение разности $\Delta x_{3,k} = x_{3,k+1} - x_{3,k}$. После приведения модели к виду (10) прогнозные значения временного ряда оказались не хуже, чем в предыдущей модели.

$$\begin{cases} x_{1,k+1} = x_{1,k} + x_{2,k} + \xi_{1,k}; \\ x_{2,k+1} = x_{2,k} + x_{3,k} + \xi_{2,k}; \\ x_{3,k+1} = \beta_1 x_{2,k+1} + \beta_2 x_{3,k+1} + \\ + \beta_3 x_{1,k+1} x_{2,k+1} + \beta_4 x_{1,k+1} x_{3,k+1} + \xi_{3,k}; \\ k = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (14)$$

Для упрощенной модели точность аппроксимации составила 99,7%, а точность прогноза (рис. 6) – 83,1%.

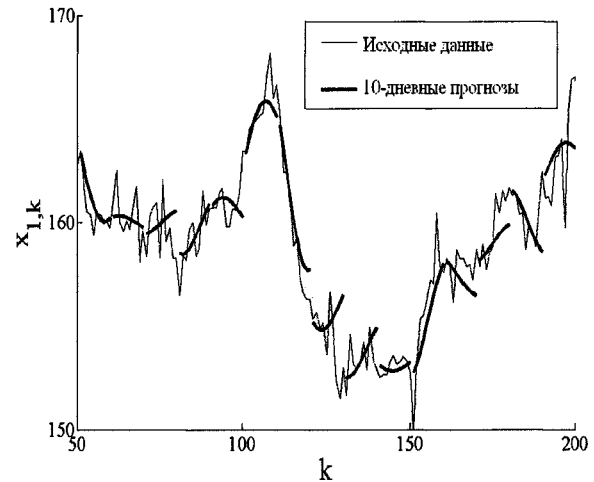


Рис. 6. Десятидневные прогнозы трафика абонентов сотовой связи

Выводы

Показана эффективность применения нелинейных моделей для решения задачи идентификации временных систем описывающих поведение временных рядов котировок цинка и трафика абонентов сотовой связи. Для идентификации параметров моделей использовался фильтр Калмана. Средняя точность десятидневных прогнозов по полученным моделям составила 94,8% для котировок цинка, 87,1% для трафика.

Литература

1. Аносов, О. Л. Восстановление динамических систем по хаотическим временным рядам / О. Л. Аносов, О. Я. Бутковский, Ю. А. Кравцов // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2000. – Т. 8, № 1. – С. 29–45.
2. Батунин, А. В. Фазовые траектории динамических систем на рынке ценных бумаг / А. В. Батунин, А. А. Килячков, Л. А. Чалдаева // Финансы и кредит. – 2001. – № 8(80). – С. 3–6.
3. Бек, В. В. Интегрированные системы терминального управления / В. В. Бек, Ю. С. Вишняков, А. Р. Махлин. – М.: Наука, 1989. – 224 с.
4. Борисов, А. Детерминированный хаос повышает криптостойкость / А. Борисов // Мобильные системы. – 2006. – № 9. – С. 44–48.
5. Борисов, Ю. Ю. Построение прогнозирующих моделей динамических систем на основе исследования окрестностей реконструированных аттракторов / Ю. Ю. Борисов // Автоматизация и современные технологии. – 2007. – № 2. – С. 32–37.
6. Безручко, Б. П. Глобальная реконструкция системы по временной реализации переходного процесса / Б. П. Безручко, Т. В. Диканев, Д. А. Смирнов // Изв. вузов Прикладная нелинейная динамика. – 2001. – Т. 9, № 3.

7. Безручко, Б. П. Математическое моделирование и хаотические временные ряды / Б. П. Безручко, Д. А. Смирнов. – Саратов: ГосУНЦ «Колледж», 2005. – 320 с.

8. Головкин, В. А. Нейросетевые методы определения спектра Ляпунова хаотических процессов / В. А. Головкин, Н. Ю. Чумерин // *Нейрокомпьютеры в системах обработки сигналов*. – 2004. – № 1. – С. 68–77.

9. Григорьев, В. П. Применение теории детерминированного хаоса к моделированию динамики фьючерсных рынков / В. П. Григорьев, А. В. Козловских, О. В. Ситникова // *Финансы и кредит*. – 2003. – № 24(138). – С. 43–45.

10. Калман, Р. Е. Идентификация систем с шумами / Р. Е. Калман // *Успехи мат. наук*. – 1985. – Т. 40, Вып. 4(244). – С. 27–41.

11. Карабутов, Н. Н. Адаптивная идентификация систем: Информационный синтез / Н. Н. Карабутов. – М.: КомКнига, 2006. – 384 с.

12. Колесников, А. А. Синергетические методы управления сложными системами / А. А. Колесников. – М.: КомКнига, 2005. – 237 с.

13. Красовский, А. А. Аттракторы и синтез управления в критических режимах / А. А. Красовский // *Изв. РАН. Теория и системы управления*. – 1996. – № 3. – С. 5–14.

14. Красовский, А. А. Общее условие, благоприятствующее точному оцениванию, и новые алгоритмы фильтрации / А. А. Красовский // *Изв. АН СССР. Техн. кибернетика*, 1984. – № 4. – С. 86–93.

15. Крынев, А. В. Математические методы обработки неопределенных данных / А. В. Крынев, Г. В. Лукин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 216 с.

16. Куржанский, А. Б. Идентификация нелинейных процессов – гарантированные оценки / А. Б. Куржанский, В. Д. Фурасов // *Автоматика и телемеханика*. – 1999. – № 6. – С. 70–87.

17. Льюнг, Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Л. Льюнг. – М.: Наука, 1991. – 432 с.

18. Магницкий, Н. А. Новые методы хаотической динамики / Н. А. Магницкий, С. В. Сидоров. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 320 с.

19. Магницкий, Ю. Н. Аппроксимация временных рядов хаотическими динамическими системами / Ю. Н. Магницкий // *Динамика неоднородных систем*. – 2006. – С. 98–103.

20. Макаренко, Н. Г. Эмбедология и нейропрогноз / Н. Г. Макаренко // *V Всеросс. научн.-техн. конф. «Нейроинформатика–2003»*. – М.: 2003. – Ч. 1. – С. 86–148.

21. Малинецкий, Г. Г. Нелинейная динамика: Подходы, результаты, надежды / Г. Г. Малинецкий, А. Б. Потапов, А. В. Подлазов. – М.: КомКнига, 2006. – 280 с.

22. Мандельброт, Б. Фракталы, случай и финансы / Б. Мандельброт. – Москва–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004. – 256 с.

23. Меклер, А. А. Применение аппарата нелинейного анализа динамических систем для обработки сигналов ЭЭГ / А. А. Меклер // *Актуальные проблемы современной математики: ученые записки*. – СПб.: Изд-во ЛГУ, 2004. – Т. 13, Вып. 2. – С. 112–140.

24. Никульчев, Е. В. Моделирование систем с нелинейной динамикой на основании экспериментальных данных / Е. В. Никульчев // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2006. – № 5. – С. 6–11.

25. Никульчев, Е. В. Модели хаоса для процессов изменения курса акций / Е. В. Никульчев, М. Е. Волович // *ExponentaPro*. – 2003. – № 1(1). – С. 49–52.

26. Павлов, А. Н. Применение метода восстановления математической модели к анализу электрокардиограмм / А. Н. Павлов, Н. Б. Янсон // *Изв. вузов*. – 1997. – Т. 5, № 1. – С. 93.

27. Реконструкция динамических систем по сигналам малой длительности / А. Н. Павлов и др. // *Письма в ЖТФ*. – 1999. – Т. 25, Вып. 11. – С. 7–13.

28. Петерс, Э. Фрактальный анализ финансовых рынков: Применение теории хаоса в инвестициях и экономике / Э. Петерс. – М.: Интернет-трейдинг, 2004. – 304 с.

29. Глобальная реконструкция по временным рядам в приложении к определению направления связи / В. И. Пономаренко и др. // *Вопросы прикладной физики*. – 2004. – Вып. 11.

30. Пономаренко, В. И. Кодирование и извлечение информации, замаскированной хаотическим сигналом системы с запаздыванием / В. И. Пономаренко, М. Д. Прохоров // *Радиотехника и электроника*. – 2004. – Т. 49, № 9. – С. 1098–1104.

31. Идентификация систем и задачи управления: на пути к современным системным методологиям / И. В. Прангишвили и др. // *Проблемы управления*. – 2004. – № 4. – С. 2–15.

32. Предсказуемость глобальных и региональных явлений в природе и обществе / В. А. Садовничий и др. // *Вестник ОГТТН РАН*. – 2000. – № 1(11). – С. 84–121.

33. Смирнов, Д. А. Метод оценки параметров одномерных отображений по временным рядам / Д. А. Смирнов, Д. С. Власкин, В. И. Пономаренко // *Письма в ЖТФ*. – 2005. – Т. 31, Вып. 3. – С. 18–26.

34. Смолин, В. В. Оценивание неизвестных параметров и состояния микроэкономических систем в условиях неопределенности на примере производственно-сбытовой фирмы / В. В. Смолин, В. И. Ширяев // *Изв. РАН. Теория и системы управления*. – 2003. – № 6. – С. 68–72.

35. Тратас, Ю. Г. Применение методов статистической теории связи к задачам приема хаотических колебаний / Ю. Г. Тратас // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 1998. – № 11. – С. 57–80.

36. Червяков, Н. И. Предсказание фрактальных временных рядов с помощью нейронных сетей / Н. И. Червяков, Э. Е. Тихонов // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. – 2003. – № 10–11. – С. 19.

37. Ширяев, В. И. Модели финансовых рынков. Нейросетевые методы в анализе финансовых рынков / В. И. Ширяев. – М.: КомКнига, 2007. – 224 с.
38. Современные методы идентификации систем / Под ред. П. Эйкхоффа. – М.: Мир, 1983. – 400 с.
39. Яковлев, В. Л. Модели детерминированного хаоса в задаче прогнозирования тенденций финансовых рынков и их нейросетевая реализация / В. Л. Яковлев, Г. Л. Яковлева, Л. А. Лисицкий // Информационные технологии. – 2000. – № 2. – С. 46–52.
40. Яновский, Л. П. Анализ состояния финансовых рынков на основе методов нелинейной динамики / Л. П. Яновский, Д. А. Филатов // Финансы и кредит. – 2005. – № 32(200). – С. 2–13.
41. Задача реконструкции математической модели применительно к электрокардиограмме / Н. Б. Янсон и др. // Письма в ЖТФ. – 1996. – Т. 22, №16. – С. 57.
42. Dynamical properties of a ferroelectric capacitors observed through nonlinear time series analysis / R. Hegger et al. // *Chaos*. – 1998. – Vol. 8. – P. 727–754.
43. Kadtko, J. Classification of highly noisy signals using global dynamical models / J. Kadtko // *Phys. Lett. A*. – 1995. – Vol. 203. – P. 196–202.
44. Analyzing chaotic behavior in a Belousov–Zhabotinsky reaction by using a global vector field reconstruction / C. Letellier et al. // *J. Phys. Chem.* – 1998. – Vol. 102. – P. 10265–10273.
45. Characterization of dolphin acoustic echolocation data using a dynamical classification method / M. Kremliovsky et al. // *Int. J. of Bifurcations and Chaos*. – 1998. – Vol. 8. – P. 813–824.
46. Geometry from a time series / N. M. Packard // *Phys. Rev. Lett.* – 1980. – Vol. 45. – P. 712.
47. Rosenblum, M. G. Detecting direction of coupling in interacting oscillator / M. G. Rosenblum, A. S. Pikovsky // *Phys. Rev. E*. – 2001. – Vol. 64.
48. Identification of nucleocytoplasmic cycling as a remote sensor in cellular signaling by databased modeling / I. Swameye et al. // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. – 2003. – Vol. 100. – P. 1028–1033.
49. Takens, F. Detecting strange attractors in turbulence / F. Takens // *Lec. Notes in Math.* – 1981. – Vol. 898. – P. 366–381.
50. Voss, H. U. Nonlinear dynamical system identification from uncertain and indirect measurements / H. U. Voss, J. Timmer // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. – 2004. – № 6. – P. 1905–1933.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ТАБЛИЧНОГО МЕТОДА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ОРГАНИЧЕСКОГО РАССТРОЙСТВА ЛИЧНОСТИ И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ В ФОРМЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ

М.А. Беребин, А.Ю. Рязанова

В современной клинической психодиагностике одним из информативных и в то же время технологичных являются табличные методы. Их создание основываются на методических приемах интерпретации психологического содержания синдромов психических расстройств. В наиболее общем виде табличная диагностика представляет собой совокупность моделей психических заболеваний и моделей их диагностики (распознавания), включая модели дифференциальной диагностики (различительного познания нескольких объектов). В этом плане задача диагностики и дифференциальной диагностики представляет собой вариант реализации алгоритмов, рассматриваемых в теории распознавания образов, а табличный метод (модель) – специфическую форму реконструкции объекта (в форме «образа»). Принятие решения при клинико-психологической диагностике носит субъективный (иначе – экспертный) характер, свойственный задачам, решаемым в так называемых нечетких предметных областях (психиатрия и клиническая психология являются наиболее яркими примерами нечеткой предметной области «медицина»).

Табличный метод представляет собой, во-первых, алгоритмы создания и формализации модели объекта нечеткой предметной области (его описание в более строгом табличном, матричном виде, отражающем, тем не менее, все специфические клинические особенности объекта). Во-вторых, в табличном методе отражены формализованные алгоритмы отнесения «нового» объекта к моделируемому классу либо алгоритмы различения сходных объектов. В-третьих, представленные выше алгоритмы в большей или меньшей степени соответствуют процедурам принятия решения, реально существующим в клинической и психологической практике.

Приведенные выше концептуальные положения были применены для решения задач дифференциальной диагностики различных форм органического расстройства личности (ОРЛ) при военно-врачебной экспертизе. Значимость такого исследования вызвана нормативно закрепленным требованием о строгом соотношении особенностей психических нарушений с дифференцированными категориями годности к военной службе.

С этой целью проводилось исследование системы представлений 20 психологов и 20 психиатров о клинико-психологической картине ОРЛ в целом и его различных вариантов – «псевдопсихопатическо-

го ОРЛ» (ОРЛ_{пмс}) и «псевдоолигофренического ОРЛ» (ОРЛ_{пол}). Методология исследования основана на применении положений инженерии знаний в медицинской психодиагностике [6], в частности, посредством оригинальной технологии «извлечения скрытых знаний» (hidden knowledge) в русле общей методологии Data Mining. Полученная база знаний подвергалась экспертному оцениванию этим же коллективом экспертов по специальной технологии. Для обработки полученных массивов экспертных оценок применялись математические методы, реализованные в компьютерной программе «EXPANE-2». В итоге получены многомерные модели ОРЛ и его вариантов, содержательно наполненные клинико-психологическими характеристиками этого психического расстройства.

Затем используемая в настоящее время методология построения диагностических таблиц [1, 2, 4] была нами дополнена новой технологией. На первом этапе 40 экспертами оценивался перечень из 39 клинико-психологических проявлений ОРЛ, выделенный на основании анализа научной литературы по проблеме. Кроме того, экспертами оценивались клинические синдромы ОРЛ, выделенные по диагностическим критериями раздела F.07.0 Международной классификации болезней 10-го пересмотра (МКБ-10). Интегральная экспертная оценка имела двумерную характеристику вида $a \times p$, где a – «интенсивность проявления симптома в клинической картине ОРЛ», p – «важность (вес, значимость,) этого симптома для вынесения диагноза ОРЛ».

Итоговое значение симптома определялось по формуле:

$$R = \left(\frac{100}{sw \cdot Grad \cdot n} \right) \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^k a(i, j) p(i, j), \quad (1)$$

где $a(i, j)$ – оценка j -го симптома i -м экспертом, $p(i, j)$ – вес j -го критерия (симптома) у i -го эксперта, k – общее число симптомов, sw – сумма весов всех симптомов, n – число экспертов, $Grad$ – число градаций шкалы (3).

В итоге были получены иерархические перечни 19 наиболее информативных симптомов ОРЛ и каждого его варианта ОРЛ_{пмс} и ОРЛ_{пол} с значениями R , превышающими рекомендованный для такого рода задач пороговое значение $R_{cp} \pm 1/4\sigma$. По такому же алгоритму получены экспертные оценки вида $a \times p$ всех семи диагностических синдромов ОРЛ по МКБ-10.

Кроме того, проводился анализ частоты отнесения каждым экспертом каждого из 19 симптомов в один из 7 синдромов ОРЛ. По результатам частотного анализа была сформирована табличная модель ОРЛ и вариантов – ОРЛ_{Пнс} и ОРЛ_{Пол}, в которой каждый из 7 синдромов ОРЛ был наполнен наиболее информативными клинико-психологическими симптомами.

В дальнейшем для каждого симптома и синдрома модели были рассчитаны линейные коэффициенты вида

$$N = \frac{R_{kj} - R_{\text{порог}}}{R_{\text{порог}}}, \quad (2)$$

где R_{kj} – полученное теоретическое балльное значение k -го синдрома (симптома) в j -й группе (в модели ОРЛ_{Пнс} и ОРЛ_{Пол} соответственно), и $R_{\text{порог}}$ – пороговое значение.

Описанный выше алгоритм позволил получить содержательное и математико-статистическое наполнение модели ОРЛ и ее вариантов ОРЛ_{Пнс} и ОРЛ_{Пол} в виде линейно преобразованных показателей каждого синдрома и иерархии синдромов

«Обучение» полученной табличной модели и разработка алгоритма дифференциальной диагностики ОРЛ_{Пнс} и ОРЛ_{Пол} проводились на основании результатов перевода качественных данных экспериментально-психологического исследования 148 подростков с диагнозом ОРЛ в квантифицированные показатели (0–3 балла, в зависимости от степени выраженности нарушений психических функций). Клиническая дифференциация 148 испытуемых по группам ОРЛ_{Пнс} и ОРЛ_{Пол} рассматривалась в качестве «внешнего критерия» надежности и валидности проводимой табличной диагностики.

На следующем этапе исследования результаты каждого испытуемого были представлены в виде иерархии синдромов ОРЛ и были рассчитаны среднегрупповые иерархические показатели (см. пример в таблице).

Иерархия синдромов модели ОРЛ_{Пол}

Синдром ОРЛ _{Пол}	Усредненный показатель
Нарушения познавательной деятельности	6,2 ± 0,7
Нарушения мышления	4,8 ± 2,2
Нарушения организации целенаправленной деятельности	4,2 ± 0,92
Интеллектуальные способности	4 ± 1,68
Эмоциональные изменения	3,4 ± 2,04
Нарушения поведения	3,1 ± 2,12
Расторможенность влечений	2,4 ± 0,3

Диагностический алгоритм основан на сравнении иерархий рангов каждого конкретного испытуемого с иерархией синдромов каждой из моделей ОРЛ_{Пнс} и ОРЛ_{Пол}.

Сравнение проводилось путем расчета значений метрики пространства Хемминга:

$$d_{ij}^{(H)} = \sum_{k=1}^n |x_{ik} - x_{jk}|, \quad (3)$$

где x_{ik} – ранговое место k -го синдрома у конкретного i -го пациента; x_{jk} – ранговое место этого k -го синдрома в теоретической модели соответствующей j -той группы (ранг этого синдрома в иерархии синдромов ОРЛ_{Пнс} и ОРЛ_{Пол} соответственно); n – общее число синдромов в теоретической модели.

Метрика d_{ij} отражает меру удаленности–приближенности показателей i -го испытуемого от обобщенных показателей соответствующей теоретической модели ОРЛ_{Пнс} или ОРЛ_{Пол}.

Рассчитанные таким образом значения пар метрик d_{ij} у каждого испытуемого явились основанием для эмпирического отнесения испытуемых к определенной группе ОРЛ. В случае превышения значений одной из метрик d_{ij} над значениями другой d_{ij} (например, $d_{\text{ОРЛПол}} > d_{\text{ОРЛПнс}}$), испытуемый был отнесен к соответствующей группе ОРЛ_{Пол}.

Из дальнейшего исследования были исключены 16 испытуемых (10,8 % выборки), у которых обнаружены расхождения между оценкой по «внешнему критерию» (диагнозу соответствующего варианта ОРЛ) и полученной описанным выше методом оценкой d_{ij} . Дальнейшее обучение модели проводилось на выборках пациентов с ОРЛ_{Пнс} ($n = 73$) и ОРЛ_{Пол} ($n = 59$). Для каждой группы описанным выше способом были рассчитаны значения первичных статистик d и σ : $d_{\text{ОРЛПол}} = 15,1 \pm 2,84$ и $d_{\text{ОРЛПнс}} = 10,3 \pm 3,6$.

Для эмпирического подтверждения верности решения экспертной задачи проводилось изучение нескольких «новых случаев» (обследование новых испытуемых с подозрением на диагноз ОРЛ), фактически выполнявших роль «обучения» алгоритма дифференциальной диагностики («обучение с учителем» [3, 6])

Решение об отнесении испытуемых к тому или иному типу проводилось на основании следующих решающих (продукционных) правил:

1. если $d_{ij} > d_{\text{типаОРЛ}} + 1/4\sigma$, то «К данному типу ОРЛ не относится»; (4)

2. если $d_{ij} = d_{\text{типаОРЛ}} \pm 1/4\sigma$, то «Решение неопределенное»; (5)

3. если $d_{ij} < d_{\text{типаОРЛ}} - 1/4\sigma$, то «Диагностируется данный тип ОРЛ». (6)

В развитие строгого алгоритма табличной диагностики предложено, что в случае выполнения условия (5) решение задачи дифференциальной диагностики может быть принято на вероятностном уровне.

В этом случае значения метрик d_j (или в каждом частном случае – $d_{\text{ОРЛПнс}}$ или $d_{\text{ОРЛПол}}$) рассматриваются в качестве своеобразных «центроидов» групп. Предположение о возможности отнесения i -го испытуемого к той или иной группе выносится на основании анализа выполнения неравенств

$$(d_{\text{ОРЛПол}} - d_{\text{ОРЛПол}}) \geq (d_{\text{ОРЛПнс}} - d_{\text{ОРЛПнс}}), \quad (7)$$

либо

$$(d_{i\text{ОРЛ}_{\text{пол}}} - d_{\text{ОРЛ}_{\text{пол}}}) \leq (d_{i\text{ОРЛ}_{\text{пмс}}} - d_{\text{ОРЛ}_{\text{пмс}}}). \quad (8)$$

В случае выполнения неравенства (7) делается вывод о вероятности отнесения i -го испытуемого к пациентам с ОРЛ_{пмс}, в случае (8) – вероятно отнесение испытуемого в группу ОРЛ_{пол}.

В случае выполнения условия (4) для каждого типа ОРЛ принимается решение либо об отсутствии органического расстройства личности, либо о наличии психических расстройств органической природы не личностного уровня.

Описанный выше алгоритм табличной диагностики позволяет, во-первых, получать адекватное отражение результатов перевода квантифицированных данных патопсихологического исследования по каждой методике в обобщенную оценку выраженности нарушения. Во-вторых, в таблице находят отражение согласованные с критериями МКБ-10 иерархические описания выявленных качественных нарушений психической деятельности при различных вариантах ОРЛ. Это позволяет выявить наиболее (наименее) выраженные патопсихологические симптомы, и, в конечном случае, иерархию этих симптомов (в случае единичного исследования пациента с подозрением на ОРЛ). Предложенные решающие правила позволяют с определенной мерой достоверности отнести каждого нового испытуемого к определенному варианту ОРЛ (ОРЛ_{пмс}, либо ОРЛ_{пол}).

В целях оптимизации процедуры табличной дифференциальной диагностики и исключения трудоемких процессов при ее проведении была разработана соответствующая компьютерная программа – экспертная система (ЭС) «ОРЛ-дифференциатор», прошедшая апробацию в работе лаборатории клинической психологии Челябинской областной психиатрической больницы №1.

Основу базы знаний для ЭС составили таблицы перевода качественных результатов экспериментально-психологического исследования в баллы иерархической шкалы интенсивности выраженности симптоматики (0–3 балла).

Основу блока логического вывода ЭС составляет описанный алгоритм получения значений метрики d_{ij} и совокупность решающих правил (4)–(8).

Программная реализация ЭС позволяет представить результаты анализа в виде:

- алгоритмизированного вербального описания наблюдаемой картины психических нарушений (каждый синдром ОРЛ – каждая его клини-

ко-психологическая характеристика – качественно-количественное описание нарушения);

- обобщенного вывода (заключения) о достоверном либо вероятном наличии ОРЛ в том или ином варианте (ОРЛ_{пмс}, либо ОРЛ_{пол}).

Отдельным фрагментом ЭС является совокупность продукционных правил, применяющихся в случае выполнения условия (4).

Представленный алгоритм табличного метода дифференциальной диагностики и его аппаратно-программная реализация в виде ЭС позволяют однозначно интерпретировать результаты экспериментально-психологического исследования, обеспечить реализацию единого подхода к вынесению вывода о характере и структуре наблюдаемой психической патологии, доказательно обосновать экспертное решение о категории годности к военной службе, значительно облегчить трудоемкую для психолога процедуру вынесения заключения по результатам исследования.

Литература

1. Головкин, С. И. Разработка табличных методов диагностики вялотекущей шизофрении с эпилептоидным синдромом у подростков / С. И. Головкин // *Обозреватель психиатрии и медицинской психологии*. – 1991. – № 3. – С. 65–68.

2. Головкин, С. И. Табличный метод диагностики вялотекущей психопатоподобной шизофрении с синдромом неустойчивого поведения у подростков / С. И. Головкин // *Обозреватель психиатрии и медицинской психологии*. – 1991. – № 4. – С. 56–59.

3. Дюк, В. А. Компьютерная психодиагностика / В. А. Дюк. – СПб.: Изд-во «Братство», 1994. – 364 с.

4. Журавлев, И. И. Разработка табличных методов диагностики вялотекущей шизофрении с дисморфоманическим синдромом / И. И. Журавлев // *Обозреватель психиатрии и медицинской психологии*. – 1991. – № 4. – С. 59–61.

5. Кудрявцев, И. А. О диагностической информативности некоторых патопсихологических симптомокомплексов / И. А. Кудрявцев // *Журнал невропатологии и психиатрии им. Корсакова*. – 1982. – № 12. – С. 1814–1818.

6. Червинская, К. Р. Медицинская психодиагностика и инженерия знаний / К. Р. Червинская, О. Ю. Щелкова; под ред. Л. И. Вассермана. – СПб.: Ювента; М.: Издательский центр «Академия», 2002. – 624 с.

ОБ ОПТИМАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ ПРОЦЕССОМ ВЕЛЬЦЕВАНИЯ ЦИНКОВЫХ КЕКОВ

А.Р. Вернергольд, Л.С. Казаринов, О.В. Колесникова, Д.А. Шнайдер

Производство цинка – одно из основных направлений цветной металлургии страны. В 90-х годах резко увеличилась конкуренция на рынке цинка. Для сохранения своих позиций перед заводами возникла проблема увеличения производства цинка с улучшением его качества и уменьшением затрат на производство. Это определило необходимость реконструкции заводов с ориентацией на внедрение современных информационных технологий.

Крупнейшим в РФ производителем цинка, кадмия, индия является ОАО «Челябинский цинковый завод». ОАО «ЧЦЗ» как и большинство заводов по производству цинка работает по классической гидрометаллургической схеме: обжиг цинковых концентратов, выщелачивание огарка с очисткой растворов и электролитическое осаждение цинка с последующим переплавом катодов.

Первой стадией указанной схемы производства цинка является обжиг цинковых концентратов и некондиционных вторичных видов сырья (коллективные концентраты, окисленная руда, кеки, шламы и др.). Самой эффективной технологией утилизации цинкосодержащего вторичного сырья является вельц-процесс.

Вельц-процесс применяется для переработки материалов с низким содержанием летучих металлов путем нагревания их во вращающейся трубчатой печи до температуры, при которой извлекаемый металл возгоняется. Возогнаный металл увлекается газами, образующимися в печи, и улавливается в виде пыли, обогащенной возогнанным металлом.

На качество процесса вельцевания сильно влияют нестабильность основных параметров, отсутствие автоматизированного контроля и управления локальными и сквозными параметрами, неопределенность параметров рабочего режима, обеспечивающих высокий выход вельц-оксида. Все это снижает качество процесса вельцевания.

Актуальной задачей повышения эффективности процесса вельцевания является автоматизация управления в рамках АСУ ТП. Задачи данного класса рассматривались в литературе, главным образом для цементного производства [1–4]. Вопросы управления процессом вельцевания цинковых кеков с точки зрения эффективности производства освещены в работах [5, 6]. Однако задача использования современных методов обработки информации в АСУ ТП с целью оптимизации процесса вельцевания изучена недостаточно.

1. Постановка задачи

Процесс вельцевания цинковых кеков производится во вращающихся печах. Общая структура процесса представлена на рис. 1. Цинковый кек содержит около 20 % цинка, индий, кадмий, свинец, медь. Для извлечения этих металлов его смешивают с коксовой мелочью и нагревают до 1250–1350 °С в вельц-печи. Тепло выделяется за счёт сгорания коксовой мелочи и экзотермических реакций. В качестве флюсующих добавок, позволяющих оптимизировать вельц-процесс при переработке цинковых кеков, используются известняк и формовочный песок. Технологический воздух используется для интенсификации процессов горения углерода и окисления паров цинка, свинца и кадмия, поддержания необходимой температуры в реакционной зоне. Принудительная подача воздуха используется также для эффективного сжигания природного газа при разогреве печи. Природный газ используется для сушки и разогрева футеровки печи при ее пуске, а также для разогрева материала после остановок печи и технологических нарушений.

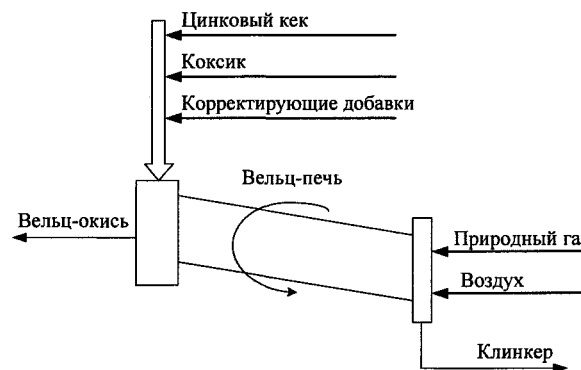


Рис. 1. Структура процесса вельцевания

Оптимальным является ведение процесса без использования природного газа. Продуктами вельцевания являются вельц-окись, которая возгоняется, охлаждается и улавливается рукавными фильтрами, и медистый клинкер. В вельц-окиси содержится около 75 % оксида цинка, оксиды кадмия, индия и свинца. Медистый клинкер содержит 3–4 % меди и 30–35 % железа. Вельц-окись направляется на выщелачивание, а клинкер отгружается на медные предприятия.

В соответствии с работой [5], в качестве критериев оптимизации вельц-процесса можно принять следующие:

- максимальное содержание оксида цинка в пыли, которую выносят из печи протекающие газы $\max M_{\text{ZnO}}$; (1)

- максимальное повышение CO_2 в отходящих газах

$$\max V_{CO_2}; \quad (2)$$

- минимальный объем дутья (воздуха) при удовлетворении допусков на режимные параметры вельц-процесса

$$\min V_{O_2}. \quad (3)$$

Смысл этих критериев достаточно очевиден: критерий (1) отражает выход целевого продукта вельц-печи; максимальное содержание CO_2 в отходящих газах (критерий (2)) обеспечивает полное выгорание в печи составляющей углерода, являющейся основным источником тепла вельц-процесса; минимизация расхода кислорода V_{O_2} (критерий (3)) соответствует минимальной подаче воздуха в печь. Здесь, если подается избыток воздуха, то тепло выдувается из печи и снижается ее энергетическая эффективность. При недостатке воздуха наблюдается неполное выгорание соответствующей составляющей углерода и недовыработка тепловой энергии, что также снижает эффективность печи.

В процессе эксплуатации печи наблюдаются различные режимы ее работы, которые зависят от параметров загрузки печи и параметров ведения вельц-процесса. Каждому режиму ведения вельц-процесса соответствует свой набор результирующих показателей:

$$\left\{ (M_{ZnO}, V_{CO_2}, V_{O_2})_s : s \in 1, 2, \dots, N \right\}, \quad (4)$$

где $(M_{ZnO}, V_{CO_2}, V_{O_2})$ – вектор наблюдаемых базовых показателей эффективности режимов; s – индекс наблюдаемых режимов печи; N – количество режимов.

В общем случае ведение вельц-процесса не является оптимальным. Формально это означает, что для некоторого s -го режима, характеризующегося наблюдаемыми значениями показателей эффективности $(M_{ZnO}, V_{CO_2}, V_{O_2})$, можно указать резервы повышения показателей эффективности: повышение M_{ZnO} , V_{CO_2} и снижение V_{O_2} . Для оптимальных режимов невозможно осуществить улучшение одного из показателей без ухудшения других показателей. Как известно из теории оптимизации, совокупность неуплучшаемых решений образуют область Парето в задачах оптимизации. Представляется целесообразным из множества всех наблюдаемых режимов ведения вельц-процесса выделить Парето-оптимальные режимы. Зная набор Парето-оптимальных режимов, можно рассчитать для них тепловой и материальный балансы, которые, в свою очередь, могут служить основой для оптимального ведения вельц-процесса.

В данной работе приводится алгоритм выделения Парето-оптимальных режимов в рамках ведения информационной базы данных АСУ ТП.

2. Алгоритм выделения области Парето-оптимальных режимов в информационной базе данных

Будем теоретически представлять уравнение области Парето соотношением:

$$y = f[a](x), \quad (5)$$

где y – объем воздушного дутья; x – вектор технологических факторов, в данном случае, состоящий из двух факторов: M_{ZnO} и V_{CO_2} ; a – вектор структурных параметров зависимости (5).

Отклонение данных эксплуатации от теоретического значения, определяемого областью Парето, определим соотношением

$$e_s = y_s - f[a](x_s), \quad s = 1, 2, \dots, N, \quad (6)$$

где s – индекс статистического наблюдения.

Для того чтобы выделить область Парето, на отклонение от указанной области введем штрафную функцию (рис. 2).

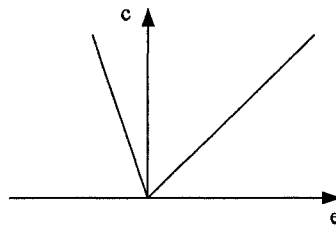


Рис. 2. Штрафная функция

Суммарный штраф при отклонении данных эксплуатации от области Парето:

$$C = \sum_s S_{ш}^2 |e_s^-|^2 + \sum_s |e_s^+|^2, \quad (7)$$

где e_s^- , e_s^+ – отрицательные и положительные значения отклонений экспериментальных данных от области Парето; $S_{ш}$ – величина штрафа при наличии отклонения экспериментального значения показателя y_s ниже теоретического значения, определяемого областью Парето $f[a](x_s)$.

Ставится задача найти аналитическое выражение области Парето по критерию минимума суммарного штрафа (7) на данных эксплуатации.

Сначала предположим, что выражение отклонения (6) можно представить в виде линейной функции:

$$e_s = y_s - \sum_{j=0}^n a_j x_{js}, \quad n = 1, 2. \quad (8)$$

Условия минимума суммарного штрафа:

$$\frac{\partial C}{\partial a_i} = -2S_{ш}^2 \sum_s 1(|e_s^-|) \left(y_s - \sum_{j=0}^n a_j x_{js} \right) x_{is} - 2 \sum_s 1(|e_s^+|) \left(y_s - \sum_{j=0}^n a_j x_{js} \right) x_{is} = 0, \quad i = 0, 1, \dots, n, \quad (9)$$

где $1(|e_s^-|)$, $1(|e_s^+|)$ – единичные функции. Решение линейного алгебраического уравнения:

$$\sum_{j=0}^n g_{ij} a_j = d_i, \quad i = 0, 1, \dots, n; \quad (10)$$

$$g_{ij} = S_{\text{ш}}^2 \sum_s 1(e_s^-) x_{is} x_{js} + \sum_s 1(e_s^+) x_{is} x_{js};$$

$$d_i = S_{\text{ш}}^2 \sum_s 1(e_s^-) y_s y_{js} + \sum_s 1(e_s^+) y_s x_{js}.$$

Решение задачи (10) осуществляется итерационно на основе последовательных решений соответствующей системы линейных алгебраических уравнений (10), определяющих минимизацию целевой функции (7) методом наискорейшего спуска.

В случае нелинейной функции $f[\mathbf{a}](\mathbf{x}_s)$ задача решается методом Ньютона. В этом случае постановка задачи (6), (7) линеаризуется в виде (8) и решение ведется итерационно с использованием решений системы уравнений (10).

В результате будет получено аналитическое выражение области Парето (5), с помощью которого можно характеризовать режимы работы печи как оптимальные или неоптимальные.

Выводы

1. При автоматизации управления процессами вельцевания цинковых кеков наряду с задачами контроля и стабилизации режимных параметров целесообразно решать задачу оптимизации режимов процессов вельцевания.

2. Решение задачи оптимального управления вельц-процессом осуществляется на основе выявления области Парето в пространстве основных показателей эффективности указанного процесса.

3. В работе предложен алгоритм выделения области Парето оптимальных режимов в информационной базе данных АСУ ТП.

4. Применение предложенного алгоритма выделения области Парето позволяет организовать оптимальное управление технологическим процессом в печи, обеспечивающее повышение его эффективности.

Литература

1. Лисиенко, В. Г. *Вращающиеся печи: тепло-техника, управление и экология: Справ. изд.: В 2 кн.* / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгин. – М.: Теплотехник, 2004. – 588 с.
2. Krings, L. *LINKman in cement production: optimization beyond traditional control* / L. Krings, D. W. Haspel // *ABB Review*. – 1995. – № 7. – С. 32–38.
3. *Model predictive control of the calciner at Holcim's Lagerdorf plant with the ABB Expert Optimizer* / K. S. Stadler et al. // *ZKG INTERNATIONAL*. – 2007. – № 3.
4. Галлестей, Э. *Новые подходы к работе в цементной промышленности* / Э. Галлестей, Д. Кастаньоли, К. Колберт // *ABB Review*. – 2004. – № 2. – С. 13–19.
5. Козлов, П. А. *Вельц-процесс* / П. А. Козлов. – М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2002. – 176 с.
6. Абдеев, М. А. *Вельцевание цинк-свинцово-державших материалов* / М. А. Абдеев, А. В. Колесников, Н. Н. Ушаков. – М.: Металлургия, 1985. – 120 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БЕЛОУСОВ Михаил Дмитриевич – соискатель ученой степени при кафедре информационно-измерительной техники ЮУрГУ, инженер экспериментального отдела ЗАО «ПГ «Метран».

БЕРЕБИН Михаил Алексеевич – кандидат медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой клинической психологии ЮУрГУ.

ВЕРНЕРГОЛЬД Александр Рудольфович – начальник цеха КИП, главный метролог ОАО «Челябинский цинковый завод».

ГРИШИН Илья Владимирович – ведущий специалист аналитической группы ООО «ПортВижн».

КАЗАРИНОВ Лев Сергеевич – доктор технических наук, профессор, декан приборостроительного факультета ЮУрГУ, заведующий кафедрой автоматизации и управления ЮУрГУ, научный консультант администрации Челябинской области.

КАФТАННИКОВ Игорь Леопольдович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электронных вычислительных машин ЮУрГУ.

КОЛЕСНИКОВА Ольга Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и управления ЮУрГУ.

КОНДРАТОВ Андрей Александрович – преподаватель кафедры РЭССБ ЧВВАУИШ.

КОСТРОМИН Виктор Александрович – главный инженер ФГУП «НПО автоматизации», г. Екатеринбург.

КРИВОНОЖЕНКОВ Валерий Александрович – адъюнкт кафедры 33 ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского.

ЛАЗУКОВ Андрей Владимирович – инженер-конструктор подразделения метрологического оборудования ЗАО «ПГ «Метран».

ЛАПИН Андрей Павлович – кандидат технических наук, доцент кафедры информационно-измерительной техники ЮУрГУ.

ЛАПИНА Екатерина Андреевна – студентка кафедры информационно-измерительной техники ЮУрГУ.

ЛАТИПОВА Алина Таиховна – ассистент кафедры экономико-математических методов и статистики ЮУрГУ.

ЛЕБЕДЕВ Александр Анатольевич – магистрант кафедры автоматизации и управления ЮУрГУ.

МАНКЕВИЧ Елена Игоревна – студентка кафедры прикладной математики ЮУрГУ.

ПАНЮКОВ Анатолий Васильевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой экономико-математических методов и статистики ЮУрГУ, заслуженный работник высшей школы РФ.

ПИМЕНОВА Надежда Владимировна – аспирант кафедры электронных вычислительных машин ЮУрГУ.

ПОПОВ Андрей Евгеньевич – студент кафедры систем управления ЮУрГУ.

РАЗНОПОЛОВ Кирилл Олегович – старший преподаватель кафедры автоматизации и управления ЮУрГУ.

РАЗНОПОЛОВ Олег Александрович – доцент кафедры автоматизации и управления ЮУрГУ.

РЯЗАНОВА Анна Юрьевна – старший преподаватель кафедры клинической психологии ЮУрГУ.

ТЕЛЕГИНА Карина Васильевна – инженер кафедры прикладной математики ЮУрГУ.

ЦЫПИНА Юлия Николаевна – студентка кафедры информационно-измерительной техники ЮУрГУ.

ШАЛИМОВ Леонид Николаевич – кандидат экономических наук, генеральный директор ФГУП «НПО автоматизации», г. Екатеринбург.

ШЕЛУДЬКО Антон Сергеевич – студент кафедры прикладной математики ЮУрГУ.

ШЕСТАКОВ Александр Леонидович – доктор технических наук, профессор, ректор ЮУрГУ, заслуженный работник высшей школы РФ.

ШИРЯЕВ Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики ЮУрГУ, почетный работник высшей школы РФ, действительный член Международной академии навигации и управления движением.

ШНАЙДЕР Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и управления ЮУрГУ.

ЩИПИЦЫН Анатолий Георгиевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой систем управления ЮУрГУ, действительный член Международной академии навигации и управления движением.

ЩИПИЦЫНА Мария Анатольевна – магистрант кафедры систем управления ЮУрГУ.

*Подписной индекс Вестника ЮУрГУ, серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»: 29008, объединенный каталог «Пресса России».
Периодичность выхода – 2 номера в год.*

*Информация о «Вестнике ЮУрГУ» и требования к оформлению статей
доступны в Интернет по адресу:
<http://www.susu.ac.ru/ru/science/publish/vestnik/>*

**ВЕСТНИК
ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

№ 3 (103) 2008

**Серия
«КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ,
РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»**

Выпуск 7

Издательство Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 13.02.2008. Формат 60×84 1/8. Печать трафаретная.

Усл. печ. л. 6,97. Уч.-изд. л. 6,33. Тираж 500 экз. Заказ 24/91.

Отпечатано в типографии Издательства ЮУрГУ. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.